



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**

**ENGENHARIA MECÂNICA**

**PROJETO, CONSTRUÇÃO E CONTROLE DE UM  
MANIPULADOR ROBÓTICO ATUADO POR  
MÚSCULOS DE MCKIBBEN**

**VINICIUS AVELINO SENA**

**Belo Horizonte, setembro de 2021**

VINÍCIUS AVELINO SENA

**PROJETO, CONSTRUÇÃO E CONTROLE DE UM  
MANIPULADOR ROBÓTICO ATUADO POR MÚSCULOS DE  
MCKIBBEN**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de concentração de Projeto e Sistemas.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo José Lima II

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2021

Sena, Vinicius Avelino.  
S474p Projeto, construção e controle de um manipulador  
robótico atuado por músculos de McKibben [recurso eletrônico] / Vinicius Avelino  
Sena. - 2021.

1 recurso online (65 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Eduardo José Lima II.

Gerais, Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas  
Escola de Engenharia.

Inclui bibliografia.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia mecânica - Teses 2. Manipuladores (Mecanismo) -  
Teses. 3. Controladores PID - Teses. I. Lima II, Eduardo José. II. Universidade  
Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621 (043)

Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária Roseli Alves de Oliveira CRB/6 2121  
Biblioteca Prof. Mário Werneck, Escola de Engenharia da UFMG



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

FOLHA DE APROVAÇÃO

**PROJETO, CONSTRUÇÃO E CONTROLE DE UM MANIPULADOR ROBÓTICO ATUADO POR MÚSCULOS DE MCKIBBEN**

VINÍCIUS AVELINO SENA

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, constituída pelos Professores: Dr. Eduardo José Lima II (Orientador - Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG), Dr. Antonio Eustáquio de Melo Pertence (Universidade Federal de Minas Gerais/UFMG) e Dr. Alexandre Carlos Eduardo (Universidade Federal de São João del-Rei/UFESJ), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "**Mestre em Engenharia Mecânica**", na área de concentração de "**Projeto e Sistemas**".

Dissertação aprovada no dia 10 de setembro de 2021.



Documento assinado eletronicamente por **Eduardo Jose Lima II, Professor do Magistério Superior**, em 22/09/2021, às 10:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Antônio Eustáquio de Melo Pertence, Usuário Externo**, em 22/09/2021, às 16:55, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Alexandre Carlos Eduardo, Usuário Externo**, em 22/09/2021, às 19:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufmg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0968239** e o código CRC **159406F3**.

*Dedico este trabalho a todos que o usarão para o bem.*

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por me conceder saúde e sabedoria para seguir sempre em frente. Obrigado por ser a minha força e o meu guia em todos os momentos. A ti, Senhor, toda honra e toda a glória.

Aos meus pais, Teotônio e Marize. Vocês são inspiração, equilíbrio e porto seguro nos momentos de tribulação. Obrigado por ensinar os valores mais preciosos de um ser humano: a humildade, o amor e o respeito ao próximo. Vocês são a minha base!

A minha companheira Maria Elisa, pelo apoio e incentivo em todos os momentos da minha vida. Por acreditar em mim e não medir esforços para a concretização dos meus objetivos. Sem você, nada disso seria possível.

Ao meu orientador, o professor Eduardo José Lima II, que conduziu o trabalho com paciência e dedicação, estando sempre disponível para compartilhar todo o seu vasto conhecimento. Obrigado pela confiança no meu trabalho!

Ao Professor Marcelo Henrique Souza Bomfim e ao Engenheiro Mecânico Ramon de Paoli Mendes, pelo auxílio na construção do dispositivo e elaboração da presente dissertação. Sem a ajuda de vocês não seria possível a conclusão desse trabalho. Sou eternamente grato!

Agradeço aos membros da banca examinadora, pelo interesse e disponibilidade!

A todos meu muito obrigado!

*“Quem acredita sempre alcança!”*

Legião Urbana

## RESUMO

Atualmente, existe no mercado internacional a busca por processos mais econômicos, que ao mesmo tempo poluam menos o meio ambiente. Nesse contexto, surgem os atuadores pneumáticos, que se destacam principalmente no ambiente industrial por apresentarem vantagens significativas, quando comparados a outras tecnologias. Dentre eles, os Músculos pneumáticos artificiais de McKibben ganharam notoriedade nos últimos anos, por possuírem empregabilidade tanto em equipamentos industriais, como também em órteses para reabilitação e dispositivos robóticos humanoides. Tendo em vista os benefícios da tecnologia citada, o presente trabalho propõe a construção de um manipulador robótico atuado por músculos de McKibben e o desenvolvimento de um sistema de controle para o dispositivo projetado. Tanto na confecção do atuador quanto do músculo foram utilizados componentes convencionais e fáceis de serem encontrados no mercado, a fim do desenvolvimento de um sistema acessível, com facilidade para fabricação em larga escala. Por meio dos resultados obtidos, foi possível observar que o sistema atendeu às expectativas do projeto, apresentando resultados satisfatórios quando submetido a perturbações. Um outro ponto a ser citado é o fato de o dispositivo construído atender às exigências da norma ISO/TS 15066. Essa adequação permite que o manipulador desenvolvido possa ser utilizado pelo homem de forma segura.

Palavras-chave. Controle de posição. Manipulador robótico. Músculos pneumáticos artificiais. Músculo de McKibben. Controlador PID.

## ABSTRACT

Currently, there is a search in the international market for more economical processes, which at the same time pollute less the environment. In this context, pneumatic actuators emerge, which stand out mainly in the industrial environment to present important advantages when compared to other technologies. Among them, McKibben's Artificial Pneumatic Muscles have gained notoriety in recent years, for having employability both in industrial equipment, as well as in rehabilitation orthoses and humanoid robotic devices. In view of the benefits of the aforementioned technology, this work proposes the construction of a robotic manipulator actuated by McKibben muscles and the development of a control system for the designed device. Both in the making of the actuator and in the use of the components were used at low cost and easy to be found on the market, an end to the development of an accessible system, with ease for large-scale manufacturing. Through the results obtained, it was possible to observe that the system met the project expectations, satisfactory results when subjected to disturbances. Another point to be mentioned is the fact that the device was built to the requirements of the ISO / TS 15066 standard. This adequacy allows the developed manipulator to be used by man in a safe way.

**KeyWords.** Position Control. Robotic Manipulator. Pneumatic Artificial Muscles. McKibben Muscle. PID Controller.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Diagrama de um órtese atuada pelo músculo artificial de McKibben. ....	18
Figura 2- Retomada de alguns movimentos por meio do músculo de McKibben. ....	19
Figura 3– Dispositivo humanoide, órtese e prótese de reabilitação aplicando MAP ....	20
Figura 4- Robô AirBug e braço robótico industrial utilizando músculos de McKibben	20
Figura 5– Músculo pneumático FESTO. ....	21
Figura 6– Componentes básicos de um músculo de McKibben de baixo custo.....	22
Figura 7– Cenários de funcionamento do músculo .....	23
Figura 8– Elo e Junta. ....	24
Figura 9- Principais Tipos de Junta .....	24
Figura 10- Mecanismo de cadeia cinemática aberta e fechada. ....	25
Figura 11- Espaços utilizados para definir a pose de um mecanismo. ....	27
Figura 12-Manipulador planar de 2 GDL.....	28
Figura 13– Diagrama de Bloco do sistema.....	32
Figura 14- Dispositivo projetado para a utilização dos Músculos de McKibben.....	35
Figura 15-Detalhes do Dispositivo projetado.....	36
Figura 16– Célula de carga acoplada ao dispositivo .....	37
Figura 17-Mancal de Rolamento usado no dispositivo .....	38
Figura 18-Chapa utilizada para a confecção dos elos.....	38
Figura 19– Sistema de transmissão .....	39
Figura 20 –Construção do dispositivo .....	39
Figura 21 –Músculo Montado .....	41
Figura 22- Componente de fixação do músculo.....	42
Figura 23- Sistema projetado no Simulink.....	43
Figura 24– Bloco Cinemático Inverso.....	43
Figura 25-Bloco Cinemático Direto .....	44
Figura 26-Bloco Gravitacional .....	45
Figura 27-Bloco Cinemático inverso de atuador.....	45
Figura 28- Dispositivos usados.....	47
Figura 29-Fonte usada nos ensaios.....	47
Figura 30-Célula de carga e Amplificador HX711 .....	48

Figura 31-Dispositivos .....	48
Figura 32-Bancada de testes.....	49
Figura 33-Dinâmica do sistema construído .....	49
Figura 34-Manipulador pneumático com destaque para o anteparo de colisão .....	59

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1-Resposta da junta 1 .....	50
Gráfico 2-Resposta da junta 2 .....	51
Gráfico 3-Resposta da junta 1 em relação a perturbação .....	52
Gráfico 4-Resposta da junta 2 em relação a perturbação .....	52
Gráfico 5-Resposta da junta 1 .....	53
Gráfico 6-Resposta da junta 2 .....	53
Gráfico 7-Resposta da junta 1 a perturbação oscilatória .....	54
Gráfico 8-Resposta da junta 2 a perturbação oscilatória .....	54
Gráfico 9-Resposta da junta 1 a perturbação oscilatória .....	55
Gráfico 10-Resposta da junta 2 a perturbação oscilatória .....	55
Gráfico 11-Comparação resposta da junta 1 PI xPID.....	56
Gráfico 12-Comparação resposta da junta 2 PI xPID.....	56

## LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas

BLII- Método Bomfim e Lima II

CDA- Conversor Analógico Digital

EE- Erro Efetivo

GDL- Graus de Liberdade

ISO- *International Organization for Standardization*

MAE- Erro Absoluto Médio

MAP- Músculo Artificial Pneumático

MAPs- Músculos Artificiais Pneumáticos

MCIA- Modelo Cinemático Inverso de Atuadores

MDC- Modelo Cinemático Direto

MDI- Modelo Cinemático Inverso

MSE- Erro Quadrático Médio

PI- Proporcional e Integral

PID - Proporcional, Integral e Derivativo

PWM - *Pulse Width Modulation*

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	16
2. REVISÃO NA LITERATURA.....	18
2.1 O Músculo Artificial Pneumático .....	18
2.2 Construção mecânica do músculo.....	20
2.3 Aspectos construtivos .....	21
2.4 Princípio de funcionamento .....	22
2.5 Cinemática Do Manipulador.....	23
2.5.1 Elo e Junta .....	23
2.5.2 Graus de liberdade.....	24
2.5.3 Classificação dos mecanismos .....	25
2.5.4 Análise cinemática .....	25
2.6 Metodologia BLII .....	27
2.7 Modelagem do sistema .....	28
2.7.1 Modelamento cinemático direto.....	28
2.7.2 Modelamento cinemático inverso .....	29
2.7.3 Modelamento dinâmico .....	29
2.7.4 Modelamento cinemático inverso do atuador .....	31
2.7.5 Controlador de posição.....	31
2.7.6 Diagrama de bloco do sistema .....	31
2.8 Controlador PID.....	32
2.9 Sintonia de um controlador PID: Método Ziegler- Nichols.....	32
2.9.1 Segundo método.....	33
2.10 Norma ISO/TS 15066 .....	33
3. METODOLOGIA PROPOSTA E MATERIAIS UTILIZADOS .....	34

3.1	Metodologia .....	34
3.2	Manipulador Robótico .....	34
3.2.1	Projeto do manipulador .....	34
3.3	Construção do manipulador .....	37
3.4	Construção do músculo.....	40
3.5	Desenvolvimento do sistema de controle no Simulink ®.....	42
3.5.1	Bloco cinemático Inverso.....	43
3.5.2	Bloco cinemático Direto.....	44
3.5.3	Bloco Dinâmico (Gravitacional).....	44
3.5.4	Bloco Cinemático inverso de atuador .....	45
3.5.5	Controlador.....	46
3.6	Materiais utilizados na bancada experimental. ....	46
3.6.1	Válvula e Lubrefil .....	46
3.6.2	Fonte PMI 30030.....	47
3.6.3	Célula de carga e Módulo Conversor Amplificador HX711.....	47
3.6.4	Arduino Due e Encoder incremental Rotativo .....	48
3.7	Montagem da bancada experimental .....	49
4.	RESULTADOS .....	50
4.1	Resultados Gráficos .....	50
4.1.2	Testes sem carga com perturbação física .....	51
4.1.3	Testes com carga sem perturbação física .....	52
4.1.4	Testes de Perturbação Senoidal (Frequência de 0,1 Rad/Seg) .....	53
4.1.5	Testes de Perturbação Senoidal (Frequência de 1 Rad/Seg).....	54
4.1.6	Comparação PI x PID.....	56
4.1.7	Análise de Erro PI x PID.....	57
4.2	Análise dos Resultados Gráficos .....	57
4.3	Interação segura homem-robô utilizando a norma ISO/TS 15066 .....	58

4.3.1	Adequação em relação a força .....	59
4.3.2	Adequação do dispositivo em relação a pressão .....	59
4.3.3	Adequação do dispositivo em relação a energia .....	60
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS E DIREÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	60
5.1	Considerações finais .....	60
5.2	Proposta para trabalhos futuros.....	61
6.	REFERÊNCIAS .....	63

## 1. INTRODUÇÃO

A utilização de atuadores pneumáticos aumentou gradativamente nos últimos tempos, especialmente no ambiente industrial (VALDIERO *et al.*,2011). Tal cenário se deve principalmente ao fato de a tecnologia pneumática possuir significativos benefícios, quando comparada com outros sistemas. Dentre eles, podemos destacar: baixo custo, facilidade e rapidez de manutenção, boa relação peso/potência e rapidez de resposta (TONDU,2012).

Nesse contexto, os Músculos artificiais pneumáticos (MAPs) de McKibben surgem como uma alternativa para o acionamento dos atuadores pneumáticos. Seu objetivo é a conversão da pressão em força e deslocamento linear, sendo que a pressão interna é obtida por meio do ar comprimido. Os músculos são confeccionados em material não condutor, acarretando na inexistência de faíscas durante o seu funcionamento, possibilitando, dessa maneira, a sua utilização em ambientes que contêm produtos inflamáveis (CHOU; HANNAFORD,1994).

A manutenção dos Músculos de McKibben é realizada com simplicidade e rapidez, pois o músculo é acoplado ao sistema por meio de conexões do tipo engate. Desse modo, caso haja um defeito no dispositivo, basta desconectar o item defeituoso e conectar um novo. Sendo assim, o próprio operador do mecanismo pode efetuar a substituição, dispensando o uso de mão de obra especializada, reduzindo os custos do processo de manutenção e minimizando o tempo de parada do dispositivo (SCOFANO,2006).

Cabe salientar que o fluido de acionamento das MAPs é o ar comprimido, muito mais leve, mais barato e não causador de impactos ambientais, quando comparado com os fluidos hidráulicos (TAVAKOLI,2008). Além disso, o gás utilizado não é inflamável, o que evita o risco de incêndio ou explosão e torna a tecnologia em questão mais segura (SCOFANO,2006).

Nessa perspectiva, outro ponto a ser destacado é o fato de que o ar comprimido não necessita de descarte especializado após utilização, como acontece com o fluido

hidráulico. Tal situação acarreta também na vantagem da redução de custos no processo (PRADIPTA *et al.*,2013).

Nesse sentido, os benefícios citados anteriormente impulsionaram um aumento nas pesquisas envolvendo os MAPs, especialmente o de McKibben. Além da aplicação industrial, esses também podem ser utilizados na confecção de dispositivos biomecânicos, como as órteses de reabilitação, dada a semelhança dos músculos de McKibben com os músculos humanos (SCOFANO,2006).

Atualmente, dada a escassez de recursos, há uma busca incessante por processos mais eficientes, econômicos e que não causem impactos ambientais (PRADIPTA *et al.*,2013). Haja vista essa tendência, as pesquisas em atuadores pneumáticos aumentaram exponencialmente ao decorrer dos anos. Nesse contexto, optou-se por utilizar no presente trabalho os MAPs de McKibben. Tal motivação ocorre em função de o atuador de McKibben possuir baixo custo relativo de aquisição e manutenção (quando comparado aos elétricos e ao hidráulico), não causar impactos significativos ao meio ambiente (pelo fato de ser acionado por ar comprimido), possuir uma alta relação potência/peso, além dos outros benefícios citados nos parágrafos anteriores (TONDU,2000). Outro ponto preponderante para a escolha do tema é o fato de que os MAPs de McKibben são muito versáteis, podendo ser empregados em uma gama de aplicações, que vão desde atuadores em órteses, próteses, robôs domésticos e comerciais, até atuadores industriais (SCAFF, 2015).

Sendo assim, o objetivo geral do presente trabalho é a construção de um manipulador robótico atuado por músculos de McKibben, com a utilização de componentes convencionais, de fácil aquisição e sem a necessidade de processos industriais. Tais aspectos propiciam a construção de um dispositivo acessível e que possa ser facilmente manufaturado.

