

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
ENG. DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

WALTER AMAZONAS TÁVORA DA SILVA
- 00259797

PROJETO DE ATUADORES PARA
ROBÔ DO TIPO *SNAKE*

Porto Alegre
2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
ENG. DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

WALTER AMAZONAS TÁVORA DA SILVA
- 00259797

**PROJETO DE ATUADORES PARA
ROBÔ DO TIPO *SNAKE***

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC-CCA)
apresentado à COMGRAD-CCA da Universi-
dade Federal do Rio Grande do Sul como parte
dos requisitos para a obtenção do título de *Ba-
charel em Eng. de Controle e Automação* .

ORIENTADOR:

Prof. Dr. Rafael Antonio Comparsi Laranja

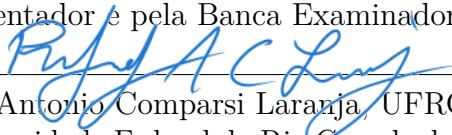
Porto Alegre
2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
ENG. DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

WALTER AMAZONAS TÁVORA DA SILVA
- 00259797

**PROJETO DE ATUADORES PARA
ROBÔ DO TIPO *SNAKE***

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para a obtenção dos créditos da Disciplina de TCC do curso *Eng. de Controle e Automação* e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: 
Prof. Dr. Rafael Antonio Comparsi Laranja, UFRGS
Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Rafael Antonio Comparsi Laranja, UFRGS
Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Prof. Dr. Fabiano Disconzi Wildner, UFRGS
Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Prof. Dr. Renato Ventura Bayan Henriques, UFRGS
Doutor pela Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, Brasil

Alceu Heinke Frigeri
Coordenador de Curso
Eng. de Controle e Automação

Porto Alegre, Setembro 2023

AGRADECIMENTOS

Agradeço o apoio dos meus pais e da minha irmã, que me apoiaram em todas as ocasiões, agradeço aos meus amigos pelos ensinamentos passados e momentos de alegria, à minha namorada, por me ajudar em momentos difíceis, à minha psicóloga, por me ajudar no planejamento do trabalho, aos membros do Laboratório de Mecatrônica e Controle (LAMECC), por me ajudarem nos trabalhos em laboratório e ao meu orientador por sanar minhas dúvidas quase todas as semanas.

RESUMO

Este trabalho apresenta o projeto de atuadores para um robô do tipo *snake* que será utilizado para direcionar o efetuator em um outro robô utilizado para desobstrução de dutos de petróleo. O trabalho contempla a calibração de uma célula de carga para medir tensões no movimento de um robô *snake*, escolha de atuadores realizando uma comparação entre os modelos elétricos e modelos com princípio baseado em ligas com memória de forma (*Shape Memory Alloy - SMA*), escolha da bateria mais adequada para a aplicação, escolha de *drivers* para acionamento dos motores, circuitos reguladores de tensão e microcontroladores. Há também a criação de um sistema para adquirir dados de velocidade para obtenção da função de transferência de um processo a partir do método de resposta ao salto e no final temos a comparação entre os métodos de controle *bang-bang* e Proporcional Integral Derivativo (PID) utilizados para controlar este processo. O trabalho resultou na correta medição de tensões, velocidades e posição. Resultou também na escolha dos componentes adequados para o acionamento do robô e em dois algoritmos de controle capazes de movimentarem um motor até a posição desejada para posteriormente serem implementados no robô *snake*.

Palavras-chave: Robô *snake*, *Bang-bang*, PID, liga de memória de forma, servo motor.

ABSTRACT

This work presents a solution of actuators for a snake robot that will be used to direct an end-effector to another robot used to unblock oil pipelines. The work contemplates the fine tuning of a load cell to gauge forces during the movement of a *snake* robot, the comparison and selection between electric actuators and shape memory alloy's (SMA) actuators. Additionally, the selection of the most suitable battery to power the system autonomously, selection of motor *drivers*, the implementation of voltage step-down circuits and their incorporation of microcontrollers into the system architecture are considered. This study also presents the creation of a system to sample velocity data in order to obtain the transfer function of a process. Lastly, the control methods *bang-bang* and Proportional Integral Derivative (PID) are developed to control this process. This work resulted in the measurement of forces to maneuver the motor to the designated target position. Velocities and position were measured too and the selection of adequate components. These advancements set stage for future implementations.

Keywords: snake robot, bang-bang, PID, shape memory alloy and servo motors.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	3
1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Objetivos	14
1.2 Organização do trabalho	16
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	17
2.1 Robô <i>snake</i>	17
2.2 Robôs <i>snake</i> acionados eletricamente.....	18
2.3 Uso de SMA em robôs	19
2.4 Ligas de memória de forma	20
3 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO	22
3.1 Medições de força	22
3.2 Medições de tensão nos cabos	23
3.3 Escolha do atuador	24
3.3.1 Nitinol.....	25
3.3.2 Atuadores elétricos	25
3.3.2.1 Motor de passo	25
3.3.2.2 Servo motores	27
3.4 Circuito de alimentação e controle	28
3.4.1 Microcontrolador.....	28
3.4.2 Ponte H	29
3.4.3 Encoder	30
3.4.4 Bateria	31
3.4.5 Regulador de tensão	31
3.5 Controle	32
3.5.1 Bang-Bang.....	32
3.5.2 Método da resposta ao salto	33
3.5.3 PID.....	35
3.5.3.1 Laço de anti wind-up	36
3.5.3.2 Discretização do controle	37
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS	39
4.1 Comparação entre os métodos de calibração da célula de carga.....	39
4.2 Medição de tensão nos cabos e posição do robô <i>snake</i>	41
4.3 Fabricação das peças.....	42
4.4 <i>Bang-bang</i> ou PID.....	43

5	CONCLUSÕES	45
	REFERÊNCIAS	46
	APÊNDICES	50
	APÊNDICE A - LINEARIDADE DA CÉLULA DE CARGA	51
	APÊNDICE B - INTERAÇÃO DO MOTOR DE PASSO COM O CONJUNTO ROSCA SEM FIM COROA.....	52
	APÊNDICE C - BATERIA.....	53
	APÊNDICE D - MODELAGEM DO MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA COM ÍMÃS PERMANENTES.....	55
	APÊNDICE E - MEDIÇÕES PARA VALIDAÇÃO DA INCERTEZA DA CÉ- LULA DE CARGA.	58

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

1	Robô Annelida.	14
2	Robô <i>snake</i> em bancada utilizado para testes.	15
3	Módulo para atuadores representado atrás de um robô <i>snake</i> sem seus cabos	15
4	Modelos de estrutura de robôs <i>snake</i>	17
5	Robô <i>snake</i> com movimentação helicoidal.	18
6	Diagrama esquemático do robô inspirado em plantas.	18
7	Diagrama esquemático de robô com tubos superelásticos.	19
8	Mecanismo com atuador transversal de nitinol.	20
9	Curva de tensão-deformação-temperatura do nitinol.	21
10	Circuito utilizado para medição da variação da tensão na célula de carga.	23
11	Peça utilizada na validação do segundo método.	23
12	Medição de tensão em cabo e posicionamento do robô.	24
13	Mecanismo rosca sem fim e coroa.	26
14	Sinais obtidos pelo <i>encoder</i> para diferentes direções de rotação.	30
15	Diagrama de blocos dos circuitos de alimentação e controle.	32
16	Diagrama de blocos para controle <i>bang-bang</i>	33
17	Pulsos de 1 canal de <i>encoder</i> em regime permanente alimentado por 5 V.	34
18	Lugar das raízes.	36
19	Laço <i>anti-wind-up</i>	37
20	Bloco metálico utilizado no ajuste da célula de carga.	39
21	Comparação entre as medidas obtidas através de balança de precisão e célula de carga, demonstrando a linearidade da célula de carga.	40
22	Vista inferior da estrutura que contém mecanismos e atuadores.	42
23	Estrutura para ser inserida no módulo do projeto contendo mecanismos e atuadores.	42
24	Estrutura para ser inserida no módulo do projeto contendo mecanismos e atuadores.	43
25	Comparação entre os controladores <i>bang-bang</i> e PID, para uma entrada do tipo salto.	44
26	Parte interna ao motor CC escovado.	55
27	Circuito equivalente do motor CC de ímã permanente.	56

LISTA DE TABELAS

1	Comparação entre as motores elétricos.	27
2	Comparação entre as pontes H.	30
3	Comparação entre os reguladores de tensão.	32
4	Comparação entre pesos obtidos pela balança e através da célula de carga parametrizada.	40
5	Comparação entre pesos obtidos pela balança e através da célula de carga aferida.	40
6	Medições de tensão em 1 cabo tensionado entre 0 e 79°.	42
7	Comparação entre os tipos de bateria pesquisados.	54
8	Comparação entre pesos obtidos pela balança e através da célula de carga.	58
9	Comparação entre pesos obtidos pela balança e através da célula de carga.	59
10	Comparação entre peso obtido pela balança e através da célula de carga.	59