Já o objetivo específico do trabalho é composto pelas seguintes etapas: Projeto do manipulador, por meio do software Solidworks®; Construção do manipulador e dos Músculos utilizando componentes de baixo custo; Desenvolvimento do Sistema de Controle, por meio do software Simulink ® e realização dos ensaios para validar o dispositivo. Assim, com a utilização da metodologia proposta é possível a construção de um dispositivo eficiente, barato, de fácil fabricação e manutenção.

## 2. REVISÃO NA LITERATURA

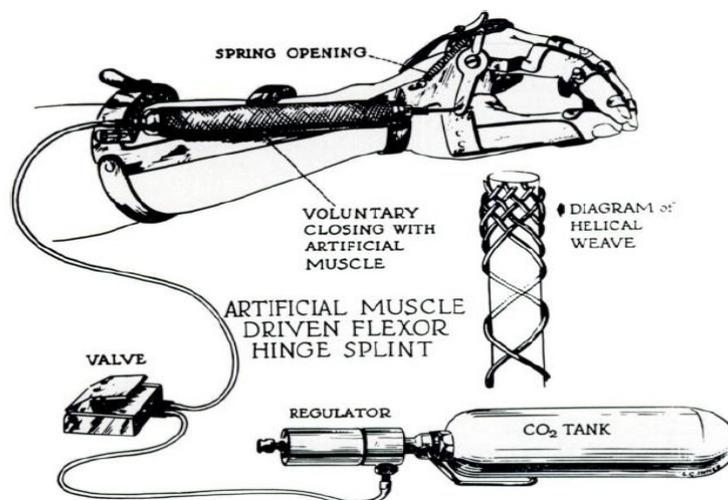
### 2.1 O Músculo Artificial Pneumático

Os Músculos artificiais pneumáticos (MAPs) foram inicialmente desenvolvidos como dispositivos de órteses para pacientes com poliomielite (SCHULTE e PEARSON, 1961). Idealizado e construído pelo físico nuclear Dr. Joseph Laws McKibben em 1956, seu principal objetivo foi propiciar uma melhora na qualidade de vida de sua filha, que sofria de poliomielite. Por conta dessa enfermidade, a jovem possuía movimentos limitados nos dedos de seus membros superiores.

O músculo inicialmente proposto por McKibben era composto por um tubo de látex envolvido por uma malha, formando assim, uma prótese de baixo custo. Os MAPs que apresentam funcionamentos análogos ao do físico em questão, recebem o nome de músculos de McKibben. (NICKEL *et al.*, 1963).

O dispositivo desenvolvido por McKibben era composto por um cilindro de dióxido de carbono conectado a uma válvula, utilizada para a pressurização do músculo. Quando acionado, o dispositivo realizava o movimento de abertura e fechamento da mão do paciente, proporcionando o movimento de pinça. A Figura 1 demonstra a sistematização do mecanismo (NICKEL *et al.*, 1963).

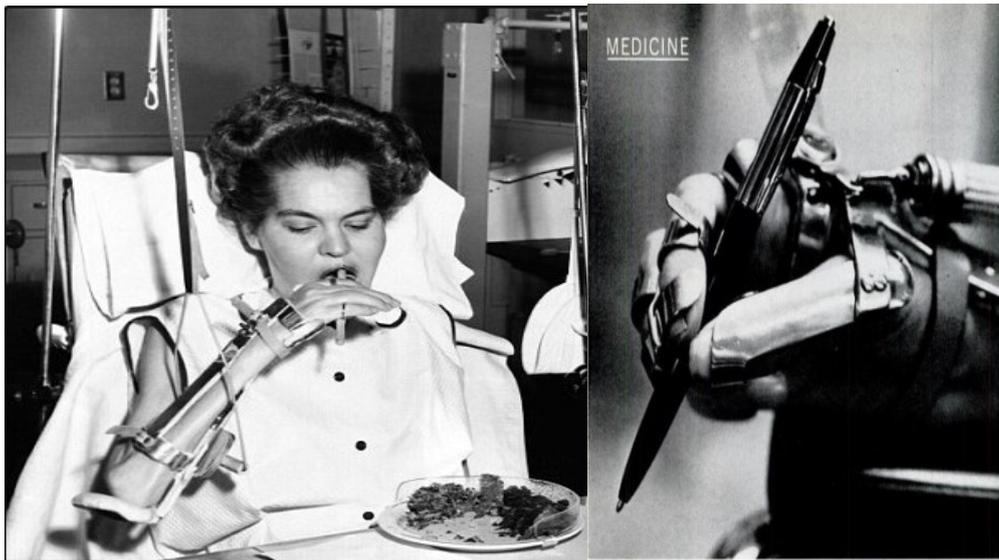
Figura 1– Diagrama de um órtese atuada pelo músculo artificial de McKibben.



Fonte: NICKEL *et al.*, 1963.

A órtese confeccionada por McKibben proporcionou uma melhoria na qualidade de vida das pessoas que sofriam de poliomielite. Por meio do dispositivo, elas conseguiram retomar a realização de algumas funções, tais como: escovar os dentes, se alimentar sem o auxílio de um terceiro, utilizar a máquina de escrever, dentre outras. Nesse sentido, a Figura 2 explicita a retomada de algumas dessas atividades, por meio do dispositivo proposto por McKibben.

Figura 2- Retomada de alguns movimentos de pacientes com poliomielite, por meio da utilização da órtese do Dr. McKibben. a) paciente se alimentando e b) segurando uma caneta.



a)

b)

Fonte: La Tecnica Illustrata, 1960.

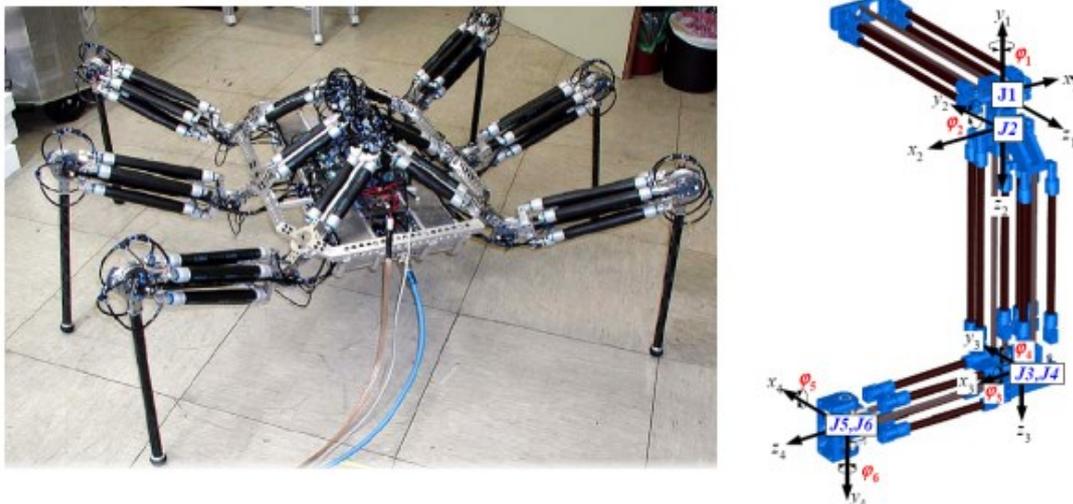
Nessa lógica, os atuadores pneumáticos têm um papel cada vez mais importante na robótica, sendo que os dispositivos semelhantes aos de McKibben, movidos a MPAs, evoluíram ao longo das últimas décadas e são amplamente utilizados. Essas aplicações vão desde equipamentos industriais até órteses para reabilitação e dispositivos robóticos humanoides (CUI ,2021; SAWICKI, 2005). As Figuras 3 e 4 explicitam algumas aplicações dos MAPs. A Figura 3 apresenta um dispositivo humanoide, uma órtese e uma prótese de reabilitação, já a Figura 4 ilustra um robô *AirBug* e um braço robótico industrial, atuados por músculos de McKibben.

Figura 3– Dispositivo humanoide, órtese e prótese de reabilitação aplicando MAP



Fonte: Scofano,2006; Sawicki,2005

Figura 4- Robô *AirBug* e um braço robótico industrial utilizando músculos de McKibben.



Fonte: Scofano,2006

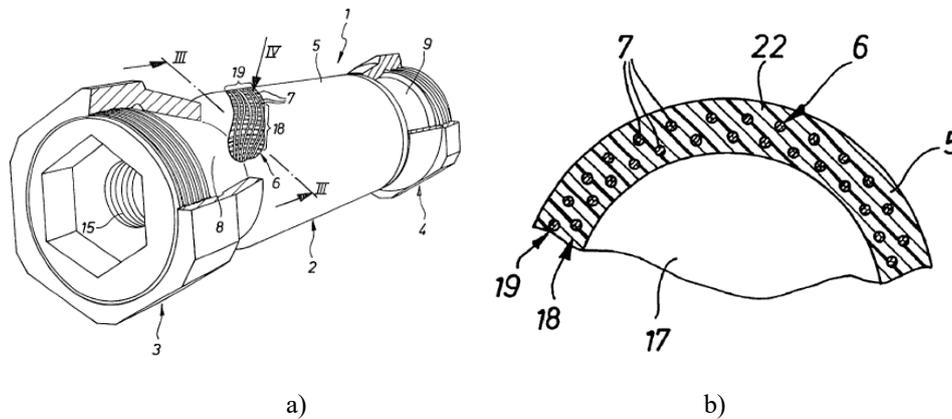
## 2.2 Construção mecânica do músculo

O campo de aplicação dos músculos está crescendo ao longo dos anos, sendo o seu uso cada vez mais difundido. Tal expansão é resultante dos seus maiores benefícios, quando comparados com outros atuadores, como por exemplo, o elétrico e hidráulico. Dentre suas vantagens pode-se citar: Baixo custo de aquisição, facilidade e rapidez de manutenção, boa relação peso/potência e rapidez de resposta.

Como consequência da elevação da aplicação desse dispositivo, no ano de 2002, Bergemann *et al.* (2002) desenvolveu em parceria com a empresa FESTO, uma patente de um músculo com funcionamento análogo ao de McKibben. O músculo em questão

possui alta resistência mecânica e resistência a fadiga, que são vantagens provenientes do fato de a malha externa estar situada dentro da membrana de látex. Por conta dessas características, tal mecanismo é largamente empregado em aplicações industriais e de pesquisa científica (BOMFIM,2021). A Figura 5 a representa o músculo desenvolvido pela empresa FESTO e a 5 b ilustra a membrana dentro do tubo de látex.

Figura 5– Músculo pneumático FESTO: a) principais componentes e b) secção transversal.



Fonte: BERGEMANN *et al.*, 2002.

### 2.3 Aspectos construtivos

Os músculos da FESTO têm um bom desempenho, entretanto, possuem um significativo custo médio, o que o torna inviável para algumas aplicações. Assim, em razão da simplicidade na confecção, baixo custo dos componentes e a facilidade para encontrar tais itens, muitos indivíduos optam pela construção do músculo. Para sua fabricação são necessárias uma membrana de látex, uma malha helicoidal trançada, engates para passagem do ar comprimido e fixadores para unirem os componentes.

A dinâmica da construção é bem simples e consiste basicamente em envolver a malha helicoidal na membrana de látex, conectando os engates (responsáveis por permitir a passagem do ar comprimido dentro da membrana) nas extremidades. Os fixadores têm a função de unir o conjunto e impedir o escoamento do ar pelas extremidades.

Utilizando essa sistemática de construção, o custo médio gira em torno de R\$ 5,00 por músculo (SCAFF, 2015). A Figura 6 mostra os componentes básicos utilizados para a confecção.

Figura 6– Componentes básicos de um músculo de McKibben de baixo custo.



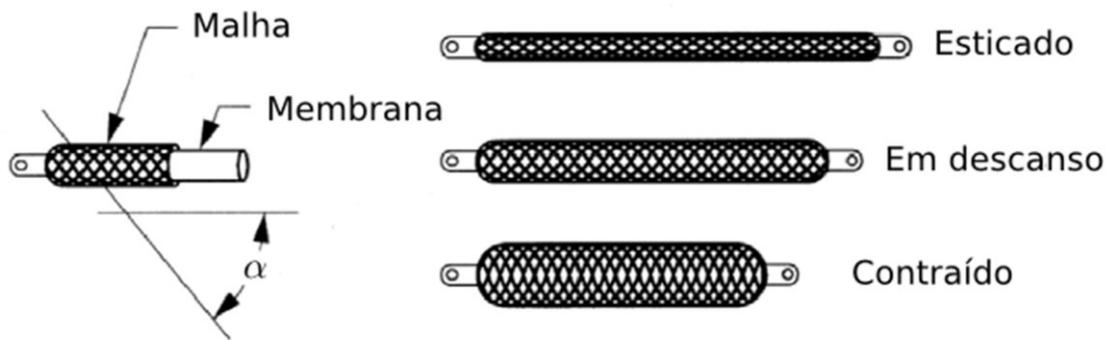
Fonte: SCAFF, 2015.

Caso haja a necessidade da utilização dos músculos em ambientes com elevado campo magnético, os engates podem ser confeccionados com materiais poliméricos, utilizando para fixação a fita Herman (constituída de Nylon). Essa alternativa amplia o leque de aplicações do atuador (SCAFF, 2015).

#### 2.4 Princípio de funcionamento

O princípio de funcionamento do músculo de McKibben é bem simples. Ao ser pressurizado com ar comprimido o músculo infla e se expande, causando uma contração no sentido axial e um aumento em seu diâmetro. Durante o processo, a malha helicoidal tende a reduzir seu comprimento axial. Esse ciclo propicia a expansão e contração do músculo, atribuindo mobilidade ao atuador no qual o sistema está inserido (SCAFF, 2015). A Figura 7 exemplifica o músculo e os seus cenários de funcionamento em operação.

Figura 7– Cenários de funcionamento do músculo



Fonte: SCAFF, 2015.

Por meio da figura acima é possível analisar que conforme o músculo muda seu comportamento, o ângulo dos fios da malha ( $\alpha$ ) também sofre mudanças, aumentando à medida que o músculo é pressurizado. Segundo Chou e Hannaford (1996), o comprimento do músculo durante o ciclo varia entre 0,75 e 1,1 de seu comprimento inicial.

## 2.5 Cinemática Do Manipulador

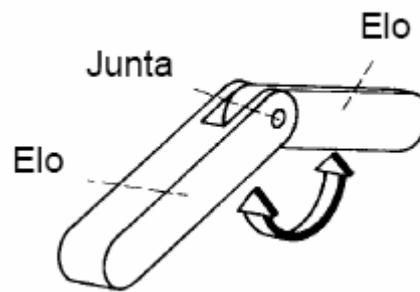
A cinemática é a área responsável pelo estudo do movimento dos corpos, desconsiderando as forças que atuam sobre o sistema (NORTON, 2010). Esse ramo da ciência estuda as equações que descrevem a posição, a velocidade e a aceleração de corpos.

Alguns conceitos devem ser considerados para o desenvolvimento de um modelo cinemático de um manipulador robótico, dentre os quais podemos citar: Elo, Junta e Graus de Liberdade (CABRAL,2009).

### 2.5.1 Elo e Junta

O elo é um corpo rígido, que idealmente não sofre deformação quando se aplicam forças sobre ele. São responsáveis por constituir a estrutura do mecanismo e definir a relação entre duas juntas adjacentes. A Figura 8 ilustra o mecanismo citado anteriormente.

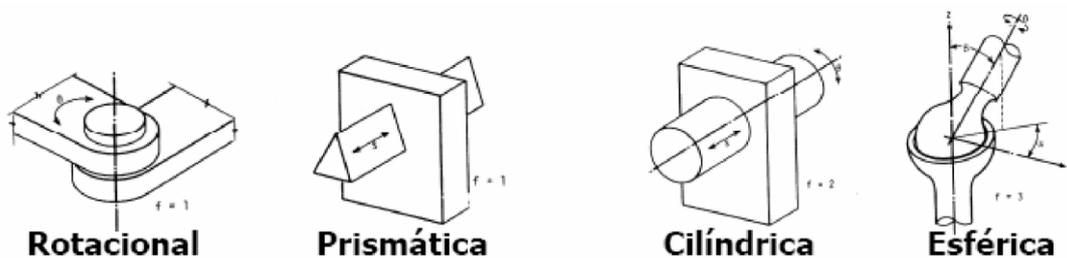
Figura 8– Elo e Junta.



Fonte:Pimenta,2009.

As juntas ou articulações têm a função de conectar elos, além de permitir e/ou restringir determinados tipos de movimentos. A Figura 9 ilustra os principais tipos de junta.

Figura 9- Principais Tipos de Junta



Fonte:Pimenta,2009.

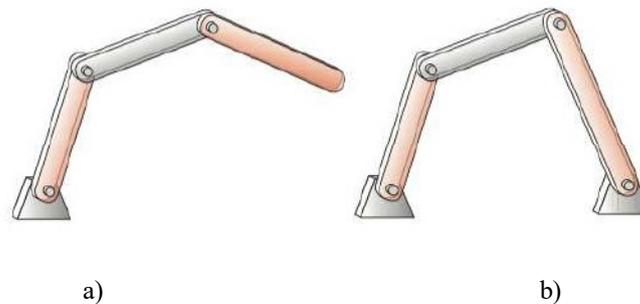
### 2.5.2 Graus de liberdade

O conceito de graus de liberdade (GDL) está atrelado ao número de variáveis de posição independentes do sistema, necessárias para a configuração espacial do mecanismo (NORTON, 2010). Como exemplo, a junta rotacional explicitada na Figura 9 é composta por dois elos, unidos por uma junta que só permite o movimento de rotação em um eixo. Sendo assim, é necessário conhecer apenas o ângulo de rotação de um eixo para representação do sistema, ou seja, o mecanismo em questão possui apenas 1 grau de liberdade. Contudo, se a mesma análise for realizada na junta esférica, pode se observar o movimento de rotação em três eixos. Dessa forma, para análise do sistema seria necessário o conhecimento de três ângulos de rotação, propiciando ao sistema 3 graus de liberdade (CABRAL,2009).

### 2.5.3 Classificação dos mecanismos

Os mecanismos são classificados de acordo com sua cadeia cinemática, que pode ser aberta ou fechada. Os mecanismos de cadeia cinemática aberta apresentam a característica de possuírem, normalmente, um elo aterrado. Já os mecanismos de cadeia fechada possuem dois ou mais elos aterrados (BOMFIM,2021). Os dois sistemas citados estão explicados na Figura 10:

Figura 10– a) mecanismo de cadeia cinemática aberta e b) fechada.



Fonte: Bomfim, 2021.

Tratando-se de mobilidade, o mecanismo de cadeia fechada possui uma restrição maior de movimentos, quando comparado ao mecanismo de cadeia aberta. Entretanto, o mecanismo de cadeia fechada possui uma maior rigidez.

### 2.5.4 Análise cinemática

A análise cinemática de um sistema pode ser executada normalmente usando geometria analítica ou álgebra linear. Já o estudo de mecanismos com pouca mobilidade pode ser realizado facilmente utilizando geometria analítica. Contudo, à medida em que se aumentam os graus de liberdade do sistema, a análise por meio da geometria analítica se torna complexa. Nesse caso é pertinente a utilização de procedimentos que unam a geometria analítica e a álgebra linear (BOMFIM, 2021).

Segundo Lima II (2006), a definição do posicionamento do manipulador e do seu efetuator ocorrem de três modos distintos, sendo eles:

1. Espaço Cartesiano ( $P(t)$ );
2. Espaço de Juntas ( $q(t)$ );
3. Espaço de Atuadores ( $A(t)$ ).

O espaço que utiliza o sistema cartesiano de coordenadas para determinar a posição e a orientação do efetuador é denominado de cartesiano ou de tarefas. O espaço de tarefa é responsável por determinar a quantidade de GDL necessária ao manipulador para desempenhar uma tarefa específica. O Espaço Cartesiano possui três GDL, que são os eixos x, y e z. O Espaço Cartesiano é definido por:  $P(t) = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$  (BOMFIM, 2021).

Já o Espaço de Juntas ou Espaço de configurações é responsável por definir a pose do mecanismo, utilizando para tal o conjunto de variáveis de deslocamento das juntas. A classificação dos mecanismos quanto à mobilidade é dada em função da quantidade de GDL que ele possui. Os sistemas com menos de seis GDL são chamados de subatuados, já os que possuem exatamente seis GDL são nomeados de completamente atuados e, finalmente, as configurações que possuem mais de seis GDL são denominadas redundantes. O Espaço de Configurações é definido por:  $q(t) = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$  (BOMFIM, 2021). Por fim, o Espaço de Atuadores é responsável pela definição dos movimentos a serem realizados pelos atuadores. Sua definição é dada por:  $A(t) = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ .

O modelo cinemático direto (MCD) ou cinemática direta de um sistema composto por juntas é representado no espaço de tarefas por uma função que mapeia o vetor  $q$  (BOMFIM, 2021). O modelo em questão utiliza o ângulo das juntas como parâmetro de entrada e o vetor de pose ( $X$ ) como parâmetro de saída. A Equação 1 define o MCD.

$$X = f(q) \tag{1}$$

Tratando-se do modelo cinemático inverso (MCI) ou cinemática inversa, pode se afirmar que esse modelamento define uma função que mapeia o vetor pose ( $X$ ) no Espaço de configurações. O MCI tem como parâmetro de entrada o vetor de pose e o vetor de configurações como parâmetro de saída (BOMFIM, 2021). A Equação 2 define o MCI.

$$q = f(X) \tag{2}$$

O modelo cinemático de atuadores ou cinemática direta de atuadores é representado por uma função que mapeia o vetor  $A \in R^n$  (Equação 3) no espaço de Configurações. No modelo em questão, o parâmetro de entrada pode ser representado, por exemplo, pelos

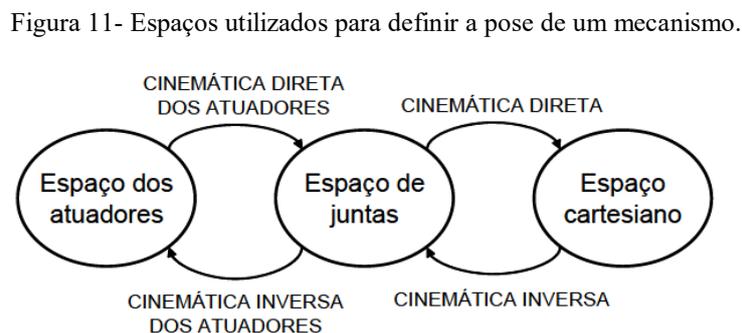
pulsos enviados a um sistema motor elétrico e o vetor de configurações representa o parâmetro de saída.

$$q = f(A) \quad (3)$$

Finalmente, há o modelo cinemático inverso de atuadores (MCIA) ou cinemática inversa dos atuadores. Esse modelo é responsável por mapear o vetor ( $q$ ) no espaço de atuadores. A equação 4 representa o MCIA.

$$A = f(q) \quad (4)$$

A Figura 11 ilustra a relação entre os modelos e os espaços utilizados para definir a pose de um mecanismo.



Fonte: Lima II, 2006.

## 2.6 Metodologia BLII

Os músculos pneumáticos possuem inúmeras vantagens, como o explicitado anteriormente. Todavia, tais dispositivos apresentam um contratempo em sua utilização, devido ao seu complexo modelamento fenomenológico (BOMFIM, 2019).

Em função disso, Bomfim e Lima (2019), desenvolveram uma metodologia para a caracterização estática e dinâmica do músculo de McKibben, operando em uma junta robótica. Essa metodologia foi intitulada de Método Bomfim e Lima II (BLII). O método BLII consiste em levantar o modelo estático da junta, utilizando regressão linear múltipla, por meio do método de mínimos quadrados (BOMFIM, 2019).

Tendo em vista que a pressão do sistema é definida em função da força do efetuator e ângulo de deslocamento da junta, obteve-se empiricamente uma expressão para o cálculo da pressão na junta. A equação 5 representa essa correlação.

$$P(F, \theta) = 0,6654 + 0,3814F + 0,0654\theta \quad (5)$$

Onde:

$P$ : Pressão na junta

$F$ : Força do efetuator

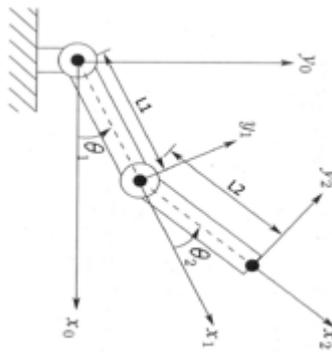
$\theta$ : Ângulo da junta

Bomfim e Lima (2019), obtiveram um coeficiente de correlação superior a 0,97 na utilização da regressão linear múltipla.

## 2.7 Modelagem do sistema

Para a modelagem do sistema foram utilizados as coordenadas ilustradas na Figura 12. A Figura 12 apresenta um esboço genérico do manipulador, representando os dois elos móveis.

Figura 12-Manipulador planar de 2GDL



Fonte: Bomfim, 2021.

### 2.7.1 Modelamento cinemático direto

O modelamento cinemático direto consiste na definição do ponto de alcance em função dos parâmetros do atuador. Em Bomfim (2021) são definidas as relações para o cálculo da modelagem cinemática direta. As equações 6 e 7 representam o modelo cinemático das juntas 1 e 2 respectivamente e são definidas com a aplicação de relações trigonométricas.

$$P_x = L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos (\theta_1 + \theta_2) \quad (6)$$

$$P_y = L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin (\theta_1 + \theta_2) \quad (7)$$

Onde:

$(P_y, P_x)$  São as coordenadas cartesianas do alcance do atuador

### 2.7.2 Modelamento cinemático inverso

O modelamento cinemático inverso foi utilizado para se obter os ângulos das juntas dos atuadores ( $\theta_1$  e  $\theta_2$ ) e foi obtido tomando como base os parâmetros do manipulador, utilizando a lei dos cossenos e a identidade trigonométrica. Por meio dos procedimentos descritos, Bomfim (2021) chegou à equação 8 para o cálculo de  $\theta_2$ :

$$\theta_2 = \text{atan2}(D, \pm\sqrt{1 - D^2}) \quad (8)$$

O valor de D, é dado pela Equação 9:

$$D = \frac{P_x^2 + P_y^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1L_2} \quad (9)$$

Por meio de relações trigonométricas, é possível obter o valor de  $\theta_1$ , conforme apresentado na Equação 10:

$$\theta_1 = \text{atan2}(P_y, P_x) - \text{atan2}(L_2 \sin \theta_2, L_1 + L_2 \cos \theta_2) \quad (10)$$

### 2.7.3 Modelamento dinâmico

Esse modelo consiste em um mecanismo de equações formuladas com o objetivo de obtenção dos torques, nos quais as juntas estão submetidas por meio dos parâmetros de velocidades e acelerações. Existem duas formas de se obter o modelo: por meio da Mecânica Clássica Newtoniana ou por meio da utilização das equações de Euler-Lagrange (BOMFIM,2021).

Bomfim (2021), definiu as equações 11 e 12 para o cálculo dos torques nas juntas 1 e 2, respectivamente.

$$\tau_1 = d_{11}\ddot{\theta}_1 + d_{12}\ddot{\theta}_2 + C_{121}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + C_{211}\dot{\theta}_2\dot{\theta}_1 + C_{221}\dot{\theta}_2^2 + g_1 \quad (11)$$

$$\tau_2 = d_{21}\ddot{\theta}_1 + d_{22}\ddot{\theta}_2 + C_{112}\dot{\theta}_1^2 + g_2 \quad (12)$$

Os termos dos efeitos gravitacionais ( $g_1$  e  $g_2$ ) das juntas estão representados nas Equações 13 e 14:

$$g_1 = \frac{\partial P}{\partial \theta_1} = (m_1 L_{c1} + m_2 L_1) g \text{sen } \theta_1 + m_2 L_{c2} \text{sen} (\theta_1 + \theta_2) \quad (13)$$

$$g_2 = \frac{\partial P}{\partial \theta_2} = m_2 L_{c2} g \text{sen} (\theta_1 + \theta_2) \quad (14)$$

No presente estudo, considerou-se as velocidades e acelerações das juntas nulas. Com isso, as Equações 11 e 12 podem ser reescritas por meio das equações 15 e 16, respectivamente.

$$\tau_1 = g_1 \quad (15)$$

$$\tau_2 = g_2 \quad (16)$$

O torque na junta é dado pela Equação 17:

$$\tau = \| F \| \cdot \| r_j \| \cdot \text{sen } \alpha \quad (17)$$

Onde:

$r_j$  : é o Raio de junta do atuador

$\alpha$  : é o Angulo entre a Força e o Raio da junta.

Haja vista que o ângulo formado entre a força e o raio da junta  $\alpha = 90^\circ$ , a força na junta é dada pela equação 18:

$$F = \frac{\tau}{r_j} \quad (18)$$

#### 2.7.4 Modelamento cinemático inverso do atuador

O modelamento cinemático inverso do atuador consiste em um método para a caracterização das juntas robóticas. Para tal, optou-se pela utilização do método BLII, que consiste em um conjunto de procedimentos para prever o comportamento fenomenológico do músculo de McKibben.

Por meio da aplicação do método BLII, Bomfim e Lima II obtiveram empiricamente uma equação para calcular a pressão de acionamento necessária no atuador em função da força e do ângulo das juntas (Equação 5). As equações 19 e 20, representam as pressões de acionamento das juntas ( $P_1$  e  $P_2$ ), utilizando o método citado.

$$P_1(F_1, \theta_1) = 0,6654 + 0,3814F_1 + 0,0654 \theta_1 \quad (19)$$

$$P_2(F_2, \theta_2) = 0,6654 + 0,3814F_2 + 0,0654 \theta_2 \quad (20)$$

#### 2.7.5 Controlador de posição

A dinâmica do erro de posição é dada pela Equação 21:

$$\tilde{x} = x_d - x \quad (21)$$

Onde:

$\tilde{x}$  : é o erro da posição do mecanismo

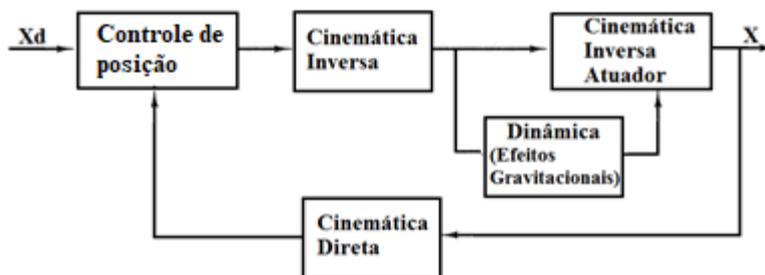
$x_d$  : é a posição desejada

$x$  : é a posição medida.

#### 2.7.6 Diagrama de bloco do sistema

A Figura 13 representa o diagrama de bloco do sistema estudado nesse trabalho.

Figura 13– Diagrama de Bloco do sistema



Fonte: Autoria própria

O controle de posição do sistema ilustrado na figura acima se dá por meio de um controlador do tipo PID, conforme explicitado na sessão a seguir.

## 2.8 Controlador PID

Na atualidade, os controladores do tipo PID ou PID modificado são aplicados na maioria dos sistemas industriais. Isso se deve principalmente pela sua vasta aplicabilidade com a maioria dos sistemas de controle, especialmente quando não há informações a respeito do modelo matemático da planta e os métodos analíticos tradicionais não podem ser empregados (OGATA, 2011). O controlador PID se baseia em três ações de controle: a ação proporcional, a ação integral e ação derivativa.

A ação de controle proporcional é a fração responsável por reduzir o erro de regime permanente, já a ação de controle integral está relacionada com a melhoria da precisão da resposta do sistema em relação ao erro em regime permanente. Finalmente, a ação de controle derivativo proporciona ao sistema uma rápida resposta. Sua principal contribuição se dá pelo fato de o controlador iniciar uma ação corretiva antecipada do erro, antes que ele se torne muito elevado (OGATA, 2011).

Desse modo, a combinação das ações de controle proporcional, integral e derivativo compõem o controlador PID. Tal associação possibilita ao controlador PID angariar as vantagens de cada um de seus componentes (OGATA, 2011).

## 2.9 Sintonia de um controlador PID: Método Ziegler- Nichols

Quando a planta possui uma modelagem matemática muito complexa, dificultando a obtenção de seu modelo, deve-se recorrer aos métodos experimentais de sintonia de controladores PID. Dentre os modelos existentes para tal finalidade, existem o modelo de

Ziegler e Nichols, que consiste em conjunto de procedimentos para determinar os valores do ganho proporcional  $K_p$ , do tempo integral  $T_i$  e do tempo derivativo  $T_d$ . (OGATA, 2011).

Ziegler e Nichols propuseram dois métodos para a obtenção da sintonia do controlador, no presente trabalho será utilizado o segundo método ou método do ganho crítico.

### 2.9.1 Segundo método

O segundo método de sintonia de Ziegler Nichols, também conhecido como método do ganho crítico, utiliza apenas um ganho proporcional ( $K_p$ ). Consiste basicamente em elevar o valor do ganho proporcional até um ganho crítico, denominado  $K_{cr}$ , até que a saída do sistema apresente uma resposta oscilatória sustentada. Caso a resposta do sistema não apresente uma oscilação quando o valor crítico do ganho proporcional for alcançado, esse método não é recomendado (OGATA 2011).

### 2.10 Norma ISO/TS 15066

A interação entre homem e máquina cresceu gradativamente ao longo do tempo. Por conta disso, surgiu a necessidade da criação de uma norma para garantir a segurança dessa interação (ROSENSTRAUCH,2021). Em 2016 foi criada a norma ISO/TS 15066, que define limites de segurança para a força, pressão e energia de interação. Tais parâmetros estabelecidos têm por finalidade evitar a ocorrência de acidentes, originados por meio do contato do homem com a máquina.

Para que o dispositivo seja considerado seguro, a norma ISO/TS 15066 definiu valores máximos durante uma colisão de força, pressão e energia, sendo 140 N, 200 N/cm<sup>2</sup> e 0,49 J, respectivamente (ROSENSTRAUCH,2021).