LISTA DE ABREVIATURAS

CAD	Desenho Assistido por Computador
CA	Corrente Contínua
CC	Corrente Contínua
CPR	Ciclos Por Rotação
LAMECC	Laboratório de Mecatrônica e Controle
LGR	Lugar das raízes
Li-Íon	Lítio-íon
NiTi	Níquel - titânio
PID	Proporcional Integral Derivativo
PLA	Poliácido láctico
PWM	Modulação por Largura de Pulso
SMA	<i>Shape Memory Alloy</i>
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

M_s	Temperatura na qual começa a transformação da martensita a partir da austenita ($^{\circ}\text{C}$).
M_f	Temperatura na qual a transformação da martensita a partir da austenita é completada ($^{\circ}\text{C}$).
σ_m	Tensão de desagregação da martensita (MPa).
A_s	Temperatura na qual começa a transformação da fase martensita para austenita ($^{\circ}\text{C}$).
A_f	Temperatura na qual se conclui transformação em austenita a partir da martensita ($^{\circ}\text{C}$).
E	Tensão de excitação do circuito (V).
S	Tensão de saída gerada pela aplicação da força (V).
τ_{motor}	Torque do motor (Nm).
Δ_l	Deslocamento do cabo (mm).
ω	Velocidade de rotação do eixo do motor após a caixa de redução ($^{\circ}/s$).
E_a	Tensão de armadura (V).
ω_{RP}	Velocidade de rotação do eixo do motor após a caixa de redução em regime permanente (rpm).
T_{pulso}	Período entre pulsos do <i>encoder</i> (ms).
T	Tempo que a variável de processo demora para atingir 63% de sua variação total, passado o tempo do atraso aparente (ms).
ω_{∞}	velocidade de rotação do motor em regime permanente ($^{\circ}/s$).
r	Referência de entrada do motor $^{\circ}$.
$G(s)$	Função de transferência do motor em malha aberta.
K	Ganho de função de transferência.
p	Polo limitador do derivativo.

T_i	Constante de tempo da parte integral do PID (s).
T_d	Constante de tempo do derivativo do PID (s).
T_t	Constante de tempo do laço <i>laço anti-wind-up</i> (s).
y	Saída do sistema ($^\circ$).
<i>erro</i>	Diferença entre a referência e a saída $^\circ$.
P	Proporcional.
<i>dif</i>	Diferença entre os sinais antes e depois do atuador (V).
u_a	Sinal de controle antes da entrada no atuador (V).
u_d	Sinal de controle após saída do atuador (V).
n	Número de amostras.
Δ	Incerteza de medição.
σ	Desvio padrão.
z	Número de desvios padrão correspondentes para se chegar ao nível de confiança desejado.
N	Força aplicada sobre a célula de carga (N).
V	Tensão medida pelo módulo de aquisição de sinais (V).
ε	Variação relativa da deformação.
$\frac{\Delta R}{R}$	Variação relativa da resistência.
S_a	Fator do extensômetro para deformação na direção axial.
ε_a	Deformação ao longo da direção axial do extensômetro.
S_t	Fator do extensômetro para a deformação na direção transversal.
ε_t	Deformação ao longo da direção transversal do extensômetro.
S_{cis}	Fator do extensômetro para deformação de cisalhamento.
γ_{at}	Deformação de cisalhamento associada às direções axial e transversal.
K_t	Fator que relaciona a sensibilidade na direção axial para cada sensor.
R	Resistência elétrica (Ω).
ΔR	Variação de resistência (Ω).
θ_{coroa}	Deslocamento angular da coroa ($^\circ$).
θ_{motor}	Deslocamento angular do motor.

Z	Relação de transmissão do mecanismo sem fim e coroa.
S	Deslocamento linear do cabo (m).
$raio_{carretel}$	Raio do carretel (m).
V	Velocidade linear para puxar o cabo (m).
f_{coroa}	velocidade angular da coroa (rps).
R_a	Resistência de armadura (Ω).
i_a	Corrente de armadura (Ω).
E_{ce}	força contra eletromotriz (V).
K_m	Constante de conjugado do motor(Ω).
K_a	Constante geométrica.
Φ_d	Fluxo de entreferro de eixo direto.
ω_m	Velocidade do motor.
T_e	Conjugado da máquina.
T_m	Torque de carga.
J	Momento de inércia.
B	Coefficiente de atrito viscoso.
T_1	Constante de tempo da função de transferência de E_a/ω .
T_1	Constante de tempo da função de transferência de T_m/ω .

1 INTRODUÇÃO

No processo de extração de petróleo bruto da camada do pré-sal que ocorre sob grandes profundidades, o óleo se resfria ao percorrer até 15 quilômetros para chegar à superfície, podendo chegar a temperaturas próximas de 4 °C, essa baixa temperatura pode levar à formação de hidratos e parafinas que se aderem às paredes dos dutos, obstruindo-os. Para solucionar esse problema foi desenvolvido o Annelida, em destaque na Figura 1, um robô que reproduz o deslocamento peristáltico das minhocas (FIESC, 2023). O robô percorre os dutos e remove a obstrução por meio de uma reação química controlada, em seguida retorna para a plataforma (SENAI, 2023).

Figura 1: Robô Annelida.



Fonte: (SENAI, 2023).

A fim de tornar o posicionamento do efetador (instrumento utilizado para a remoção da parafina) mais preciso e atuar para realizar curvas de 90° sem ter que ficar batendo nas paredes do duto, é indicado colocar um robô *snake* entre o efetador e as outras seções do robô Annelida.

1.1 OBJETIVOS

Neste trabalho o objetivo é dimensionar uma forma de atuação e controle para movimentação de um robô do tipo *snake*, em destaque na Figura 2, que deve ser acoplado ao Annelida. O trabalho busca alcançar os seguintes objetivos específicos:

- medir de forças necessárias para a realização da movimentação do robô;
- escolher os atuadores;

- escolher os mecanismos de redução para aumento do torque, caso necessário;
- definir uma bateria para alimentação dos circuitos elétricos;
- escolher um microcontrolador adequado pra realizar o processamento dos dados;
- escolher os *drivers* para acionamento dos motores;
- projetar de controle de posição para atuar em 1 dos cabos do robô *snake*.

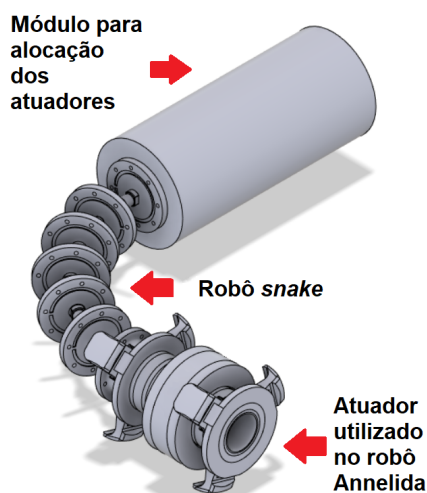
Figura 2: Robô *snake* em bancada utilizado para testes.



Fonte: Do Autor.

Para a implementação deste projeto é considerado que o ambiente para a alocação dos dispositivos são dois módulos com espaço interno de 190 mm de comprimento e 75 mm de diâmetro, que possuem retentores para impedir a passagem fluidos para seu interior. Um exemplo de um dos módulos pode ser visualizado na Figura 3.

Figura 3: Módulo para atuadores representado atrás de um robô *snake* sem seus cabos .



Fonte: Cedido pelo Laboratório de Mecatrônica e Controle (LAMECC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

A comunicação deve ser realizada através de um cordão umbilical no qual é possível transmitir pulsos elétricos e os cabos do robô *snake* podem ser tensionados no espaço interno dos módulos.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Em termos de organização do trabalho esse está dividido da seguinte forma: no capítulo de Revisão da Literatura, são apresentadas algumas configurações de robôs do tipo *snake*, acionados por sistemas elétricos e por ligas de memória de forma e uma revisão sobre a propriedade de memória de forma obtida com essas ligas.

Em seguida há o capítulo de Metodologia, no qual é mostrado o método utilizado para a obtenção das forças necessárias para movimentação do robô, são realizadas comparações e escolhas de componentes, são apresentados métodos para a obtenção de funções de transferência do processo e são projetados controladores para este processo.

No capítulo de Análise dos Resultados são apresentados os resultados obtidos nas medições de força, o projeto de montagem dos componentes e é realizada a comparação entre os tipos de controladores.

Por fim, no capítulo de Conclusões são indicados quais os objetivos atingidos, expõem-se os resultados das comparações entre os atuadores e entre os algoritmos de controle, além de se lançarem bases para potenciais abordagens em trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo são apresentadas algumas configurações do robô *snake* e o modo como são acionados, em seguida há um revisão das propriedades das ligas de memória de forma e por último são discutidas soluções encontradas para implementação de robôs com ligas de memória de forma.