Para o cálculo da força de colisão, Bomfim (2021) propôs uma correlação (Equação 22), que foi obtida fixando um anteparo de colisão ao dispositivo e avaliando o comportamento do manipulador durante os ensaios de colisão, à medida que a pressão dos músculos e a posição do anteparo eram variados.

Por meio de um modelo em regressão linear múltipla, o referido autor obteve a Equação 22 para o cálculo da força de colisão. Cabe salientar que essa expressão possui um coeficiente de correlação igual a 0,9772.

$$F_{colisão} = -1.1466 + 0.4982 P_{Junta 1} + 0.8814 P_{Junta 2} - 45.30\theta_1 - 4.18\theta_2 \quad (22)$$

Onde:

$P_{Junta 1}$  e  $P_{Junta 2}$ : São as pressões (em bar), nas juntas 1 e 2 respectivamente.

$\theta_1$  e  $\theta_2$ : São os ângulos (em radianos) das juntas 1 e 2 respectivamente.

### **3. METODOLOGIA PROPOSTA E MATERIAIS UTILIZADOS**

Esse capítulo tem por finalidade apresentar a metodologia utilizada no desenvolvimento do trabalho, bem como os materiais e os equipamentos utilizados nos experimentos.

#### **3.1 Metodologia**

A metodologia proposta pode ser dividida em quatro macro etapas, sendo essas:

1. Projeto do manipulador;
2. Construção do Manipulador e dos Músculos;
3. Desenvolvimento do Sistema de Controle no Simulink ®;
4. Montagem da bancada experimental e Realização dos ensaios.

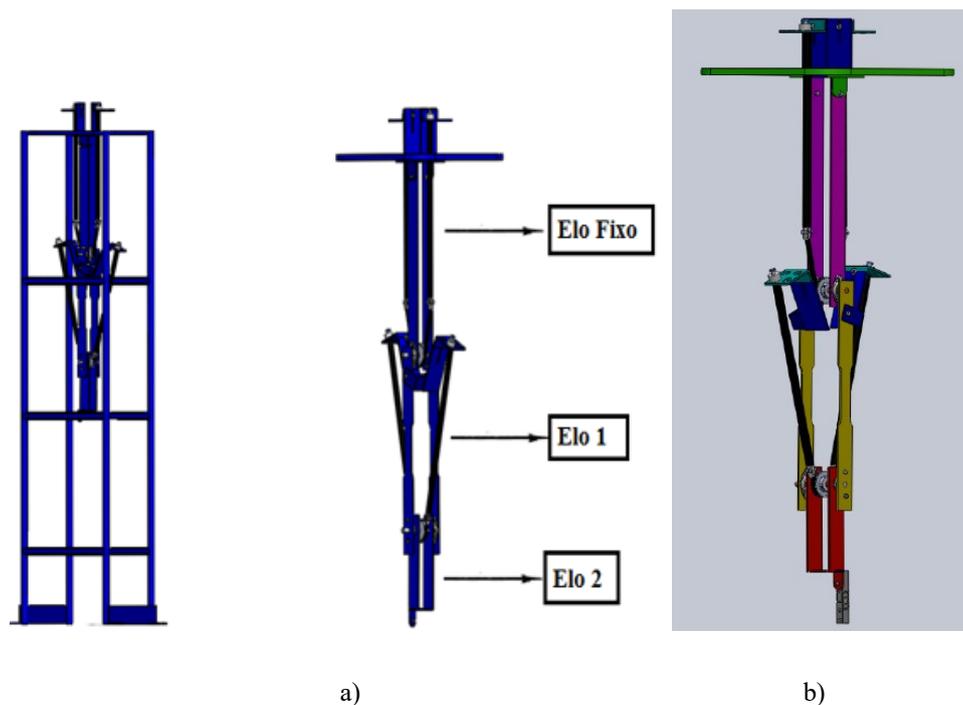
#### **3.2 Manipulador Robótico**

O presente trabalho se baseia na concepção do projeto propriamente dita, os cálculos, bem como a análise estrutural foram suprimidas, haja vista que não são o foco da pesquisa e não interferem em seu objetivo geral.

##### **3.2.1 Projeto do manipulador**

Para a utilização do músculo foi desenvolvido um manipulador, projetado por meio do software Solidworks®. O dispositivo conta com três elos, sendo um fixo e dois móveis, conferindo ao sistema dois graus de liberdade. A Figura 14a ilustra o manipulador completo, já a Figura 14b demonstra o braço desse manipulador, ressaltando com cores distintas, seus componentes.

Figura 14- Dispositivo projetado para a utilização dos Músculos de McKibben a) Dispositivo completo e  
b) Braço do manipulador

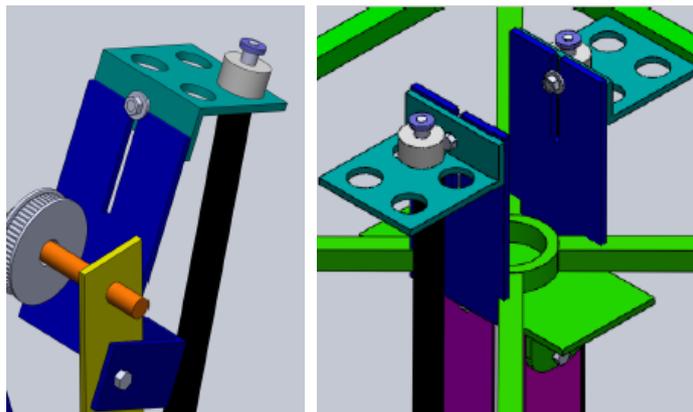


Fonte: Autoria Própria.

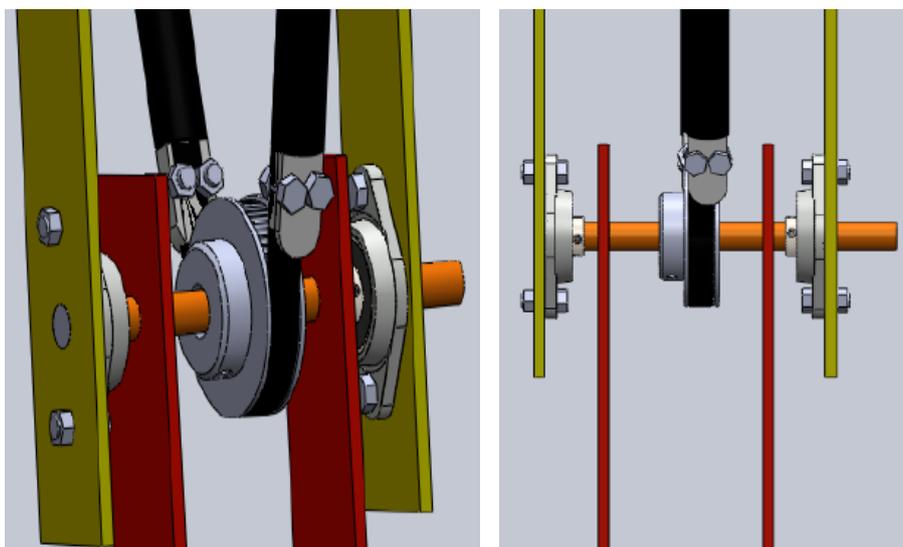
Cada elo possui um mecanismo para a fixação e regulagem de altura dos músculos, além de permitir a utilização de até 8 músculos por junta (Figura 15a). Essas características tornam o mecanismo versátil, ampliando seu campo de utilização. Os elos são compostos por duas chapas de aço ABNT 1020, unidas por um eixo em suas extremidades, sendo que nesses eixos são fixadas polias dentadas de alumínio. A rotação desse eixo se dá por meio de rolamentos fixados nas chapas.

A transmissão de movimento entre os elos ocorre por meio de correias dentadas, que se acoplam nas polias. Tais correias, por sua vez, são fixadas nas extremidades dos músculos. Sendo assim, à medida que o músculo realiza seu ciclo (expansão e contração), as juntas se movimentam. Esse sistema de acoplamento está representado na Figura 15b.

Figura 15-Detalhes do Dispositivo projetado a) Mecanismo de fixação e regulagem e b) Sistema de acoplamento do dispositivo



a)

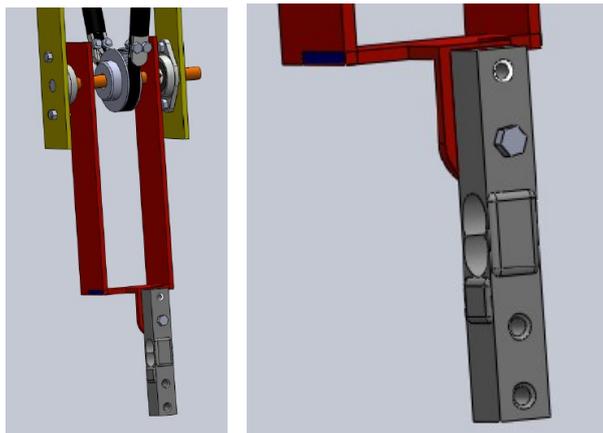


b)

Fonte: Autoria Própria.

Na extremidade do elo 2, o mecanismo possui um dispositivo para fixação da célula de carga, utilizada para a realização de ensaios de impactos. Nesse sentido, a Figura 16 apresenta o elo 2 com enfoque a célula de carga acoplada ao manipulador.

Figura 16– Célula de carga acoplada ao dispositivo



Fonte: Autoria Própria.

### 3.3 Construção do manipulador

Após a elaboração do projeto a etapa subsequente ocorreu por meio da construção do manipulador propriamente dito. Para viabilizar essa construção foram utilizados materiais leves e convencionais. A estrutura de sustentação do manipulador, bem como as chapas utilizadas nos elos são confeccionadas com aços ABNT 1020, que são fáceis de ser encontrados, bem como possuem um custo acessível.

Os demais materiais empregados na construção seguiram a mesma filosofia, na qual procurou-se utilizar peças convencionais e fáceis de serem encontradas no mercado, propiciando assim, um dispositivo economicamente viável. Os componentes utilizados para a confecção do manipulador estão discriminados a seguir:

O mancal de rolamento foi utilizado para dar mobilidade aos elos móveis, por meio de seu acoplamento ao eixo do dispositivo. No projeto optou-se por utilizar o mancal de rolamento KFL08 com 8mm de diâmetro interno. O componente possui um custo médio de R\$ 20,00 por unidade e ao todo foram utilizadas quatro unidades, sendo dois em cada elo móvel. A imagem 17 ilustra a peça em questão.

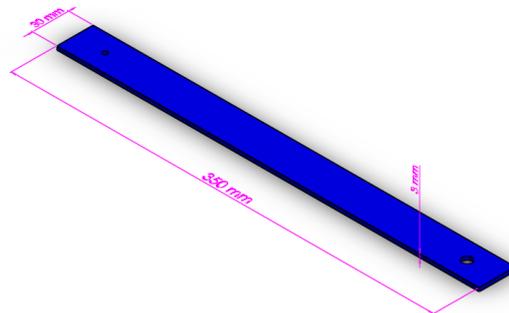
Figura 17-Mancal de Rolamento usado no dispositivo



Fonte: <https://www.usinainfo.com.br/imprensa-3d-e-cnc-arduino/mancal-com-rolamento-kfl08-para-eixo-8mm-5401.html>.

O elo fixo e o elo 1 são confeccionados por meio de uma chapa de aço com as seguintes dimensões: 350 mm de comprimento, 30mm de largura e 3mm de espessura (Figura 18), sendo que cada chapa tem uma massa de aproximadamente 0,5 Kg. Já o elo 2 possui o comprimento reduzido pela metade, possuindo as seguintes dimensões: 175 mm de comprimento, 30mm de largura e 3mm de espessura. Essa estratégia foi utilizada para reduzir o torque gerado na junta pelo comprimento excessivo do elo, já que o comprimento do segundo elo não influencia na dinâmica de modelamento do sistema.

Figura 18-Chapa utilizada para a confecção dos elos



Fonte: Autoria Própria.

A transmissão de movimento do conjunto ocorre por meio do sistema com correias e polias do tipo V. Para tal, utilizou-se uma polia leve, porém resistente, feita de alumínio. O modelo selecionado foi a GT2, que possui um massa total de 0,038 Kg. O conjunto de transmissão (correia e polia), possui um custo médio de R\$ 40,00 por unidade e ao todo

foram usados dois conjuntos no sistema. Os componentes citados estão representados nas Figuras 19a e 19b.

Figura 19– Sistema de transmissão a) Polia de Alumínio e b) Sessão transversal da correia dentada



a)

b)

Fonte: Autorial Própria.

Após a aquisição dos componentes, foi dada continuidade na manufatura do dispositivo. Para tal, foram utilizados equipamentos acessíveis e de baixo custo relativo (quando comparados aos processos de fabricação industriais), sendo eles: máquina de solda inversora portátil (alimentada pelo processo de eletrodo revestido), furadeira de impacto e politriz lixadeira. A estrutura do dispositivo foi confeccionada com um perfil tubular oco (estratégia utilizada para diminuir o peso da estrutura), possuindo um peso total de aproximadamente 5 kg, o que faz com que o mecanismo possa ser facilmente transportado. Possui um comprimento de 1500 mm com uma sessão quadrada de 300 x 300 de largura. As Figuras 20 a e 20 b ilustram algumas etapas na construção do dispositivo, já a figura 20 c ilustra o dispositivo concluído.

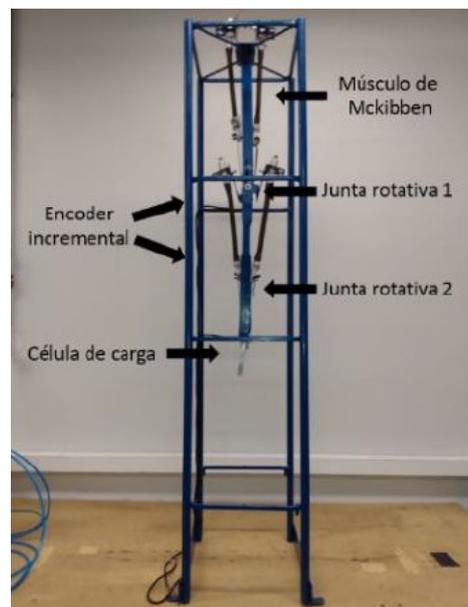
Figura 20 – Construção do dispositivo a) Construção dos componentes do Manipulador e b) Evolução na construção do manipulador c) Dispositivo finalizado.



a)



b)



c)

Fonte: Autoria Própria

### 3.4 Construção do músculo

O músculo foi confeccionado utilizando a metodologia proposta na sessão 2.3. Para tal, foram seleccionados materiais de forma a garantir que o atuador fosse leve e de baixo

custo. Os componentes utilizados foram: borracha de látex, malha de nylon, fixadores e conexões de polímero.

Na construção dos MAPs não foram adotados materiais condutores. Para isso houve a construção de conexões e engates de polímero, fixados nas extremidades. Utilizando esse artifício foi possível construir um músculo leve, com aproximadamente 0,050 Kg, que atendeu às expectativas do projeto (Figura 21a). Cabe ressaltar que utilizando essa dinâmica de construção, o atuador pode ser utilizado em ambientes com elevado campo magnético, haja vista que não possui materiais condutores, ampliando assim, seu campo de aplicações.

Nas extremidades do músculo foram confeccionadas conexões do tipo rosca (Figura 21b) feita de polímero. Esse artifício foi desenvolvido com o intuito de facilitar a manutenção e a substituições de componentes. A Figura 21 ilustra o músculo construído e a conexão em sua extremidade.

Figura 21 – a) Músculo Montado e b) Conexão de rosca do músculo.



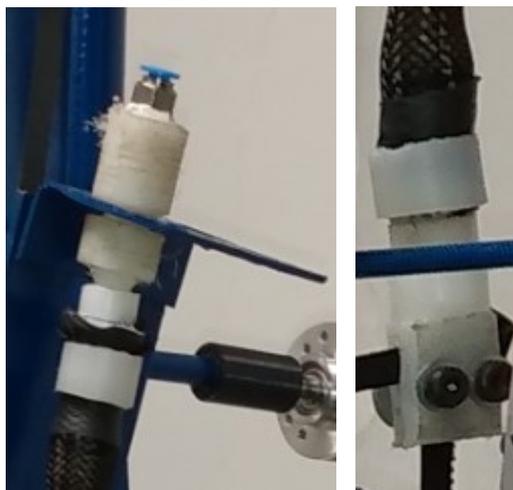
Fonte: Autoria Própria

Para o acoplamento dos MAPs no manipulador foi desenvolvido um componente (Figura 22a) que além da função já citada, propicia a passagem do ar no atuador. Essa peça, feita de polímero, é conectada na extremidade superior do músculo, possuindo em sua

cavidade superior, uma conexão pneumática para o acoplamento da mangueira de ar comprimido. Seu encaixe com o músculo se dá por meio de um sistema de rosca tipo fêmea, localizada em sua cavidade inferior.

Já para a extremidade inferior do músculo, foi desenvolvido um componente para a fixação da correia dentada no atuador (Figura 22b). Essa peça possui um rasgo em seu centro para o encaixe da correia e a fixação ocorre por meio de dois parafusos afixados ao componente. Assim como o dispositivo citado no parágrafo anterior, esse conta com um sistema de rosca tipo fêmea, para que possa ser enroscada no músculo. A Figura 22 ilustra os compenetres citados.

Figura 22- a) Componente de fixação do músculo e b) Componente de fixação da correia.



a)

b)

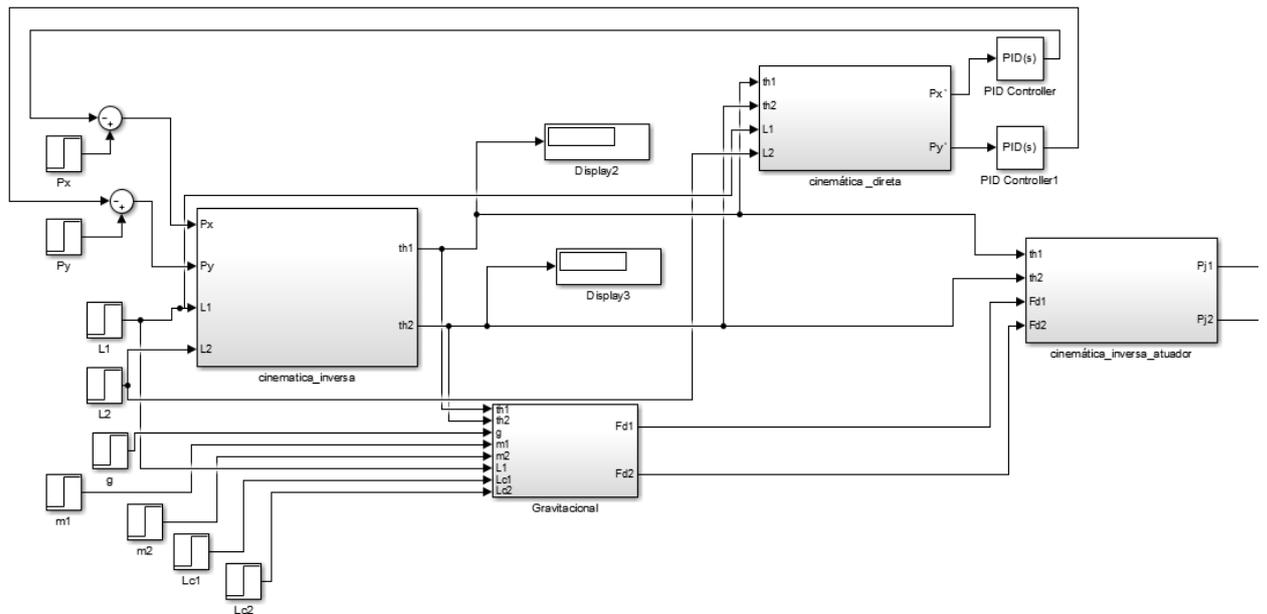
Fonte: Autoria Própria

### 3.5 Desenvolvimento do sistema de controle no Simulink ®

O Matlab possui uma ferramenta de simulação integrada chamada de Simulink. Por meio dela é possível simular, modelar e analisar sistemas dinâmicos. O Simulink utiliza uma interface gráfica, na qual os modelos são criados em diagramas de blocos ou através de linhas de comando, quando integrados no Matlab. Além disso, a ferramenta em questão é mais intuitiva, pois permite a visualização do sistema em diagrama de blocos.

Por meio do Simulink, foi desenvolvido um sistema de controle com base no modelamento demonstrado na sessão 2.7. O sistema desenvolvido pelo Simulink está explicitado na imagem 23.

Figura 23- Sistema projetado no Simulink

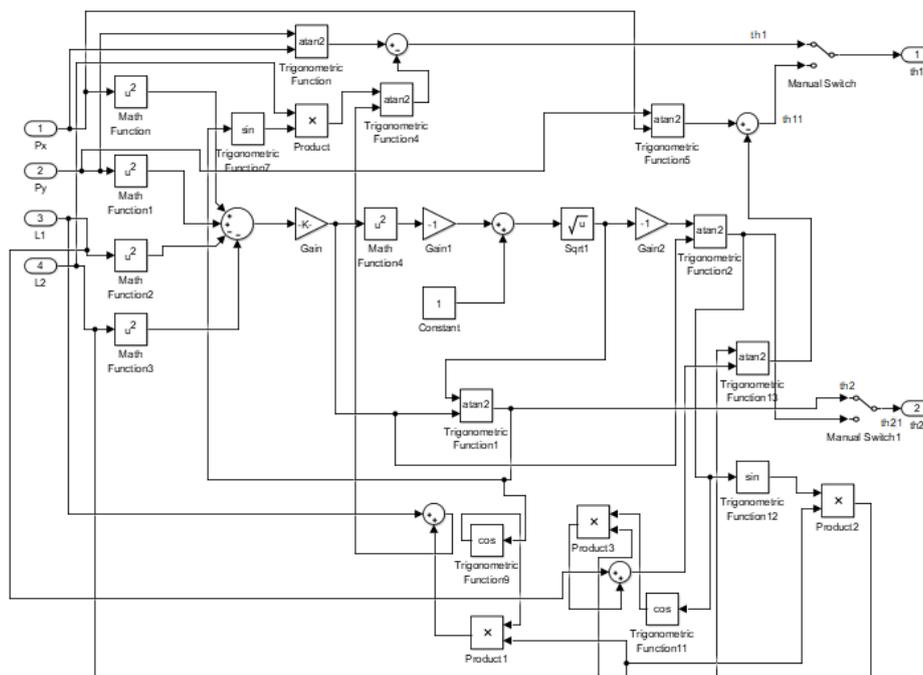


Fonte: Autoria Própria

### 3.5.1 Bloco cinemático Inverso

Conforme citado na sessão 2.7.2, esse modelo é utilizado para obtenção dos ângulos das juntas dos atuadores ( $\theta_1$  e  $\theta_2$ ), por meio de relações trigonométricas. O bloco foi montado de acordo com as equações 8 e 10 e está representado na Figura 24.

Figura 24– Bloco Cinemático Inverso

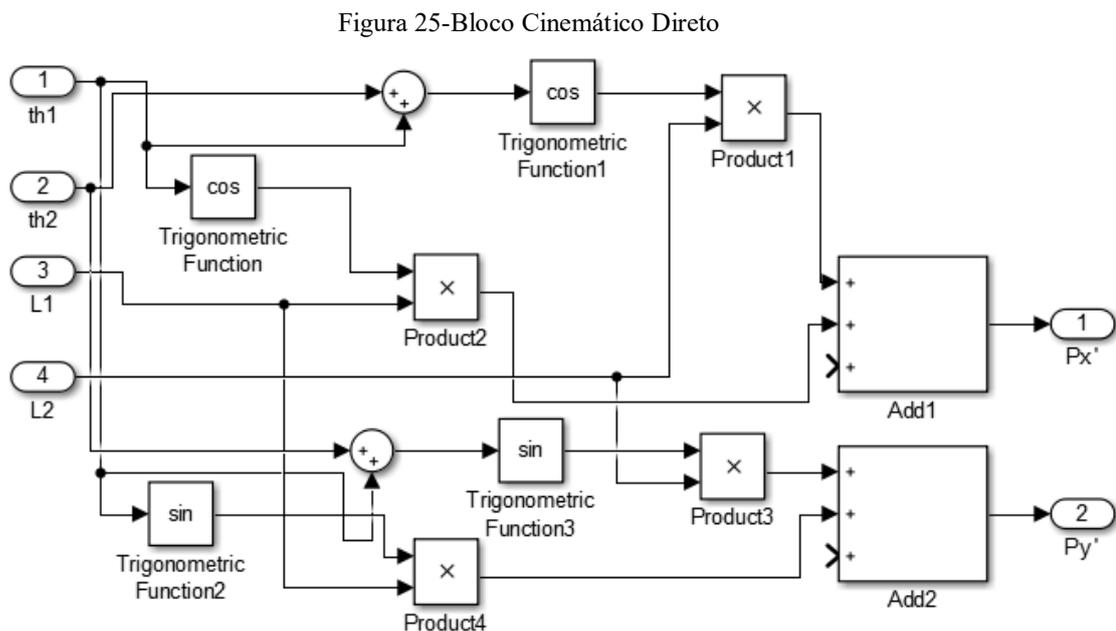


Fonte: Autoria Própria

Pela figura é possível analisar que os parâmetros de entrada do bloco são as coordenadas cartesianas do manipulador que se pretende alcançar ( $P_x$  e  $P_y$ ) e os comprimentos dos elos ( $L_1$  e  $L_2$ ). Na saída do bloco há os valores dos ângulos das juntas.

### 3.5.2 Bloco cinemático Direto

O modelamento cinemático direto consiste na definição do ponto de alcance do efetuador em função dos parâmetros do atuador. Por meio dele é possível definir a posição na qual o atuador se encontra no espaço. A Figura 25 representa o diagrama no Simulink montado por meio das equações 6 e 7 da sessão 2.7.1.



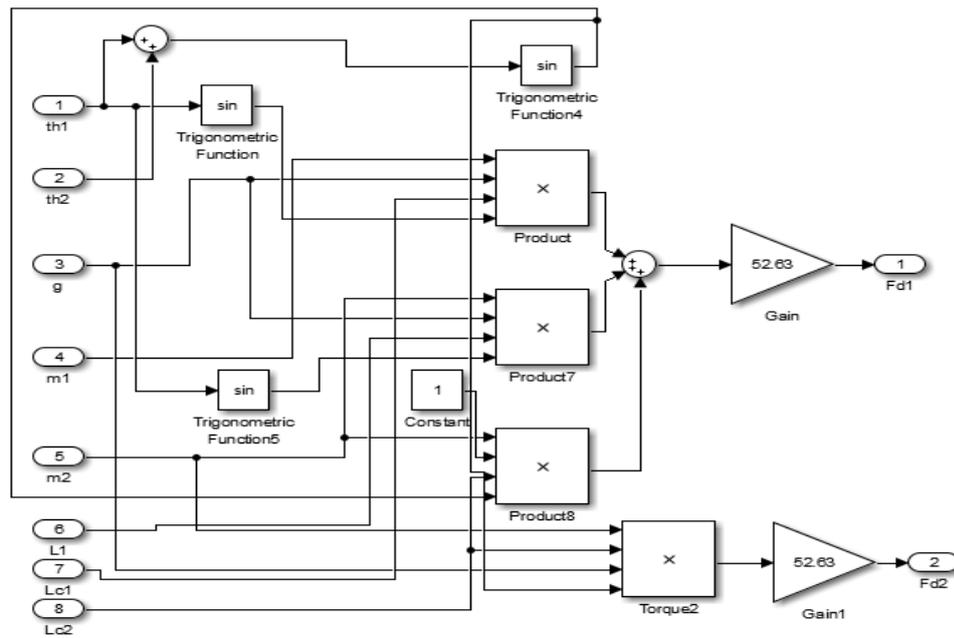
Fonte: Autoria Própria

Pela imagem é possível notar que os parâmetros de entrada do bloco são os ângulos das juntas dos atuadores ( $\theta_1$  e  $\theta_2$ ) e os comprimentos dos elos ( $L_1$  e  $L_2$ ). Já os parâmetros de saída são os pontos de alcance do atuador ( $P_x'$  e  $P_y'$ ).

### 3.5.3 Bloco Dinâmico (Gravitacional)

Esse modelamento tem como objetivo calcular o torque gerado nas juntas do atuador. A Figura 26 representa o bloco com o modelo em questão, confeccionado com base na equação 18 da sessão 2.7.3.

Figura 26-Bloco Gravital

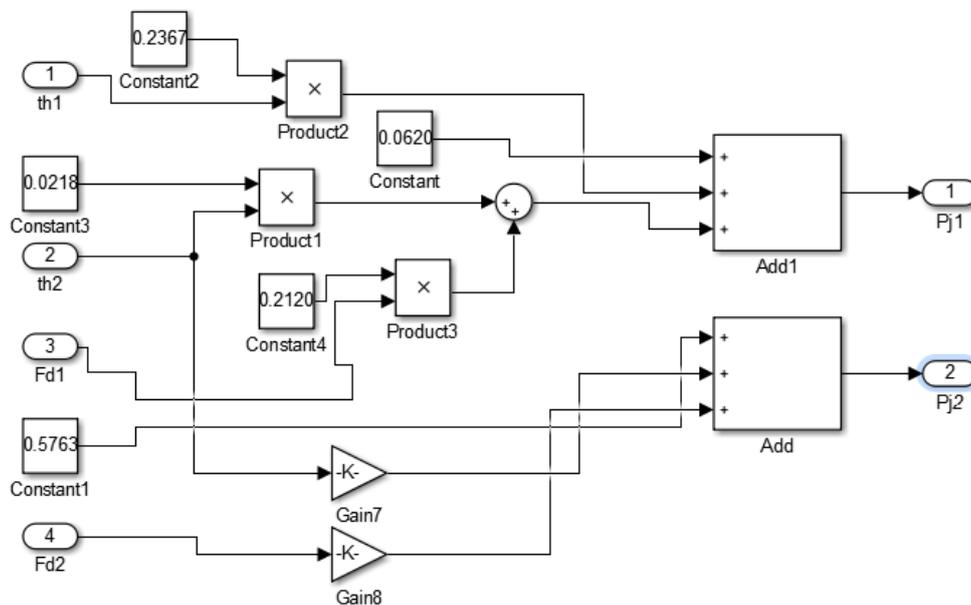


Fonte: Autoria Própria

### 3.5.4 Bloco Cinemático inverso de atuador

Esse modelamento é utilizado para a caracterização das juntas robóticas. Para tal, utilizou-se o método BLII, conforme equações 19 e 20 da sessão 2.7.4. A imagem 27 ilustra esse bloco.

Figura 27-Bloco Cinemático inverso de atuador



Fonte: Autoria Própria

### 3.5.5 Controlador

Para o controle do sistema optou-se por utilizar um controlador do tipo PID, tendo em vista que esse modelo é o mais empregado atualmente no meio industrial. Isso se deve principalmente pela sua simplicidade e sua vasta aplicabilidade na maioria dos sistemas de controle (Conforme citado na sessão 2.8). Dessa maneira, ao longo do estudo foi constatado que o controlador em questão apresenta uma resposta satisfatória para o sistema proposto.

A sintonia dos ganhos do controlador foi feita de forma automática pelo Simulink, sendo que o método utilizado é o segundo método de Ziegler-Nichols. Para realizar essa sintonia deve-se abrir a aba de parâmetros do controlador (basta dar dois clicks no bloco do controlador) e selecionar a opção Tune. Assim, seguindo esses passos o software fará a sintonia automática do controlador. Os parâmetros obtidos pelo controlador após a sintonia estão explicitados na tabela 1.

Tabela 1- Parâmetros do controlador PID

<b>Proporcional (P):</b>	<b>7.464543072</b>
<b>Integral (I):</b>	<b>22.84099837</b>
<b>Derivativo (D):</b>	<b>0.509006201</b>

### 3.6 Materiais utilizados na bancada experimental.

Essa sessão tem por finalidade demonstrar os componentes utilizados na bancada experimental e, conseqüentemente, na realização dos testes.

#### 3.6.1 Válvula e Lubrefil

A válvula utilizada para os ensaios é uma válvula de uma posição e três vias, acionada por solenoide (Figura 28a). Esses mecanismos têm por característica ceder 1 bar de pressão ao sistema a cada volt de tensão aplicada sobre ela.

O Lubrefil é uma unidade compacta de Tratamento de Ar, que visa remover as impurezas do ar, além de propiciar uma regulagem da pressão a ser transmitida aos equipamentos pneumáticos (Figura 28b). No aparato experimental, o dispositivo foi utilizado com o intuito de regular a pressão transmitida para as válvulas. A Figura 28 ilustra os dois dispositivos citados nesse tópico.

Figura 28- a) Válvula e b) Lubrefil

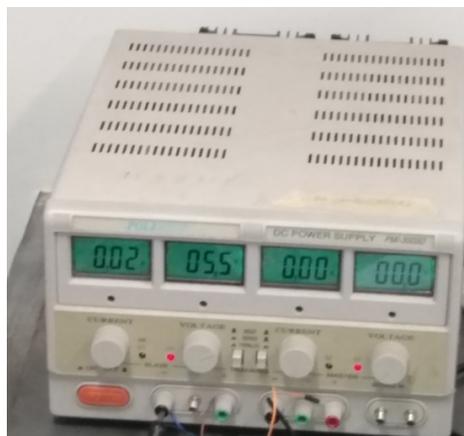


Fonte: Autoria Própria.

### 3.6.2 Fonte PMI 30030

A fonte foi utilizada como alimentação das válvulas. Por meio dela foi possível regular a tensão de saída e, por sua vez, regular a pressão ejetada no sistema, já que as válvulas utilizadas fornecem 1 bar a cada volt de tensão. A Figura 29 representa o equipamento citado:

Figura 29-Fonte usada nos ensaios



Fonte: Autoria Própria.