2.1 ROBÔ SNAKE

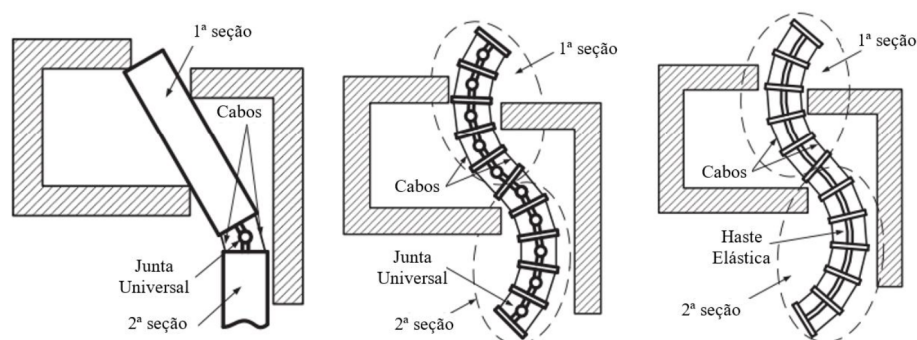
Robôs *snake* são inspirados na locomoção das cobras, esses mecanismos tipicamente consistem em módulos de juntas conectados em série capazes de se curvarem em um ou mais planos, fornecem transitabilidade em ambientes irregulares que ultrapassam a mobilidade dos tipos convencionais de robôs com rodas, esteiras e pernas (LILJEBÄCK et al., 2012). São utilizados em aplicações cirúrgicas, locomoção dentro de dutos, montagem de peças em espaços confinados e realização de inspeções nas indústrias petroquímicas (BOGUE, 2014).

Segundo Dong et al. (2014), os robôs *snake* podem ser divididos em duas categorias de acordo com suas espinhas dorsais (componente que suporta a estrutura ou habilita o movimento de curvatura, se for flexível) :

- espinhas dorsais rígidas conectadas por juntas universais;
- espinhas dorsais com hastes/tubos flexíveis como níquel-titânio (NiTi) ou borracha.

Conforme Dong et al. (2014), a estrutura do robô *snake* também pode ser dividida em 3 modelos: junta universal única, múltiplas juntas universais e espinha dorsal flexível conforme a Figura 4.

Figura 4: Modelos de estrutura de robôs *snake*.



Fonte: (DONG et al., 2014)

2.2 ROBÔS SNAKE ACIONADOS ELETRICAMENTE

Dentre os robôs *snake* existentes está o projeto descrito por Baba et al. (2010), representado na Figura 5, que propõe um método de propulsão através do movimento de rolamento helicoidal para deslocamento dentro de dutos. Este robô é constituído de módulos conectados em série com dois graus de liberdade cada, os módulos podem ser equipados com rodas passivas que são utilizadas para realizar a locomoção. Este robô é acionado por servomotores presentes em cada unidade.

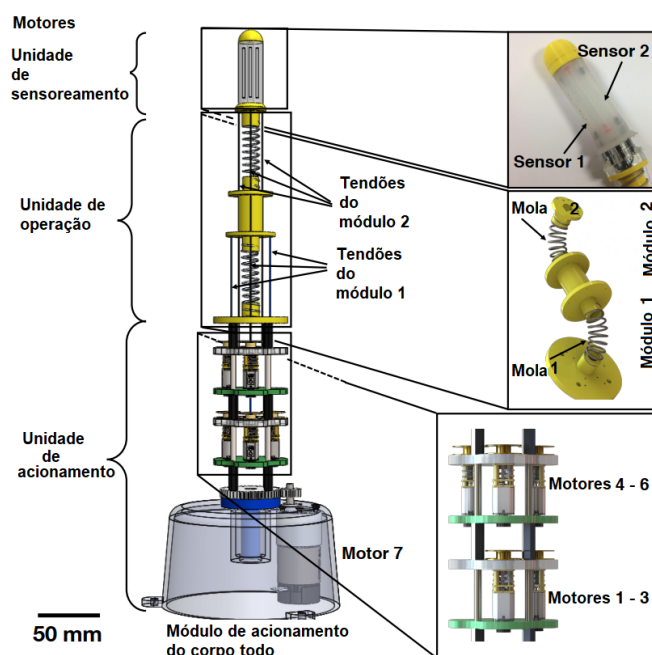
Figura 5: *Robô snake com movimentação helicoidal.*



Fonte: Adaptado de Baba et al. (2010)

Um robô inspirado em plantas é proposto por Visentin et al. (2019), este é dividido em 3 partes: unidade de acionamento, unidade de operação e unidade de sensoriamento. Na unidade de operação o modelo apresenta dois segmentos com três cabos cada, 2 molas helicoidais de compressão que funcionam como a espinha dorsal e 3 discos de plástico poliácido láctico (PLA). Na Figura 6 apresenta-se um diagrama esquemático deste robô.

Figura 6: *Diagrama esquemático do robô inspirado em plantas.*



Fonte: (VISENTIN et al., 2019).

A unidade de acionamento é localizada na parte inferior do robô e contém 7 motores, 1 para cada um dos 6 cabos e 1 para rotação em torno do eixo vertical. Os motores para acionamento dos cabos possuem *encoders* magnéticos de 12 ciclos por rotação (CPR) que são utilizados no controle de posição e velocidade. O controle é feito por uma placa customizada PIC32MX150F128B e para acionamento dos motores são utilizados 3 *drivers* LV8548MC e a comunicação é feita via RS232.

Um robô inspirado na tromba de um elefante é apresentado por Hannan e Walker (2001), este robô é composto por 4 seções com 4 juntas cada, sua movimentação é acionada pelos cabos que passam por dentro dos discos que compõem o robô. Os cabos são dispostos em pares em modos opostos para exercerem força de "puxar" e "empurrar", pois cada cabo somente exerce força de tração. Esse robô é controlado por um servo sistema de cabos que são acionados remotamente por motores de corrente contínua (CC) aliados a um sistema de polias para cada par de cabos.

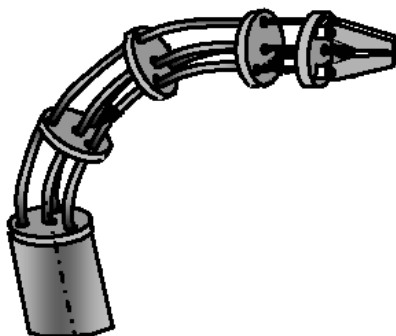
O modelo proposto por He et al. (2012) contém 3 segmentos de juntas esféricas (compostas por 2 discos de alumínio e um disco de borracha) movimentadas por 3 cabos de aço cada. Para o acionamento dos cabos de aço usa-se 9 motores de passo que são controlados por 3 computadores escravos e um computador mestre, os computadores se comunicam via protocolo CAN Bus. Cada motor é acionado por 1 *driver* e cada computador escravo controla 3 *drivers* através controle de corrente por Modulação por Largura de Pulso (PWM).

2.3 USO DE SMA EM ROBÔS

Entre as soluções de robôs acionados por SMA encontradas está o *robot crab* (FURUYA; SHIMADA; HONDA, 1989) este é feito de uma liga de níquel-titânio (nitinol) e é projetado para atuar no fundo do mar operado por controle remoto. As ligas funcionam como os "músculos" do robô e seu acionamento por pulsos elétricos o faz caminhar.

A configuração com 4 tubos superelásticos de NiTi é apresentada por Simaan, Taylor e Flint (2004), esta contém 1 tubo central configurando a espinha dorsal primária e 3 tubos equidistantes entre si e do tubo primário configurando as espinhas dorsais secundárias, nesse caso os tubos secundários são utilizados nos modos "puxar" e "empurrar" para movimentar o robô. Os tubos secundários deste projeto são acionados manualmente, este robô é apresentado na Figura 7.

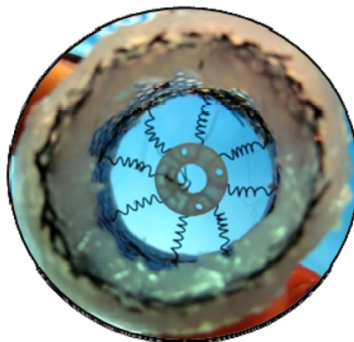
Figura 7: Diagrama esquemático de robô com tubos superelásticos.



Fonte: (SIMAAN; TAYLOR; FLINT, 2004).

Partindo da propriedade de memória das ligas com memória de forma desenvolveu-se um atuador transversal com nitinol (MAZZOLAI et al., 2012), representado na Figura 8. Nesse trabalho, são conectadas em série 8 molas em configuração radial conectadas a um anel central. As molas são ativadas eletricamente usando uma estratégia de ativação tudo/nada devido a questões de baixa controlabilidade dos SMAs.

Figura 8: Mecanismo com atuador transversal de nitinol.



Fonte: (MAZZOLAI et al., 2012).