### 3.6.3 Célula de carga e Módulo Conversor Amplificador HX711

A célula de carga é um transdutor resistivo capaz de converter a força aplicada sobre si em um sinal elétrico. Esse dispositivo foi acoplado na extremidade da junta 2, com o

objetivo de realizar testes de impacto. O sinal gerado pela deformação da célula de carga é bastante baixo e, por conta disso, utilizou-se um amplificador HX711, capaz de realizar a leitura e a conversão dos dados obtidos. A imagem 30 ilustra os dispositivos citados. No lado esquerdo da figura, está representada a célula de carga, já no lado direito o Amplificador HX711.

Figura 30-Célula de carga e Amplificador HX711



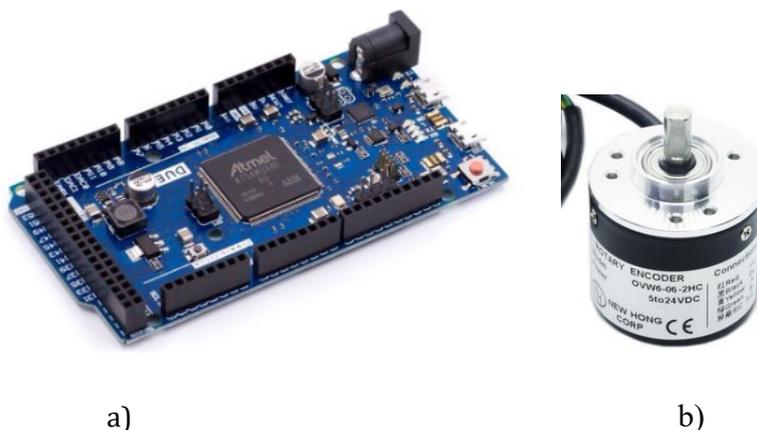
Fonte: <https://solectroshop.com/pt/sensores-de-pressao/1066-hx711-modulo-conversor-de-celulas-de-carga-20kg-a-d-24-bits.html>

### 3.6.4 Arduino Due e Encoder incremental Rotativo

O Arduino Due ® foi utilizado para promover a interface entre sensores e atuadores, por meio da placa de desenvolvimento, Figura 31a.

Já o Encoder Incremental Rotativo (Figura 31b) de resolução 2024 PPM (Pulsos por Minuto) foi o sensor utilizado para mensurar o movimento de rotação das juntas. Para tal, esse dispositivo foi acoplado ao eixo de rotação dos elos móveis. A Figura 31 ilustra os dispositivos citados.

Figura 31-a) Arduino Due e b) Encoder incremental Rotativo .



a)

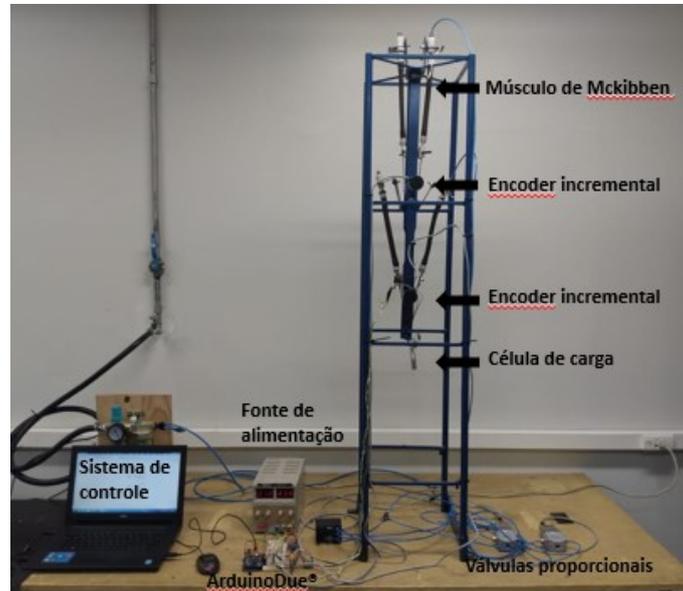
b)

Fonte: <https://www.saravati.com.br/arduino-due-r3-arm-32-bits-atsam3x8e>

### 3.7 Montagem da bancada experimental

A última macro etapa consiste na montagem da bancada experimental. Após o desenvolvimento do sistema de controle, por meio do Simulink® foi montada a bancada para a realização dos testes. A Figura 32 ilustra a bancada de testes.

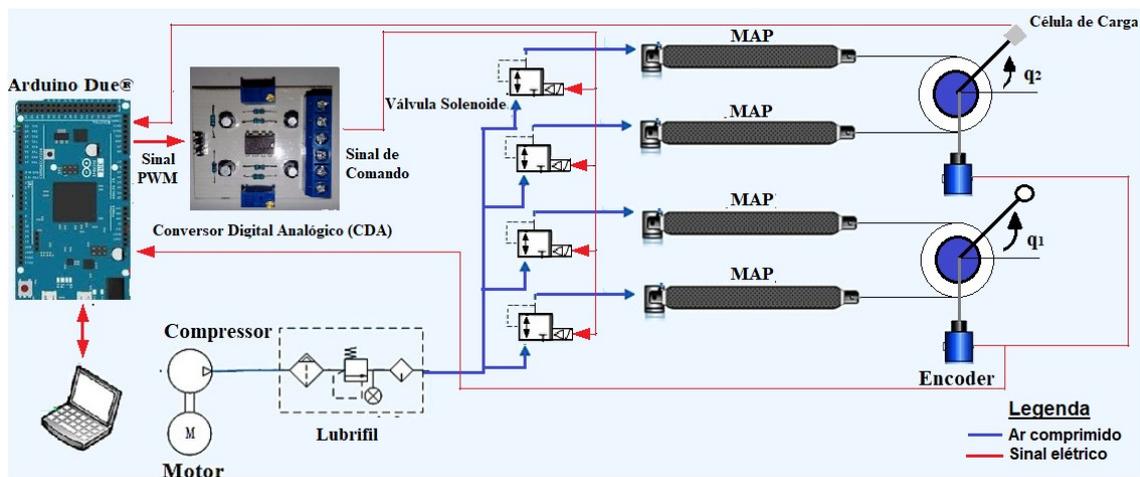
Figura 32-Bancada de testes.



Fonte: Autoria própria

A interface sensores/atuadores foi desenvolvida a partir de uma placa de desenvolvimento Arduino Due® e a comunicação entre as válvulas e a placa ocorre por meio de um conversor analógico digital (CDA). O CDA é responsável por captar o sinal PWM, proveniente do Arduino e convertê-lo em sinal de comando para as válvulas. A Figura 33 ilustra a dinâmica do sistema.

Figura 33-Dinâmica do sistema construído



Fonte: Autoria própria.

Por meio da figura 33 é possível visualizar a dinâmica do sistema, nela estão representadas as juntas 1 e 2 ( $q_1$  e  $q_2$ ), os atuadores pneumáticos (MAPs) e o sistema de acionamento desse atuadores. Os comandos do Simulink são enviados ao Arduino e ao conversor, que por sua vez, promove o controle das válvulas, regulando assim, o acionamento do sistema.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Resultados Gráficos

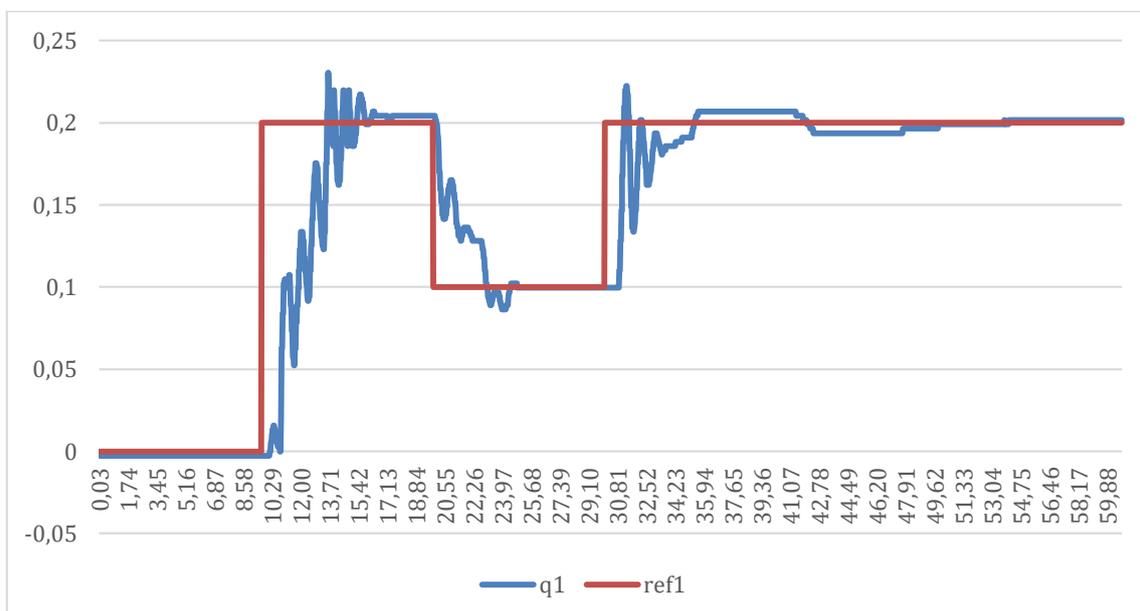
Esse tópico tem por objetivo demonstrar os resultados gráficos obtidos por meio dos ensaios com o dispositivo construído e com o sistema de controle implementado.

Todos os testes foram realizados com um tempo de amostragem de 60 segundos. Ao todo foram coletados 2024 pontos por ensaio, haja vista a resolução do Encoder (2024 Pulsos Por Minuto).

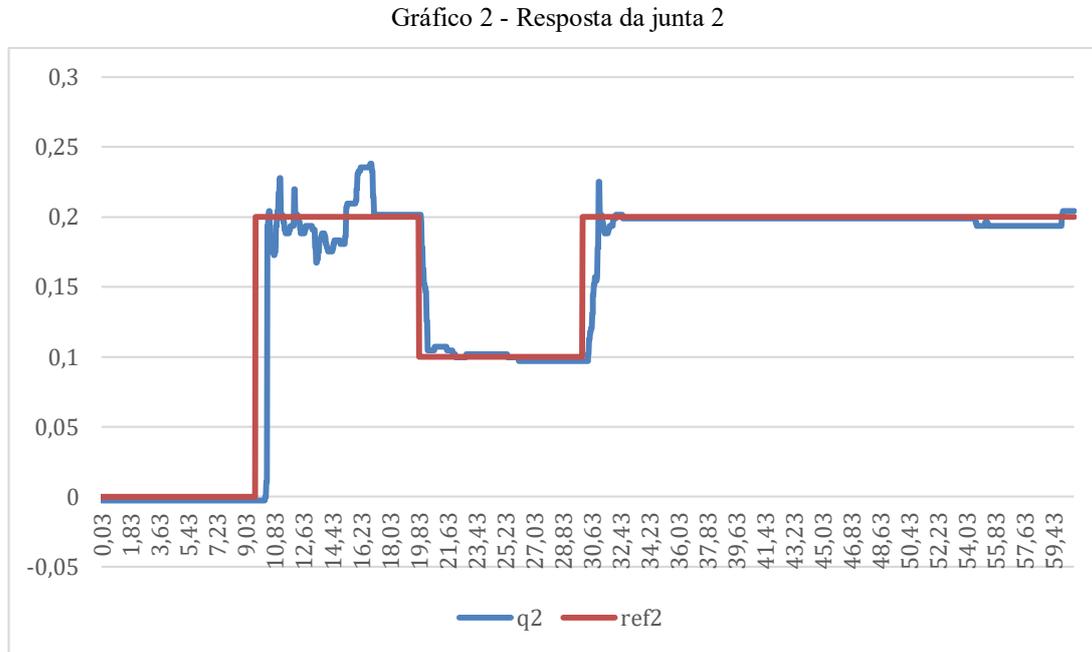
#### 4.1.1 Testes sem carga

Em um primeiro momento, foram realizados testes sem carga no efetuador do manipulador, a fim de avaliar o comportamento do sistema. Foram aplicados ao sistema perturbações nos tempos 10, 20 e 30 segundos de 0,2; 0,1 e 0,1 Rad., respectivamente. O gráfico 1 representa o comportamento da junta 1 ( $q_1$ ) em relação a aplicação das perturbações, tendo por base a referência (ref1).

Gráfico 1- Resposta da junta 1



Analogamente ao exemplo anterior, temos no gráfico 2 a resposta da junta 2 ( $q_2$ ) em relação à perturbação, tendo por base a referência ( $ref_2$ ).



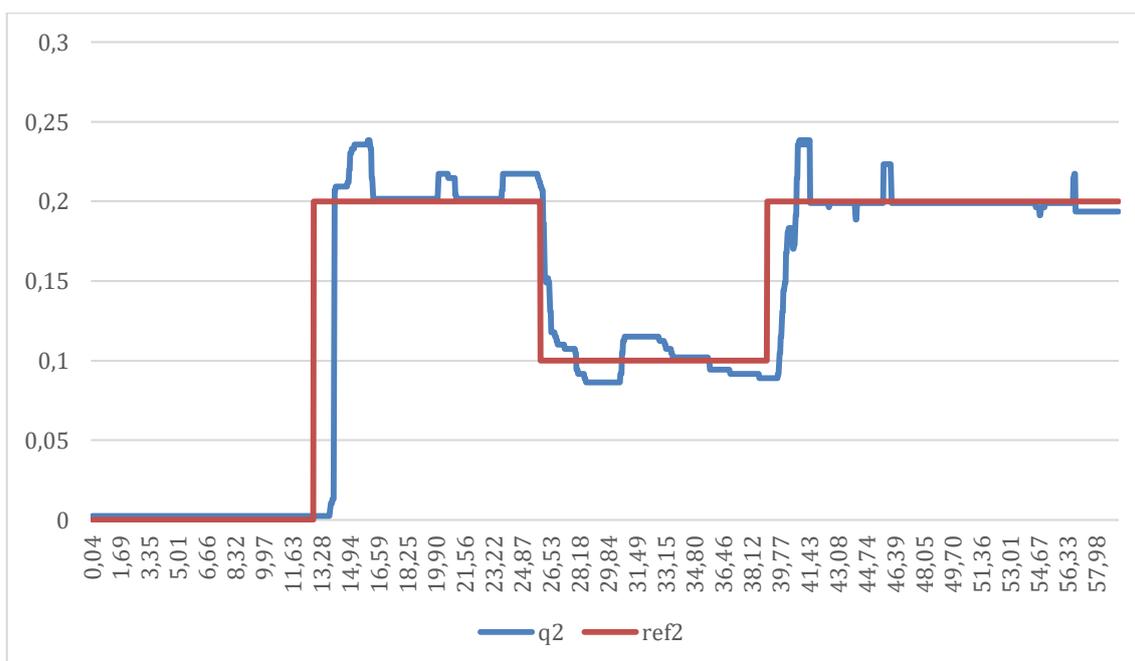
#### 4.1.2 Testes sem carga com perturbação física

A segunda bateria de teste consiste em manter as mesmas condições da anterior, aplicando-se ao sistema perturbações nos tempos 10, 20 e 30 segundos de 0,2; 0,1 e 0,1 Rad. Entretanto, nessa segunda situação, foi aplicada uma perturbação de 0,1 N no tempo de 14 segundos, para avaliar o comportamento do sistema. Os gráficos 3 e 4, ilustram o comportamento das juntas 1 e 2, respectivamente.

Gráfico 3-Resposta da junta 1 em relação a perturbação



Gráfico 4-Resposta da junta 2 em relação a perturbação



#### 4.1.3 Testes com carga sem perturbação física

A terceira bateria de teste consiste em manter as mesmas condições da anterior, aplicando-se ao sistema perturbações nos tempos 10, 20 e 30 segundos de 0,2;0,1 e 0,1 Rad. Esse tópico tem como objetivo demonstrar a robustez do controlador. Para tanto, os

ensaios foram realizados com uma carga constante de 0,1 N. Os gráficos 5 e 6 demonstram o comportamento das juntas 1 e 2, respectivamente, durante os ensaios.