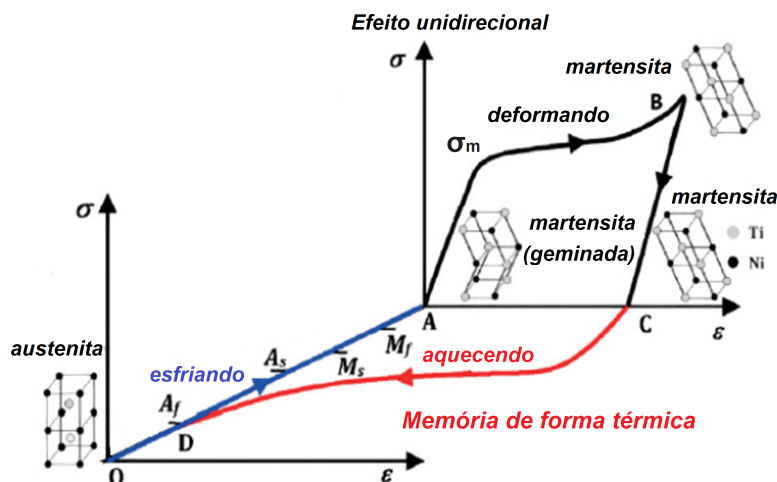
2.4 LIGAS DE MEMÓRIA DE FORMA

As ligas de memória de forma, também conhecidas como SMA (*shape memory alloy*), são materiais capazes de transformar energia térmica em trabalho mecânico (DUEBIG et al., 1990a). Essas ligas conseguem "lembrar" um formato original forjado a frio e retornar para o formato pré-deformado em resposta ao calor (MAZZOLAI et al., 2012). Os atuadores de SMA podem ser acionados eletricamente e podem ser utilizados para movimentação de robôs.

Entre as ligas com memória de forma está o nitinol que é uma liga de níquel com titânio em proporções quase equiatômicas e por meio dessa propriedade é possível obter atuadores de nitinol (MEMRY, 2017a).

A propriedade memória de forma provém da transformação reversível de fase em estado sólido da liga induzido por uma mudança de temperatura, a transformação de fase ocorre sem difusão e devido a uma distorção instantânea na rede cristalina entre B2 e B19 (MEMRY, 2017b). A transformação martensítica é definida como um cisalhamento da estrutura cristalina que ocorre devido a uma alteração na estabilidade termodinâmica do sistema. O nitinol possui geminação reversível diferentemente de transformações martensíticas em ligas de aço, que são acomodadas por movimentos irreversíveis de deslocamento, isso possibilita a volta da liga para o estado original com a mudança de fase.

Figura 9: Curva de tensão-deformação-temperatura do nitinol.



Fonte: Imagem adaptada de (MWANGI et al., 2016).

Para se utilizar a propriedade do efeito de memória de forma, primeiramente é necessário resfriar a liga abaixo da temperatura na qual a transformação da martensita a partir da austenita é completada (M_f), então deve-se aplicar tensão a fim de deformar a liga para a forma desejada. Essa deformação pode ser causada por uma força de pré-carga. Inicialmente, a liga será deformada elasticamente na fase martensita geminada até a tensão de desagregação da martensita (σ_m), na qual a martensita muda da fase martensita geminada para martensita desagregada e a tensão continua praticamente constante (MEMRY, 2017c).

Após o material ter sido deformado e a tensão ter sido descarregada, o aquecimento da liga a uma temperatura acima de A_s (temperatura na qual começa a transformação da fase martensita para austenita) faz com que o material comece a se transformar em austenita. A transformação da estrutura cristalina faz com que a liga volte para o estado original, após passar a temperatura A_f , na qual se conclui a transformação em austenita. Na Figura 9 é mostrado o processo descrito.

O atuador de nitinol é acionado pela aplicação de temperatura. Essa temperatura pode ser fornecida por fios com eletricidade conectados à liga.

3 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

Nessa seção discute-se a metodologia do projeto. Inicialmente é realizada a calibração de uma célula de carga, que em seguida é utilizada para medição das forças no robô *snake*, com base na forças encontradas para a movimentação, escolhe-se o atuador mais adequado e os componentes eletrônicos utilizados em conjunto com este atuador. Por último são discutidos métodos para o controle do robô.

3.1 MEDIÇÕES DE FORÇA

A medição de força nos cabos do *snake* é fundamental para a escolha do atuador, para realizar estas medidas é necessário o uso de uma célula de carga e este dispositivo necessita ser calibrado em um *software* de aquisição de dados para que se tenha medidas confiáveis.

Conforme estimativa passada por membros do projeto, a magnitude da força por cabo não deve ser maior que 200 N , com base neste parâmetro, escolhe-se uma célula de carga modelo SV20 da marca Alfa Instrumentos, que tem capacidade nominal de 20 kgf (196 N) a máxima sobrecarga de até 30 kgf (294 N).

Tendo em vista que a célula de carga é fabricada de acordo com as normas brasileiras, as condições apresentadas no Apêndice A foram consideradas de acordo para que o sensor fosse considerado linear e a configuração espacial em "S" da célula de carga possibilita medição da tração e compressão no eixo axial da célula de carga.

A fim de realizar a medição de força com a célula de carga, utiliza-se um sistema de aquisição de dados modelo ADS2000 IP com controlador de aquisição AC2122 da marca Lynx, este sistema é responsável por alimentar a célula de carga com 5V e medir com precisão a mudança de tensão resultante da variação da resistência causada pela aplicação de forças de tração ou compressão na célula de carga.

Para realizar a medição da variação de tensão é utilizado o circuito da ponte de Wheatstone em configuração ponte completa em paralelo com a célula de carga, conforme apresentado na Figura 10.

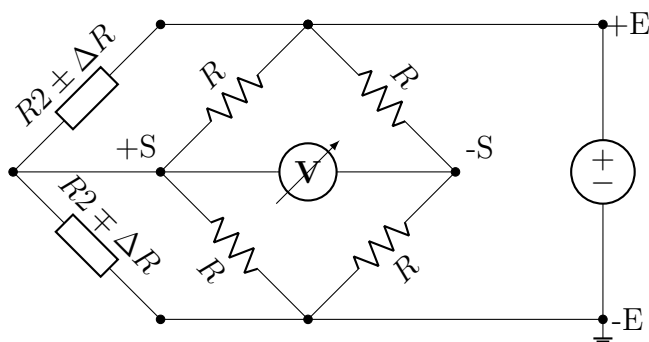
Nesse circuito as resistências "R", representam as resistências do sistema de aquisição de sinais, enquanto que "R2" representa a resistência de cada um dos *strain gauges* sem nenhuma força aplicada sobre eles e ΔR representa a variação da resistência causada pela aplicação de uma força externa. Os sinais "+E" e "-E" representam a tensão de excitação aplicada ao circuito (nesse caso, 5V) e os sinais "+S" e "-S" representam a tensão de saída gerada pela aplicação da força.

Para que os valores em tensão sejam convertidos para grandeza de força são comparados dois métodos.

O primeiro método consiste em parametrizar a célula de carga através dos valores das resistências elétricas de entrada (410Ω), resistência de saída (350Ω), confirmados

por meio de multímetro, e a sensibilidade de 2,000 mV/V. Esses valores são inseridos diretamente no *software* do programa de aquisição de dados para que este forneça o resultado da força aplicada, expresso em Newtons. A coesão dos dados é verificada por uma balança de precisão.

Figura 10: Circuito utilizado para medição da variação da tensão na célula de carga.



Fonte: Circuito elaborado pelo Autor.

O segundo método adotado é a técnica de aferição, este método consiste em obter o resultado da força aplicada através de uma balança de precisão e gerar pontos de correspondência entre tensão e força para que o software consiga traçar uma reta, correspondendo à linearidade entre a variação da resistência e a deformação do *strain gauge*. A verificação da coesão das medições é dada pela medição do peso de uma quarta peça, mostrada na Figura 11, a qual não é empregada no cômputo da linha de regressão. A comparação entre os dois métodos é apresentada na seção 4.1.

Figura 11: Peça utilizada na validação do segundo método.



Fonte: Do Autor.

3.2 MEDIÇÕES DE TENSÃO NOS CABOS

Por meio da célula de carga calibrada com incerteza de ± 1 N de acordo com a seção 4.1 e uma bancada de testes é possível medir a força necessária para movimentar o robô em determinado ângulo.

Para realizar tal medição, realiza-se um experimento no qual o robô *snake* é colocado na vertical e seus cabos são acionados manualmente a fim de deixá-lo estático em uma

posição de 90° em relação à posição "relaxada". Nessa nova posição com os cabos tensionados são realizadas as medições de força por meio da célula de carga.

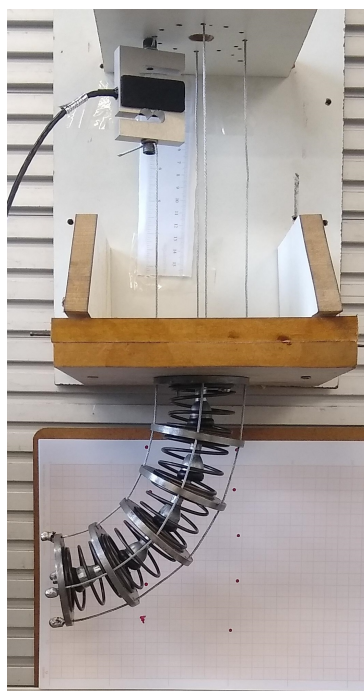
De posse destes dados de tensão, é possível projetar um sistema atuador que atenda às necessidades de força do robô. Haja vista que os cabos somente exercem força ao serem puxados, é necessário colocar dispositivos pré-tensionadores em cada cabo para evitar que fiquem folgados e possam engatar em alguma estrutura ou gerem diminuição da rigidez do robô durante seu movimento. A fim de tornar o teste mais robusto, acopla-se ao robô *snake* uma massa para simular o peso do efetuador durante o movimento.

Para realizar o pré-tensionamento dos cabos são utilizadas colocadas cargas de $0,6kg$ em cada cabo de aço, já a massa de efetuador é estimado em $1 kg$ por membros que atuam no projeto Annelida.

A fim de medir a posição do robô utiliza-se um papel milimetrado atrás do plano de movimentação do robô, neste papel são marcados os pontos do robô em seu estado relaxado e tensionado, por meio dos pontos é possível traçar retas e estimar a angulação do movimento realizado.

Na Figura 12, é possível observar um dos testes de medição de tensão do cabo.

Figura 12: Medição de tensão em cabo e posicionamento do robô.



Fonte: Do Autor.

3.3 ESCOLHA DO ATUADOR

Nessa seção são apresentados alguns tipos de atuadores que podem ser implementados no robô: o nitinol, motores de passo e servo motores.

Para a escolha do atuador, foi aplicado um fator de 2,3 em relação à média das maiores tensões obtidas nos testes de medição de força e posição, mostrados na seção 4.2. Este fator foi arbitrado uma vez que não foi possível realizar medições de tensão nos cabos em ângulos de 90° devidos às características da bancada de testes. Deste modo, obteve-se

que o atuador deveria ser capaz de fornecer pelo menos 100 N de força para cada cabo do robô.

A análise para escolha do melhor atuador se dá em duas categorias: atuador com liga de memória de forma, em especial o nitinol ou atuadores elétricos. O atuador escolhido deve ser tal que possa ser controlado, ocupe o espaço interno de um módulo de 190 mm de comprimento por 75 mm de diâmetro, podendo ter mais um módulo de mesmo tamanho dedicado para sistemas de alimentação e controle do atuador.

3.3.1 Nitinol

Os SMAs são aplicados a uma ampla gama de dispositivos, mas quase todos são produtos de duas posições. Estes dispositivos funcionam de modo a ter uma temporária forma martensítica cuja posição é trocada para "lembrar" a forma austenítica quando a liga é aquecida. Após processamento mecânico e tratamento térmico, a curva normal de movimentação x temperatura pode ser otimizada para ser controlada por um maior intervalo de temperaturas, um dos problemas relacionado a este tipo de material é histerese que ocorre nesta curva normal. (DUERIG et al., 1990b).

No robô *snake*, estas ligas podem ser utilizadas tanto para atuar nos cabos de aço quanto para substituí-los, este método construtivo economiza espaço em relação aos outros tipos de atuadores como os motores elétricos.

Através desta liga é possível controlar a posição com extrema precisão, este posicionamento pode chegar a ordem de milionésimo de polegada (DUERIG et al., 1990b), entretanto é necessário um controle de temperatura preciso para obter tal precisão. Este fato implica em ser necessário criar um sistema de resfriamento, ou ficar esperando a ação das trocas de calor com ambiente para resfriar o metal. Isso dificulta a implementação deste atuador, haja vista que o robô trabalharia em tubos obstruídos no fundo do mar, ou seja, o calor teria de ser dissipado pela parede do duto (que é resfriado pela água).

Outro ponto é que não foi possível obter a curva de comprimento esticado (ou contraído) em relação ao estado original em função da temperatura durante a fase de transformação da martensita em austenita. Para consegui-la seria necessário realizar testes em laboratório com este material para obter a curva e, em seguida, projetar o controle.

3.3.2 Atuadores elétricos

O segundo modo avaliado para a movimentação do robô *snake* foi através de atuadores elétricos. Dentre os atuadores elétricos foram pesquisados 3 tipos de atuadores rotativos: motor de corrente contínua, servo motor e motor de passo, estes motores fornecem movimento rotacional, aliado a um mecanismo para transformar seu movimento rotacional em linear. Assim, como no caso do nitinol, cada cabo necessita de um atuador, ou seja, são necessários 4 atuadores.

3.3.2.1 Motor de passo

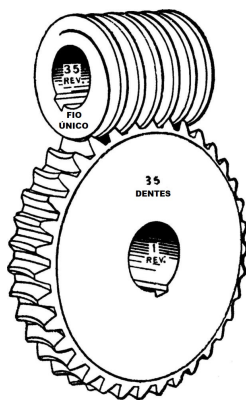
O primeiro grupo de motores elétricos rotativos analisado foi o dos motores de passo. Estes motores são acionados por pulsos elétricos e os convertem em variações

angulares (EMBARCADOS, 2023), a sequência à qual tais pulsos são aplicados é refletida diretamente na direção em que o motor gira (METRÓPOLE DIGITAL, 2023), essa característica propicia melhor precisão do movimento, outra vantagem dos motores de passo é a sua capacidade de manter a posição, o que é conhecido como torque de retenção. Apesar da precisão dos motores de passo, estes estão sujeitos a escorregamentos, o que torna necessário o uso de *encoders* para manter um controle de posicionamento preciso, conforme necessita a aplicação deste trabalho.

Tendo em vista, o espaço reduzido para a alocação de 4 motores busca-se por motores que caibam no interior do cilindro. Através de testes no *software* de modelagem 3d estima-se que os motores não podem ter tamanho maior de 30 mm de largura. Os motores de passo encontrados comercialmente com os maiores torques e *encoders* acoplados foram os motores 11HS12-0674D-E22-300 (28,6 mm de largura) e NEMA11-20-01D-AMT112S (28,2 mm de largura).

Para transformar o movimento rotativo em linear foi planejado um conjunto rosca sem fim e coroa, conforme mostrado na Figura 13. Unido à coroa há um carretel que traciona para ambos os lados, um cabo preso nele.

Figura 13: Mecanismo rosca sem fim e coroa.



Fonte: Imagem obtida de (GUENETTE, 2023)

A entrada do sistema ocorre através da rosca sem fim, à qual o atuador rotativo está conectado, e a saída é obtida na coroa. A saída do sistema resulta em uma redução na velocidade de rotação e um aumento no torque em relação ao motor. Esse mecanismo é acionado exclusivamente pela rosca sem fim, o que possibilita seu uso sem a necessidade de freio para manter a carga estática (NORTON, 2010).

O carretel deste conjunto foi arbitrado com raio de 7 mm, baseado no tamanho do módulo, a partir de então foram realizados diversos testes para se obter uma melhor relação entre torque e velocidade, que se conseguiu através de uma relação 30:1.

Uma análise das características de posição, velocidade e força é feita no Apêndice B, mostrando os cálculos usados para o motor NEMA11-20-01D-AMT112S.

Como o raio do carretel é de 7 mm, a força para atuar nos cabos em relação ao torque do motor (em Nm) é obtida numericamente conforme

$$F_{cabo} = \frac{\tau_{motor} \cdot 30 \cdot 0,4}{0,007}. \quad (1)$$

A Equação 1, leva em conta que a eficiência mínima do mecanismo rosca sem fim e coroa é de 40%, conforme Norton (2010). Nessa equação F_{cabo} refere-se à força que o

atuador realiza no cabo e τ_{motor} refere-se ao torque do motor, já o deslocamento do cabo em metros em relação a 1 volta dada pelo motor é obtida conforme

$$\Delta l = \frac{2\pi \cdot 0,007}{30} = 1,47mm, \quad (2)$$

na Equação 2, Δl é o deslocamento do cabo resultante de uma volta no eixo do motor.

3.3.2.2 Servo motores

Servo motores são motores empregados para controle de posição ou velocidade em sistemas de controle de malha fechada (ABDUL ALI; ABDUL RAZAK; HAYIMA, 2020).

Inicialmente busca-se por servo motores que já apresentem uma malha de controle fechado integrada, dois modelos deste tipo foram considerados: o mg90s e o mg996r. Estes motores não se mostraram viáveis para o escopo deste projeto devido às restrições de limite de rotação que possuem.

Por outro lado, o servo motor SV-TH06-0R2G-2-RAO, que opera com corrente alternada (CA), revela-se isento de limites de rotação, mas suas dimensões mais amplas inviabilizam a inserção de 4 destes motores dentro do módulo do robô. Além desse problema, o fato de ser CA dificulta sua implementação, requerendo a inserção de um componente adicional: o inversor de frequência, responsável por converter a tensão CC da bateria em CA. A inserção de mais um componente eletrônico no sistema é indesejada devido ao reduzido espaço dentro dos módulos.

Uma solução encontrada foi a de criar um servo motor próprio a partir de motores CC escovados, *encoders* e da criação de uma laço de controle fechado a ser implementado através de um microcontrolador.