Gráfico 5-Resposta da junta 1

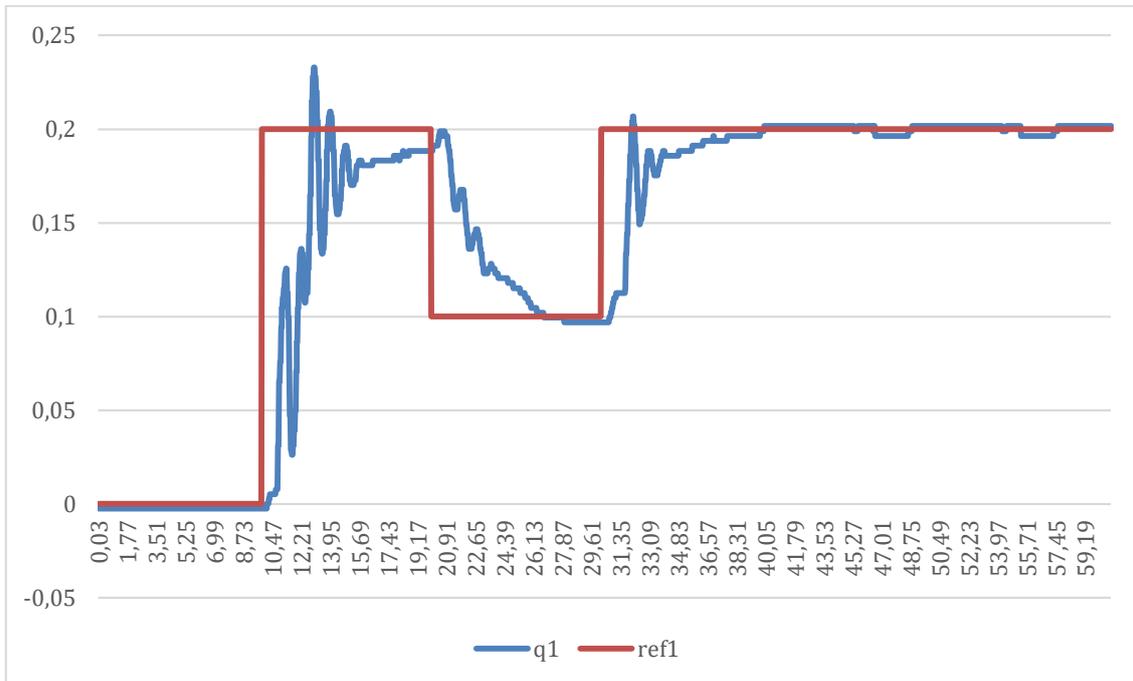
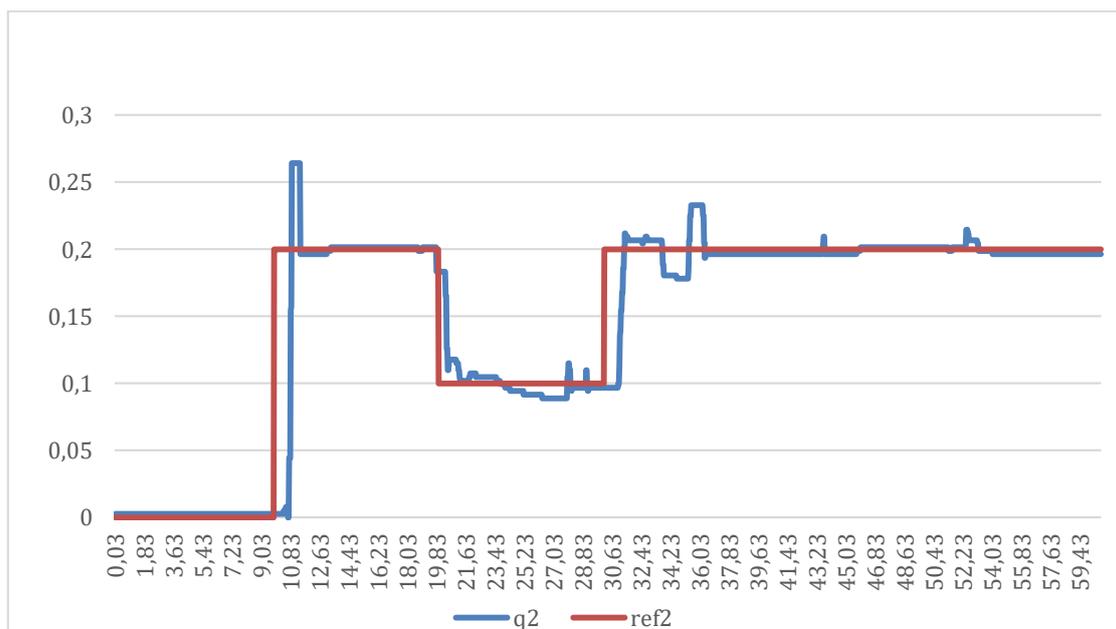


Gráfico 6-Resposta da junta 2



#### 4.1.4 Testes de Perturbação Senoidal (Frequência de 0,1 Rad/Seg)

Nas sessões 4.1.4 e 4.1.5, o sistema foi submetido a perturbações oscilantes. Nesse primeiro tópico, há uma perturbação do tipo seno com frequência de oscilação de 0,1 radianos/segundo, dada pela seguinte expressão:  $0.1 + 0.05 \text{ sen}(0.1t)$ .

Os gráficos 7 e 8, demonstram o comportamento das juntas 1 e 2 respectivamente, durante os ensaios.

Gráfico 7- Resposta da junta 1 a perturbação oscilatória

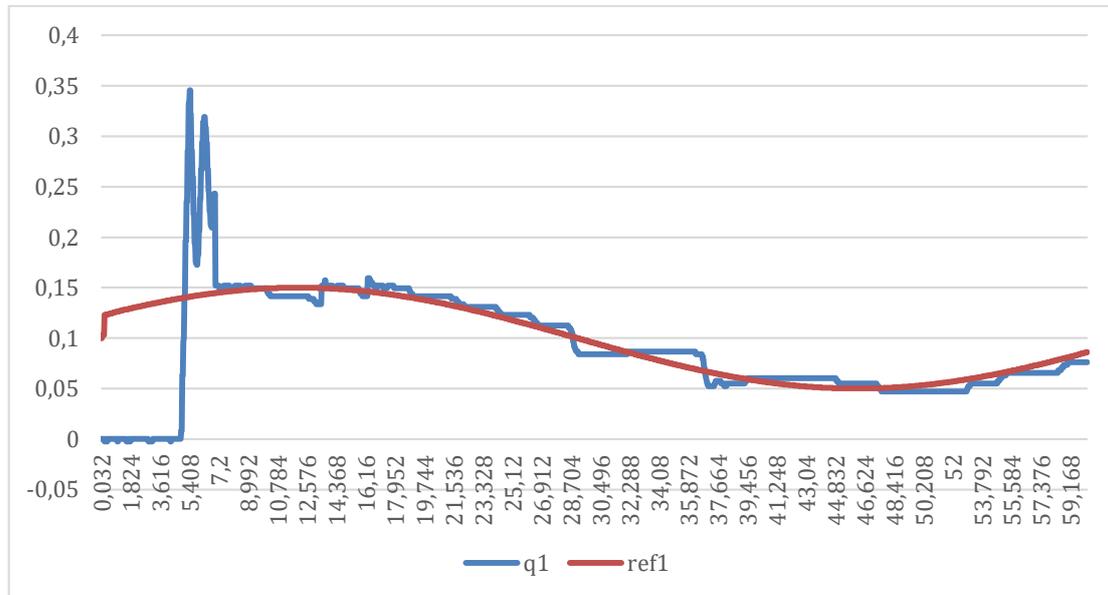
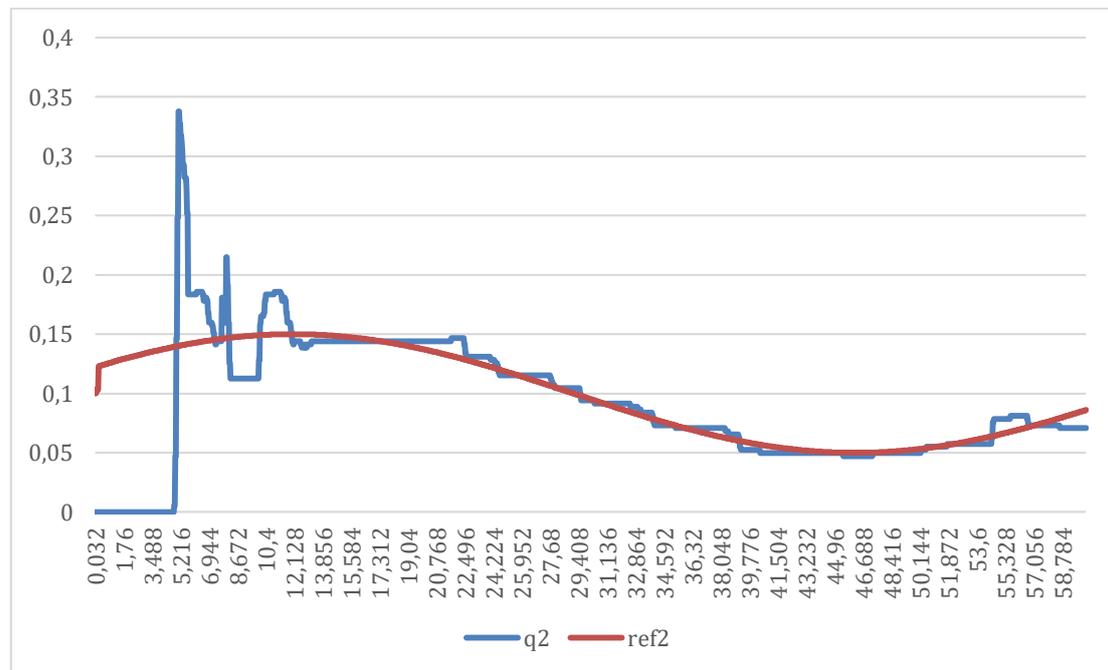


Tabela 8-Resposta da junta 2 a perturbação oscilatória



#### 4.1.5 Testes de Perturbação Senoidal (Frequência de 1 Rad/Seg)

Nesse tópico, analogamente ao anterior, o sistema foi submetido a uma perturbação oscilante do tipo seno. A diferença está na frequência de oscilação, sendo no segundo caso igual a 1 Radiano/Segundo, conforme a seguinte expressão:  $0.1 + 0.05 \text{ sen}(1t)$ .

Os gráficos 9 e 10, demonstram o comportamento das juntas 1 e 2, respectivamente, durante os ensaios.

Gráfico 9-Resposta da junta 1 a perturbação oscilatória

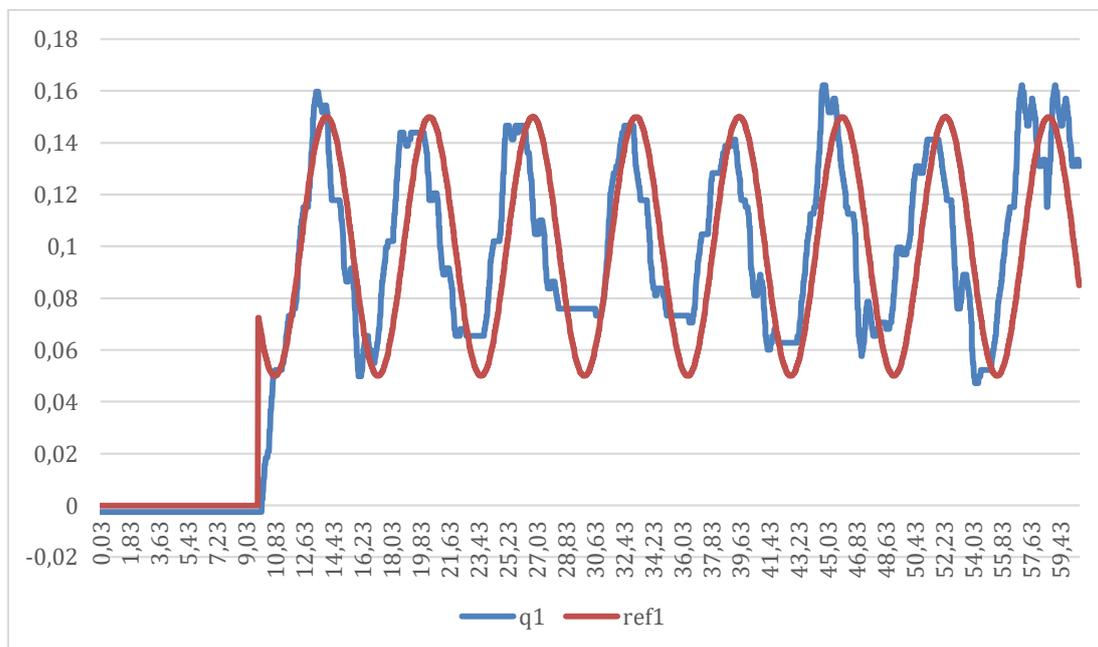
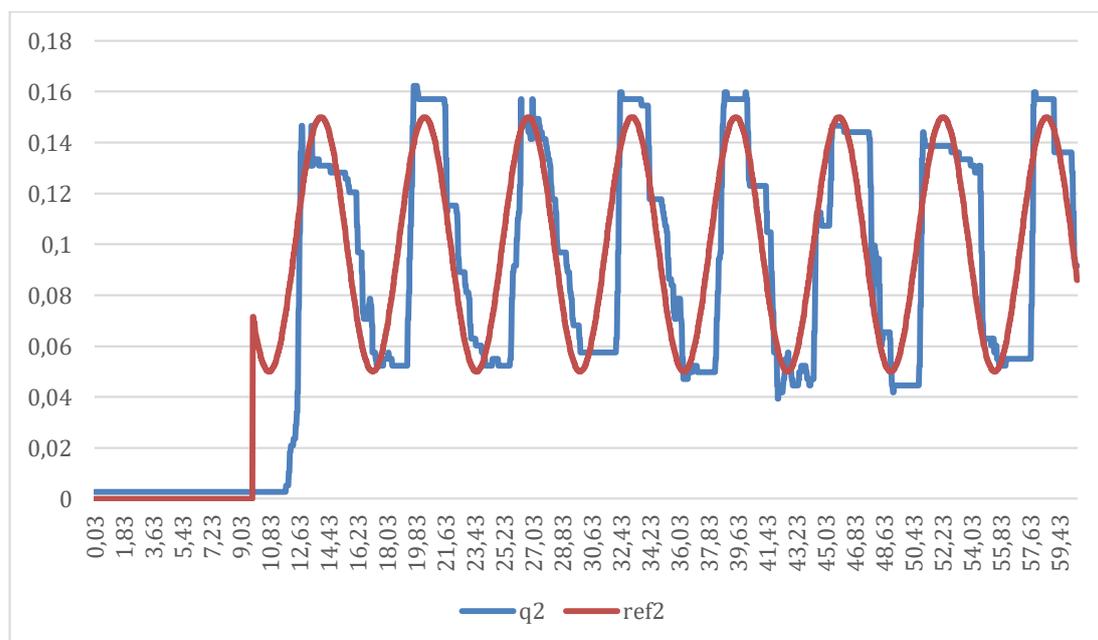


Gráfico 10-Resposta da junta 2 a perturbação oscilatória



#### 4.1.6 Comparação PI x PID

Por fim, a última bateria de testes foi utilizada para comparar o controlador PID implementado com um controlador PI tradicional. Para isso foram utilizados os mesmos parâmetros da sessão 4.1.1.

Os resultados obtidos estão explicitados nos gráficos 11 e 12. O gráfico 11 ilustra o comportamento da junta 1 quando o sistema utiliza os diferentes controladores (PI e PID). Analogamente, o gráfico 12 representa o comportamento da junta 2 na mesma situação.