Entre os motores avaliados como adequados para esta aplicação foi encontrado o motor Pololu 25D item #4826, cujo diâmetro é de 25 mm, possui caixa de redução de 74,83:1 e *encoder* com resolução de 12 pulsos por revolução em cada canal, este motor foi encontrado pelo preço de R\$ 314,00.

Outro motor encontrado é modelo JGA25-370-0660 com caixa de redução de 78:1 da marca Xinyongtai de 24,4 mm de diâmetro, possui *encoder* com resolução de 11 pulsos por revolução em cada canal, este motor foi encontrado pelo preço de R\$ 159,90.

A seguir, é apresentada a Tabela 1, uma tabela de decisão pela qual foi escolhido o tipo de motor, nela foram desconsiderados os atuadores de nitinol, os servo motores CC com circuito de malha fechada integrado e os servo motores de corrente alternada.

Tabela 1: Comparação entre as motores elétricos.

Critérios	Peso	Motor de passo	Motor CC Pololu	Motor CC Xinyongtai
Facilidade de controle	1	10	8	8
Espaço necessário	10	3	3	3
Força	3	10	3	3
Custo	10	1	9	10
Total		80	137	147

Na Tabela 1, quanto maior a pontuação, mais indicado é para a aplicação, os pesos foram escolhidos arbitrariamente. A partir da pontuação escolhe-se o motor JGA25-370-0660 com caixa de redução de 78:1 para a aplicação.

Os atuadores por nitinol foram descartados devido à necessidade de um sistema de resfriamento para que fosse possível implementar o controle, os servo motores CC com circuito de malha fechada integrado foram descartados, pois têm limite de rotação de apenas 180° para cada lado, o que impossibilitou a implementação de uma solução com coroa e sem fim e o servo motor CA não foi considerado devido ao seu tamanho e por necessitar de mais componentes eletrônicos que os motores CC.

3.4 CIRCUITO DE ALIMENTAÇÃO E CONTROLE

Devido à necessidade de energizar o sistema independentemente da rede elétrica é necessário utilizar uma bateria. Ajustar a tensão da bateria para ser compatível com os requisitos de alimentação dos componentes eletrônicos é essencial e isso é alcançado por meio de conversores de tensão CC-CC.

Após definida a alimentação do sistema, é necessário controlá-lo, para esta tarefa utiliza-se um microcontrolador para processar os dados e enviar pulsos elétricos para ativar corretamente o atuador. Dado que os microcontroladores possuem baixa corrente de saída, um conversor de tensão é essencial para realizar o acionamento dos motores a partir dos comandos do microcontrolador.

3.4.1 Microcontrolador

Para enviar e receber informações do usuário, torna-se necessária uma comunicação serial entre o robô e a interface do usuário que está em um computador. Esta comunicação visa informar ao robô a direção e o ângulo no qual este deve se movimentar e deve retornar para o usuário o estado atual do movimento (ângulo) e alertas, em caso de falhas. Para esta aplicação é previsto que o usuário irá passar os comandos de direção a cada dezenas de segundos ou até minutos e a informação do estado atual deve ser passada na ordem de segundos, em ambos os casos sem a necessidade de sincronia.

Baseado no número de motores e *encoders* do projeto, necessita-se de 8 entradas digitais para realizarem as leituras dos pulsos dos *encoders*, 4 entradas digitais para os sensores de efeito hall, que marcam o ponto "0", 4 entradas analógicas para os sensores de corrente que podem ser adicionados posteriormente, 8 saídas com PWM para controlar as pontes H que acionam os motores CC.

É necessário também 1 temporizador para amostrar com período constante o sinal dos *encoders* e 1 temporizador para realizar os PWM para acionamento dos inversores e 1 temporizador para realizar contagens a fim de controlar o tempo no qual a informação é passada para o usuário.

A partir dos requisitos levantados, comparou-se os módulos com microcontroladores integrados disponíveis no mercado, entre eles estão o Arduino Mega 2560 e o ESP32-WROOM-32, que são comparados a seguir.

O Arduino Mega 2560 tem dimensão de 53,3x101,5 mm, 54 pinos digitais de entrada ou saída, das quais 15 podem ser usadas com PWM, 16 têm entradas analógicas e há 4 portas seriais UART (assíncronas), cada uma com 2 pinos, um para transmissão e outro

para a recepção de dados. O microcontrolador ATMEGA 2560, que compõe este módulo possui 2 *timers* de 8-bit e 4 *timers* de 16-bit, possui memória flash (não-volátil) de 256 *KB* e 8 *KB* de memória SRAM (memória volátil). A tensão de alimentação é de 7 a 12 *V* e é encontrado pelo preço de R\$99,00.

O ESP32-WROOM-32 tem dimensional de 51x27,5 *mm*, possui 32 pinos digitais de entrada e saída, mas 6 deles são utilizados internamente pela memória flash, deixando apenas 26 pinos para serem utilizados como entradas ou saídas, dos quais 22 possuem saídas PWM, 16 possuem entradas analógicas (das quais 4 funcionam apenas como entradas) e 2 portas seriais UART, cada uma com 2 pinos. Este microcontrolador possui 4 *timers* de 64-bit, possui memória flash de 4 *MB* e 520 *KB* de SRAM. A tensão de alimentação deste circuito é 3 a 3,6 *V*. Encontra-se por R\$ 24,99.

Ambos os módulos atendem às especificações elencadas, entretanto, o dimensional reduzido e o preço levaram à escolha do ESP32-WROOM-32 para este projeto.

3.4.2 Ponte H

Para realizar o acionamento dos motores CC, como o escolhido anteriormente, é necessário um conversor de fonte CC fixa em fonte CC variável, também conhecido como *chopper* (RASHID, 1999a), pois o acionamento do microcontrolador não fornece corrente o suficiente para acionar os motores.

Dentre os tipos de *choppers*, busca-se os da classe E para o acionamento dos motores, pois estes podem gerar correntes positivas ou negativas na carga assim como tensões positivas ou negativas (RASHID, 1999b), estes conversores são conhecidos como "ponte H". Esta característica da ponte H permite o acionamento dos motores CC nos sentidos horário e anti-horário. Segundo Henriques (2017) "o termo Ponte H é derivado da representação gráfica do circuito elétrico, que se assemelha à letra H".

Os motores escolhidos requerem um conversor que seja capaz de fornecer 6 *V* e até 1,3 *A* por motor (corrente de *stall*), a temperatura de operação deve ser em torno de 4 °C e o dimensional deve ser reduzido, pois deve caber em um módulo junto da bateria, do microcontrolador e do regulador de tensão. Dentre os módulos analisados para realizar o acionamento dos 4 motores estão o L298N, o L293D, o módulo TB6612FNG e o DRV8833.

Segundo o seu *datasheet*, o módulo L298N é capaz de acionar até 2 motores CC, então para a aplicação em questão são necessários 2 destes módulos. O circuito fornece até 2 *A* por canal (corrente para cada motor), tem um dimensional de 43x43x27 *mm*, opera entre temperaturas de -20 a 130 °C e foi encontrado pelo custo de R\$ 21,90. O L293D controla até 4 motores CC por módulo, seu dimensional é de 69x53x10 *mm*, opera entre 0 a 70 °C, encontra-se pelo custo de R\$ 25,00 mas sua corrente máxima por canal é de 1,2 *A*, o que impossibilita seu uso na versão definitiva.

O TB6612FNG, consegue acionar até 2 motores CC por módulo suporta uma corrente de até 3,2 *A* por canal, tem dimensional de 21x19x3,6 *mm*, opera entre -20 e 85 °C e é encontrado pelo custo de R\$ 89,78. O DRV8833 também consegue acionar apenas até 2 motores CC ao mesmo tempo, seu dimensional é o menor dentre os analisados 18,5x16,3x3,2 *mm*, opera entre -40 e 150 °C e tem custo de R\$ 22,71.

A escolha da ponte H é dada através de uma matriz de decisão da Tabela 2, na qual quanto maior a pontuação mais indicado é o motor para a aplicação, nesta tabela, não foi considerado o módulo L293D, pois sua corrente máxima é menor que a necessária, com isso, são necessários 2 módulos para acionarem os 4 motores em todos os casos restantes.

Tabela 2: Comparação entre as pontes H.

Critérios	Pesos	L298N	TB6612FNG	DRV8833
Corrente de pico	3	8	10	8
Dimensional	10	1	8	10
Custo	8	10 (R\$21,90)	1 (R\$89,78)	10 (R\$22,71)
Temperatura	8	10	10	10
Total		194	198	284

Fonte: Do Autor.

Com base na tabela de decisão, escolhe-se o módulo DRV8833 para a aplicação final, na qual são necessários 2 módulos para os 4 motores.

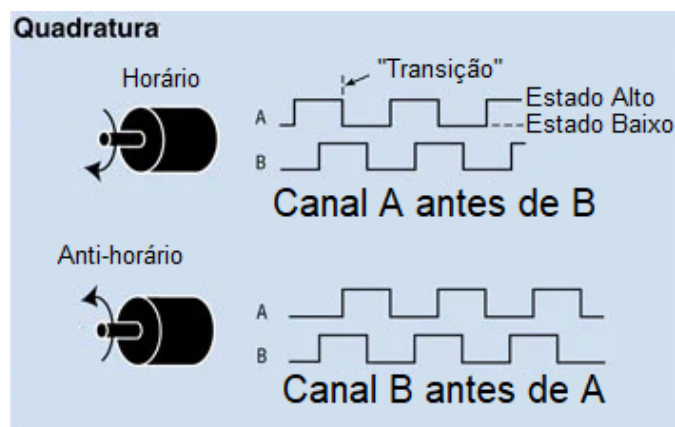
3.4.3 Encoder

Segundo Emanuel (2015) "O *encoder* é um sensor que converte um movimento angular ou linear em uma série de pulsos elétricos digitais, fornecendo para o controlador dados suficientes para traduzi-los em posição, velocidade ou aceleração". Neste trabalho utiliza-se um *encoder* para medir o movimento rotacional do motor e a partir dos dados *encoder* é possível fechar a malha de controle para controlar posição ou velocidade.

O presente projeto adota um *encoder* incremental de quadratura que possui uma estrutura com um ímã permanente acoplado ao eixo do motor e dois sensores de efeito hall defasados em espacialmente em 90° que geram sinais também defasados em 90°.

Conforme Brusamarello e Balbinot (2019a) o sensor de efeito Hall responde com uma saída em tensão elétrica proporcional à intensidade do campo quando submetido a um campo magnético. Os sinais obtidos pelos dois sensores são condicionados para enviarem sinais digitais e através da sobreposição destes dois sinais é possível obter a direção de rotação do motor verificando qual canal está adiantado em relação ao outro, conforme pode-se verificar na Figura 14, o *encoder* utilizado no projeto possui 11 pulsos por volta em cada canal.

Figura 14: Sinais obtidos pelo *encoder* para diferentes direções de rotação.



Fonte: Imagem adaptada de (DYNAPAR, 2023)

Haja vista que o *encoder* possui 11 pulsos por rotação em cada canal e uma rotação possui 360° , pode-se verificar que, para cada borda de subida de um canal, o motor rotaciona $32,73^\circ$, sabendo quantas bordas de subida ocorrem em determinado tempo pode-se obter o módulo da velocidade e comparando os dois canais no momento de uma borda de subida é possível saber a direção para a qual o motor rotaciona. Com estas informações é possível processar os sinais em um microcontrolador para obter a velocidade e posição do motor.

3.4.4 Bateria

A fim de alimentar o circuito elétrico do robô sem a necessidade de ligá-lo à rede elétrica, usa-se bateria para gerar a energia necessária. A bateria deve fornecer tensão CC e sua corrente deve ser capaz de alimentar os circuitos eletrônicos e suportar as demandas de pico do motor em condições extremas.

Uma comparação dos tipos de baterias em relação a dimensional, massa, corrente máxima de descarga, ciclo de vida, custo e temperatura de operação é realizada no Apêndice C, na qual escolhe-se uma bateria de lítio-íon (Li-Íon) para a alimentação dos circuitos de $7,2\text{ V}$, 5200 mAh , com 4 células 18650, sendo 2 em série e 2 em paralelo, podendo fornecer até $10,4\text{ A}$ continuamente.

3.4.5 Regulador de tensão

Com o objetivo de reduzir a tensão vinda das baterias para alimentação dos motores e módulos é necessária a introdução de reguladores chaveados, estes circuitos integrados convertem uma tensão CC não-regulada em uma tensão CC regulada de saída (RASHID, 1999d). Em reguladores do tipo Buck a tensão média de saída é menor que a tensão de entrada (RASHID, 1999c).

Os reguladores *Buck* desempenham um papel essencial neste projeto, uma vez que é necessário um circuito que reduza a tensão de $7,2\text{ V}$ que vem da bateria de lítio-íon para $3,3\text{ V}$ e forneça pelo menos 1100 mA . Essa corrente é a demanda máxima consumida pelo ESP32-WROOM-32 segundo seu *datasheet*, o que é razoável imaginar tendo em vista que todos os seus pinos de entrada e saída são utilizados.

Já para a alimentação dos motores é necessário reduzir a tensão para 6 V , e deve ser capaz de suporta até $5,2\text{ A}$ no caso mais extremo.

Para o microcontrolador são avaliados os reguladores de tensão com possibilidade de saídas fixas de $3,3\text{ V}$, o LM1117, TLV761 e o AMS1117, entretanto nenhum deles fornece corrente maior que 1100 mA , o que torna inviável para aplicação. Para a alimentação dos motores também avaliou-se o LM7806, um circuito integrado capaz de fornecer saída de tensão fixa de 6 V , entretanto, sua corrente máxima de apenas 500 mA é menor do que o requisitado para a aplicação em questão.

Como não foram encontrados reguladores de tensão de saída fixa capazes de fornecer corrente o suficiente para os dispositivos, buscou-se por reguladores de tensão com saída ajustável.

Dentre eles compara-se o LM317, LM2596, XL6009 e o XL4005. Esses circuitos foram pesquisados por seus módulos, ao invés de apenas o circuito integrado, pois os módulos já contam com circuito de proteção a um preço acessível. Eles foram comparados segundo suas correntes de saída limites (I_L) e tamanho dos módulos:

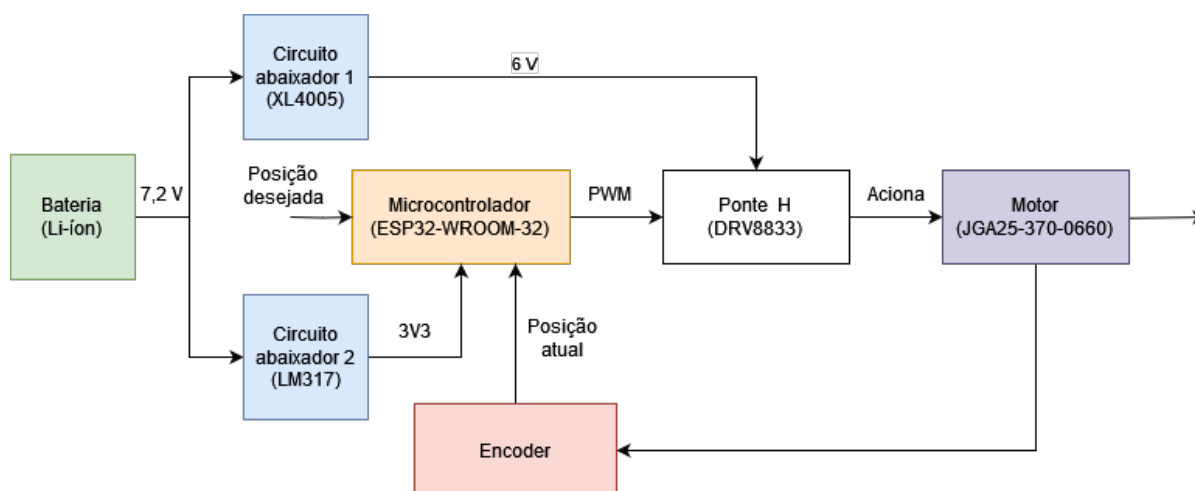
Tabela 3: Comparação entre os reguladores de tensão.

Critérios	LM317	LM2596	XL6009	XL4005
I_L	3,4 A	3 A	4 A	8 A (com dissipador)
Tamanho (mm)	36x23x12	43x21x14	44x21x18	43x21x14 (sem dissipador)

Fonte: Do Autor.

A partir da Tabela 3, escolhe-se o XL4005 para a alimentação da ponte H e motores por ser o único capaz de fornecer 5,2 A em caso limite e escolhe-se o módulo LM317 para o microcontrolador por ser o menor dentre os módulos analisados e fornecer corrente suficiente.

O diagrama que mostra a integração entre os sistemas elétricos para alimentação e controle do robô pode ser visto na Figura 15.

Figura 15: Diagrama de blocos dos circuitos de alimentação e controle.

Fonte: Do Autor.

3.5 CONTROLE

Essa seção trata da comparação entre os métodos de controle por *bang-bang* e proporcional integral derivativo (*PID*) utilizados no projeto.

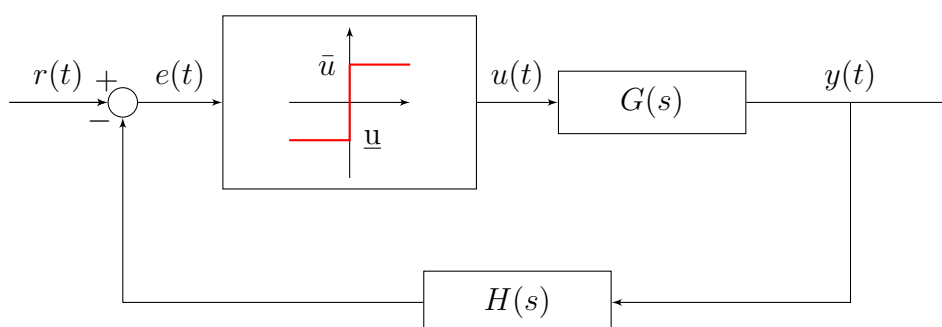
3.5.1 Bang-Bang

O primeiro tipo de controle implementado foi um *bang-bang*. Este controlador pode assumir apenas 2 valores dependendo do valor do erro; se este for um valor negativo, a saída é \underline{u} , se for positivo a saída do controlador é \bar{u} , sendo que \underline{u} é o valor de saída mais baixo e \bar{u} é o valor mais alto. No caso implementado, \bar{u} é equivalente a um sinal de entrada

da alimentação dos motores com PWM com *duty cycle* de 100 % em uma direção e \underline{u} é também um PWM com *duty cycle* de 100 %, mas na direção contrária.