Gráfico 11- Comparação resposta da junta 1 PI xPID

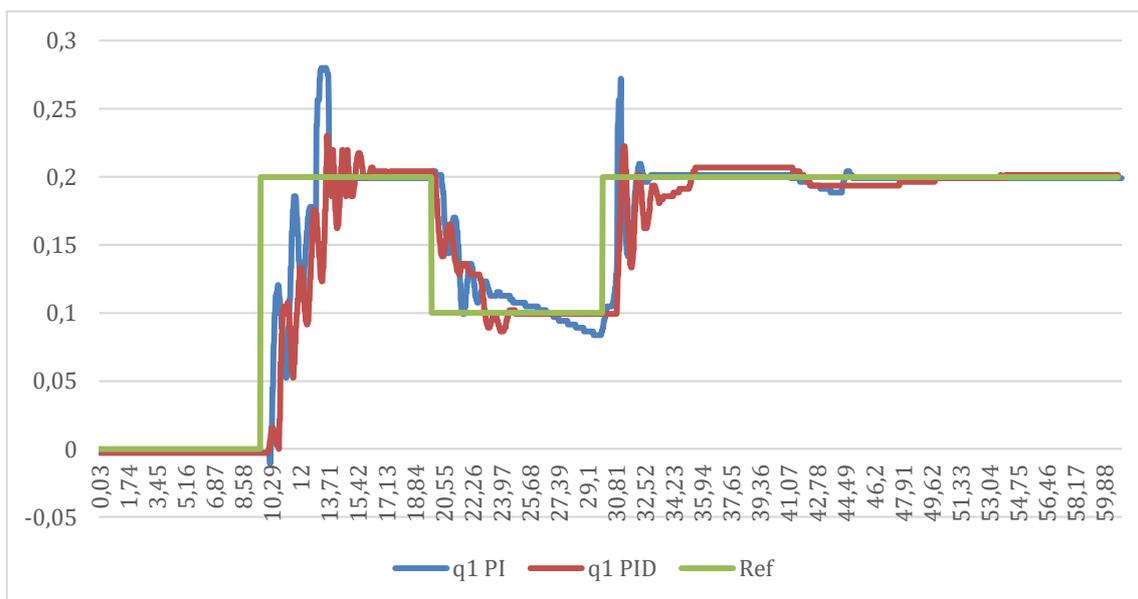
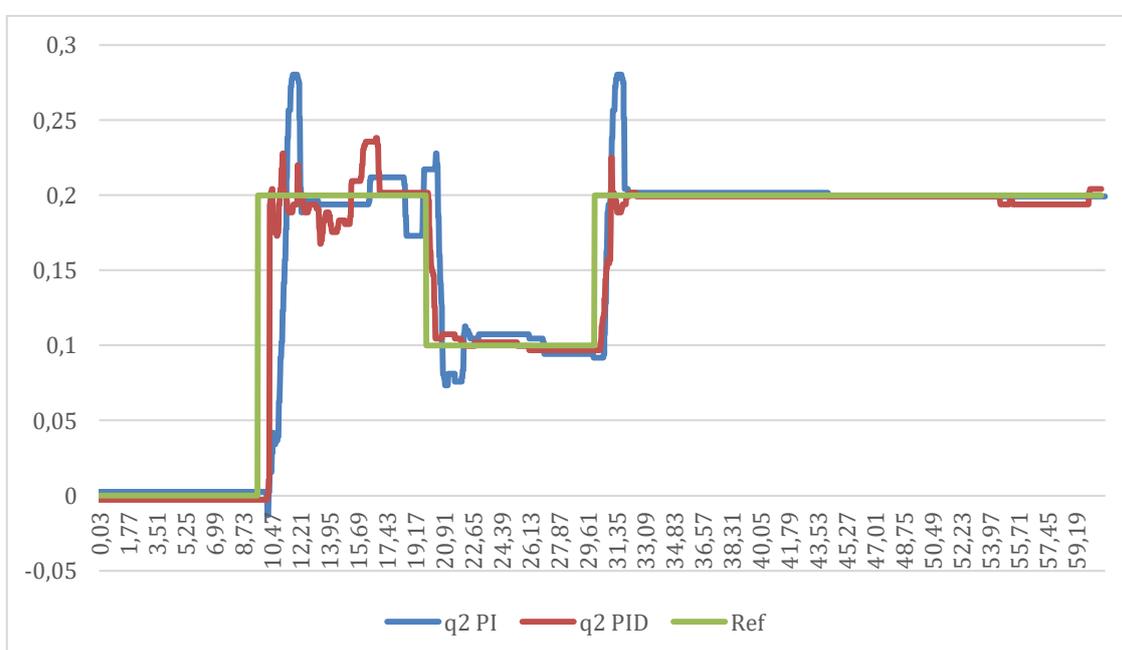


Gráfico 12-Comparação resposta da junta 2 PI xPID



#### 4.1.7 Análise de Erro PI x PID

Para a análise comparativa entre os dois controladores citados nesse estudo (PI e PID), foi utilizada a análise de erro, que consiste na divergência entre o sinal de referência e as respostas do controlador. Para tal foram utilizados o erro efetivo (EE), erro quadrático médio (MSE) e erro absoluto médio (MAE). A Tabela 2 ilustra os erros obtidos durante a realização dos testes.

Tabela 2- Análise dos erros PI x PID

	PI			PID		
	MSE (rad <sup>2</sup> )	EE (rad)	MAE (rad)	MSE (rad <sup>2</sup> )	EE (rad)	MAE (rad)
Junta 1 ( $q_1$ )	0,00088804	0,029800	0,007590	0,000760877	0,027584	0,006240
Junta 2 ( $q_2$ )	0,000928421	0,03047	0,0094631	0,000810256	0,028465	0,008546

Por meio da tabela 2 é possível analisar que o controlador PI apresenta um erro em média 13 % maior que o PID. Esse fato justifica a implementação do PID em detrimento do PI.

#### 4.2 Análise dos Resultados Gráficos

A primeira bateria de testes foi realizada com o propósito de verificar a resposta do sistema quando submetido a perturbações do tipo degrau de 0,1 e 0,2 radianos. Por meio do gráfico é possível notar que o sistema de controle conseguiu responder as perturbações, mantendo sua estabilidade.

A segunda baterias de teste foi utilizada para verificar a resposta do sistema a uma perturbação mecânica aleatória de 0,1 N ao longo seu funcionamento. Por meio dos gráficos é possível analisar que o sistema de controle proposto obteve êxito em corrigir a perturbação, mantendo uma resposta satisfatória após essa adversidade.

Na terceira situação de ensaios, com a carga de 0,1 N durante todo o ensaio, é possível analisar que o sistema manteve o *over shoot*, mesmo com a carga constante durante todo o ensaio. Sendo assim, é possível observar que mesmo ocorrendo uma perturbação mecânica, o sistema mantém uma resposta satisfatória, demonstrando a robustez do controlador.

Na quarta e quinta situação, foi empregado ao sistema uma perturbação senoidal, para avaliar sua resposta a uma perturbação oscilatória, variando nesses dois casos a frequência de oscilação, sendo no primeiro caso de 0,1 e no segundo de 1 Rad/segundo. Pelo gráfico

é possível constatar que o sistema de controle apresenta uma resposta satisfatória nas duas situações e que a resposta segue a tendência esperada. Com isso, é possível concluir que o sistema apresenta uma boa resposta quando submetido a uma perturbação permanente ao longo do tempo.

A sexta bateria de testes foi utilizada para comparar o controlador PID implementado com um controlador PI tradicional. Por meio do resultado obtido no gráfico e da análise de erro foi possível observar que o sistema controlado pelo PID apresenta uma melhor resposta a perturbação quando comparado ao PI.

### **4.3 Interação segura homem-robô utilizando a norma ISO/TS 15066**

Para que o dispositivo possa ser utilizado com segurança na interação com o homem, é necessário o atendimento aos requisitos da norma ISO/TS 15066, conforme explicitado na sessão 2.10. Desse modo, é preciso que durante um evento de colisão, os seguintes critérios sejam satisfatórios:

- 1- Força Máxima de Inferior a 140 N;
- 2- Pressão Máxima Inferior a 200 N/cm<sup>2</sup>;
- 3- Energia Máxima Inferior a 0,49 J.

Sendo assim, as sessões subsequentes foram utilizadas para verificar se o dispositivo atenderia às especificações de segurança da norma ISO/TS 15066. Os valores foram obtidos por meio de ensaios de impacto do dispositivo com um anteparo fixado em uma de suas extremidades. A força foi mensurada por meio de uma célula de carga acoplada na parte inferior do braço do manipulador. O dispositivo citado e o anteparo fixado estão representados na Figura 34:

Figura 34-Manipulador pneumático com destaque para o anteparo de colisão



Fonte: Autorial Própria

#### 4.3.1 Adequação em relação a força

Para verificar se o dispositivo atende às especificações de força, utiliza-se a equação 22 da sessão 2.10, para se obter a força máxima.

$$F_{colisão} = -1.1466 + 0.4982 P_{Junta 1} + 0.8814 P_{Junta 2} - 45.30\theta_1 - 4.18\theta_2$$

Haja vista que a pressão máxima utilizada pelo mecanismo é de 6 bar e que a força máxima é dada por  $\theta_1 = \theta_2 = 0$ , ao substituir esse valor na equação acima, observa-se que a força máxima de colisão do dispositivo é:

$$F_{colisão Máxima} = 7,13 N$$

Constata-se que a força máxima do dispositivo é inferior a estipulada pela norma. Com isso o mecanismo atende a primeira condição.

#### 4.3.2 Adequação do dispositivo em relação a pressão

A área de contato entre o dispositivo e o anteparo, durante o ensaio de colisão foi de  $1\text{cm}^2$  (área da sessão transversal da célula de carga). Assim, a pressão máxima durante a colisão é dada por:

$$P_{colisão Máxima} = \frac{F_{colisão Máxima}}{\text{Área de colisão}} = \frac{7,13 N}{1\text{cm}^2} = 7,13 \text{ N/cm}^2$$

A pressão máxima obtida pelo dispositivo é de 7,13 N/cm<sup>2</sup>, bem abaixo da pressão máxima estipulada pela norma, que é de 200 N/cm<sup>2</sup>. Com isso, o dispositivo atende a segunda condição.

### 4.3.3 Adequação do dispositivo em relação a energia

A energia cinética do sistema é dada por uma relação entre a sua massa e a sua velocidade, conforme a expressão:

$$E_{cinetica} = \frac{m \cdot v^2}{2}$$

Manipulando a equação acima, a velocidade do sistema é dada por:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot E_{cinetica}}{m}}$$

Considerando que a massa do mecanismo é de 1,298 kg e que a energia máxima estipulada pela norma é 0,49 J, ao substituir esses valores na equação acima, obtemos a velocidade máxima do mecanismo.

$$v_{máxima} = \sqrt{\frac{2 \cdot E_{cinetica}}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,49}{1,298}} = 0,828 \text{ m/s}$$

Com isso, constata-se que para o sistema atender ao último critério da norma, podendo ser utilizado em segurança, sua velocidade linear não poderá ultrapassar 0,828 m/s.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E DIREÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

### 5.1 Considerações finais

Conclui-se que o trabalho alcançou o objetivo proposto, tendo em vista que o dispositivo construído utiliza como atuador o músculo pneumático artificial de McKibben, que representa uma tendência, em função do seu baixo custo e facilidade de fabricação. Além disso, um outro benefício de destaque é o fato de que tal dispositivo não causa impactos significativos ao meio ambiente.

Desse modo, o dispositivo projetado e construído atendeu às expectativas propostas, apresentando um baixo custo (devido aos materiais utilizados em sua fabricação), bem

como pelo fato de sua construção ser relativamente simples, dispensando o uso de equipamentos industriais na sua confecção.

O músculo desenvolvido não possui componentes ferro magnéticos, conferindo ao componente duas características relevantes: baixo peso e possibilidade de aplicação em ambientes com elevado campo magnético. Essas características tornam o dispositivo versátil e ampliam seu campo de utilização. Já a interface entre os sensores e atuadores foi desenvolvida por meio da plataforma Arduino®, que em conjunto com a simplicidade dos sensores empregados, propiciaram a facilidade em empregar o sistema proposto nesse trabalho.

O sistema de transmissão desenvolvido atendeu as necessidades do projeto, não foram observadas deformações ou escorregamentos nas correias dentadas durante a utilização do dispositivo, sendo assim, o sistema de transmissão construído não influencia significativamente nos erros dos resultados obtidos.

Por meio dos resultados gráficos é possível perceber que o sistema de controle implementado atendeu às expectativas do projeto, apresentando uma boa resposta a perturbações. Uma alternativa para reduzir a oscilação do sistema seria a associação de músculos, colocando mais deles por juntas, valendo-se da capacidade de regulação do dispositivo, que pode ser utilizado com até 8 músculos por junta.

Nessa perspectiva, o sistema construído mostrou-se seguro para ser empregado na interação homem e máquina, uma vez que se enquadrou nos requisitos de segurança estipulados na norma ISO/TS 15066, de 2016. Isso garante ao sistema uma gama de aplicações, considerando seu baixo custo e facilidade de montagem. Contudo, cabe salientar que para que sejam atendidas tais condições estabelecidas pela dita norma, a velocidade linear do dispositivo não poderá ultrapassar 0,828 m/s.

## **5.2 Proposta para trabalhos futuros**

As próximas etapas do presente estudo consistem na utilização do dispositivo associado mais músculos por junta, a fim de avaliar seu comportamento à medida em que se aumenta a quantidade de atuadores.

Para tal, deve ser desenvolvido um sistema de compensação dos músculos, para balancear a diferença nos comprimentos dos atuadores construídos.

Por fim, o dispositivo deve ser construído com material resistente, leve e não condutor, como o alumínio. Isso irá propiciar que o dispositivo seja mais versátil, mais leve e tão resistente quanto o construído, além de permitir a sua utilização em ambientes com elevado campo magnético.

## 6. REFERÊNCIAS

BERGEMANN, D. *et al.* **Pneumatic Artificial muscle**. U.S. Patent No. 6349746, 26 Feb. 2002.

BOMFIM, M.H.S. **Controle Adaptativo Híbrido De Mecanismos Atuados Por Músculos De McKibben**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia da UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, p. 119. 2021.

BOMFIM, M. H. S.; LIMA, E. J. **Uma Nova Metodologia para a Caracterização de Músculos de McKibben e sua Aplicação em um Manipulador Pneumático**. In: XIV Conferência Brasileira de Dinâmica, Controle e Aplicações - USP, São Carlos, 2019.

CABRAL, E.L.L. Cinemática direta de robôs manipuladores. In: **Análise de Robôs – (Livro em elaboração)**. São Paulo: USP, 2009. Disponível em: <http://sites.poli.usp.br/p/eduardo.cabral/Cinem%C3%A1tica%20Direta.pdf>. Acesso em: 04 abr. 2020.

CHOU, C. P.; B. HANNAFORD, Measurement and modeling of McKibben pneumatic artificial muscles. **IEEE Transactions on Robotics and Automation**, [S.I.], v. 12, n.1, p. 90-102, 1996. DOI: 10.1109/70.481753.

CHOU, C. P.; HANNAFORD, B., Static and Dynamic Characteristics of McKibben McKibben Pneumatic Artificial Muscles. **IEEE International Conference on Robotics and Automation**, San Diego, v.1, p.281-286, 1994. DOI: 10.1109/ROBOT.1994.350977

CRAIG, J. J. **Introduction to robotics: mechanics and control**. Nova Jersey: Pearson/Prentice Hall, 2005.

CUI, Y.; MATSUBARA, T., SUGIMOTO, K. Pneumatic artificial muscle-driven robot control using local update reinforcement learning. **Advanced Robotics**. [S.I.], v. 31, n. 8, p. 397-412, Jan. 2021. DOI: 10.1080/01691864.2016.1274680

LIMA, E. J. **Soldagem robotizada com eletrodo revestido**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica da UFMG) – Escola de Engenharia da UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, p. 126. 2006.

NICKEL, V. L.; PERRY, J.; GARRETT, A. L. Development of useful function in the severely paralyzed hand. **The Journal Of Bone & Joint Surgery**, [S.I.], v. 45, n. 5, p. 933-952, July 1963.

NORTON, R. L. **Cinemática e dinâmica dos mecanismos**. Porto Alegre: AMGH Editora, 2010.

OGATA, K. **Engenharia de Controle moderno**. 5. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2011.

PIMENTA, T. T. **Controle de Manipuladores Robóticos**. TCC (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) - Departamento de Engenharia de Controle e Automação, Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2009.

PRADIPTA, J. *et al.* Development of a pneumatically driven flight simulator Stewart platform using motion and force control. **IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)**, Wollongong, July 2013.  
DOI: 10.1109/AIM.2013.6584085

ROMANO, V.F. **Robótica Industrial: Aplicação na indústria de manufatura e de processos**. São Paulo: Edgard Blücher, 2002.

ROSENSTRAUCH, M. J. KRUGER, J. Safe human robot collaboration introduction and experiment using ISO/TS 15066. **3Rd International Conference On Control, Automation And Robotics (ICCAR)**, p. 740-744, 2021.  
DOI: 10.1109/ICCAR.2021.7942795

SAWICKI, G.S.; GORDON, K. E., FERRIS, D. P. Powered Lower Limb Orthoses: Applications in Motor Adaptation and Rehabilitation. **9Th International Conference On Rehabilitation Robotics**. Chicago, p. 206-211, June/July 2005.  
DOI: 10.1109/ICORR.2005.1501086

SCAFF, W. **Precisão em posicionamento de manipulador não condutor acionado por músculos artificiais pneumáticos**. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo. São Paulo, p.192. 2015.

SCHULTE, H. **The Application of External Power in Prosthetics and Orthotics. Technical Report**. Washington: National Academy of Sciences, 1961.

SCOFANO, F.S. **Desenvolvimento de um Elo Pneumático de 3 Graus de Liberdade para Manipuladores Robóticos Flexíveis**. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, p.200. 2006.

TAVAKOLI, M.; MARQUES, L. ALMEIDA, A.T. A comparison study on Pneumatic Muscles and electrical motors. **IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics**, Bangkok, p. 1590-1594, May 2009. DOI: 10.1109/ROBIO.2009.4913238

TONDU, B. Modelling of the McKibben artificial muscle: a review. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, [S.I.], v. 23, n. 3, p. 225-253, Feb. 2012.  
DOI: 10.1177/1045389x11435435

TONDU, B.; LOPEZ, P. Modeling and Control of McKibben Artificial Muscle Robot Actuators. **IEEE Control Systems Magazine**, [S.I.], v. 20, n.2, p. 15- 38, Apr. 2000.  
DOI: 10.1109/37.833638

VALDIERO, A. C. *et al.* Non Linear Mathematical Modeling in Pneumatic Servo Position Applications. **Mathematical Problems in Engineering**, [S.I.], v.2011, p.1-16, 2011. DOI: 10.1155/2011/472903