De acordo com Bazanella e Silva Jr (2005a) o sinal de controle é indefinido para um erro igual a 0 e pode levar a chaveamentos espúrios, para evitar tal problema usa-se histerese. Dessa forma, o sinal de controle só é \bar{u} se o erro for maior que um determinado valor positivo e^+ e \underline{u} caso seja menor que um determinado valor negativo e^- . O digrama do controlador *bang-bang* é apresentado na Figura 16.

Figura 16: Diagrama de blocos para controle *bang-bang*.



Fonte: Do Autor.

No controle implementado os erros são $e^+ = 1^\circ$ e $e^- = -1^\circ$, estes valores dos erros foram arbitrários considerados satisfatórios para a precisão do posicionamento do motor, deste modo, ao invés de continuar acionando o motor nos erros entre este intervalo e gerar um sinal com ciclo limite, o controle para de acionar o motor e aceita-se este pequeno erro. Caso a inércia do motor leve-o para além da posição desejada, o controle atua de modo a corrigir o movimento.

3.5.2 Método da resposta ao salto

Para se projetar um controlador é necessário conhecer o processo a ser controlado. Com as informações do Apêndice D, verifica-se que a função de transferência da velocidade de saída em relação à tensão de armadura é um sistema linear de primeira ordem, tendo em vista a falta de informações para as constantes mecânicas e elétricas do motor, é possível utilizar o método da resposta ao salto para extrair as constante de tempo e o ganho estático deste processo.

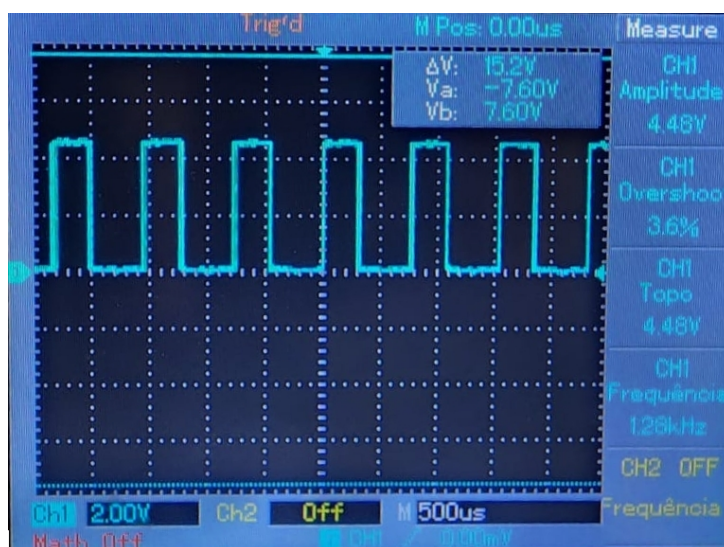
Para a utilização deste método na função de transferência de $\omega(s)/E_a(s)$, aplica-se um sinal de tensão do tipo salto na entrada do sistema (tensão de armadura) e mede-se a saída (velocidade angular).

Para a realização deste experimento é necessário saber qual o período de amostragem do sinal para que não haja perda de informação. Segundo Astrom e Wittenmark (1997), recomenda-se escolher um período de amostragem tal que haja de 4 a 10 amostras por tempo de subida para sistemas não-oscilatórios e de 4 a 10 amostragens por período para sistemas oscilatórios. Deste modo buscou-se realizar aproximadamente 10 amostras por período dos pulsos dos *encoders* e aproximadamente 10 amostras de velocidade para o tempo de subida da curva de velocidade.

Com o intuito de realizar a amostragem do sinal dos pulsos de *encoder* foi monitorado apenas um canal em regime permanente após aplicar-se um salto de 4,9 V na alimentação do motor. Através dos dados do osciloscópio, foi observado que são necessárias amostras de aproximadamente 0,08 ms de período para amostrar os intervalos entre os pulsos do *encoder*, cujo período é cerca de 0,8 ms.

Na Figura 17 é possível observar o sinal amostrado por osciloscópio, na qual cada quadro pontilhado indica um período de 500 us na horizontal e 2 V na vertical.

Figura 17: Pulsos de 1 canal de *encoder* em regime permanente alimentado por 5 V.



Fonte: Do Autor.

Através do período dos pulsos detectados no osciloscópio também foi possível determinar a velocidade do motor em regime permanente em rotações por minuto, conforme:

$$\omega_{RP} = \frac{60}{\frac{T_{pulso}}{1000} \cdot 11 \cdot 78} = 87,41 \text{ rpm},$$

na qual ω_{RP} é a velocidade em regime permanente e T_{pulso} refere-se ao tempo entre pulsos do *encoder* em ms.

Para a amostragem da velocidade, é necessário computar o número de pulsos do *encoder* em determinado período de tempo e realizar o cálculo da velocidade, conforme informado na seção 3.4.3. Sendo assim, utilizou-se 1 motor com seu *encoder*, 1 ponte H L293D e 2 placas Arduino UNO (uma para acionar a ponte H e outra para medir os sinais dos *encoders*) para realizar o método do salto unitário.

Em seguida foi realizada uma bateria de 5 testes com os 2 módulos Arduino, no qual foram realizadas 1600 medições de 0,1 ms com entradas variando de 4,84 V a 4,89 V, com *duty cycle* de 100%. Nesses casos a velocidade em regime permanente variou entre 87,41 (20 pulsos em 16 ms) e 91,78 rpm (21 pulsos a cada 16 ms). A média das velocidades obtidas ficou em 89,69 rpm (538,11 °/s) para uma tensão de entrada média de 4,87 V.

Após estes primeiros 5 testes foram realizados outros 5 testes para avaliar a constante de tempo dominante T, que é definida como: "o tempo que a variável de processo demora para atingir 63% de sua variação total, passado o tempo do atraso aparente." (BAZANELLA; SILVA JR, 2005d).

Como a velocidade de regime permanente média encontrada foi de 89,69 rpm, o tempo para chegar a 63% deste valor é o valor de T no qual a velocidade esteja em no mínimo 56,50 rpm, a média dos 5 testes realizados deu $T = 64 \text{ ms}$. Lembrando que os testes foram feitos com 7 a 8 amostras de velocidade para o tempo de subida (tempo transcorrido para a resposta ir de 10 a 90% do valor final, de 8,97 a 80,72 rpm) e que o tempo T de cada teste refere-se à primeira medida maior que 63% do valor em regime permanente.

Sabendo que o modelo do motor é uma função de transferência de primeira ordem, conforme visto no Apêndice D, que a constante $T = 64 \text{ ms}$ e que a velocidade em regime permanente é de $538,11 \text{ }^\circ/\text{s}$, utiliza-se o teorema do valor final para se encontrar as constantes da função de transferência do processo, conforme:

$$\omega_\infty = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot r(s) \cdot G(s) = 538,11^\circ/\text{s}, \quad (3)$$

na qual ω_∞ refere-se à velocidade de rotação do motor em regime permanente em $^\circ/\text{s}$, $r(s)$ é o valor da entrada sistema (em V) de acordo com a transformada de Laplace e $G(s)$ é a função de transferência do processo. Expandindo a Equação 3, obtém-se

$$538,110^\circ/\text{s} = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \frac{4,8740}{s} \cdot \frac{K/T}{s + 1/T}, \quad (4)$$

onde K é o ganho do processo. Substituindo T por $0,064 \text{ s}$ na Equação 4, obtém-se:

$$K = 110,4046$$

e conseqüentemente a função de transferência de tensão de armadura para velocidade (em $^\circ/\text{s}$) é

$$G(s) = \frac{1725,0719}{s + 15,6250}.$$

Para posição, usa-se um integrador junto da função de transferência da velocidade, assim, obtém-se:

$$G(s) = \frac{1725,0719}{s(s + 15,6250)}. \quad (5)$$

3.5.3 PID

A partir da Equação 5, obtida no método de resposta ao salto, projeta-se o controlador PID pelo método do lugar das raízes com o apoio do simulink e do rltool, ferramentas do *software* MATLAB.

No controle projetado, o proporcional aplica um ganho ao erro mantendo o sinal para diminuir este erro ao longo do tempo. Como busca-se seguir referências de posição do tipo salto, coloca-se um integrador no controlador e, a fim de antecipar o comportamento do sistema e torná-lo mais rápido, o derivativo aplica um sinal proporcional à derivada do erro.

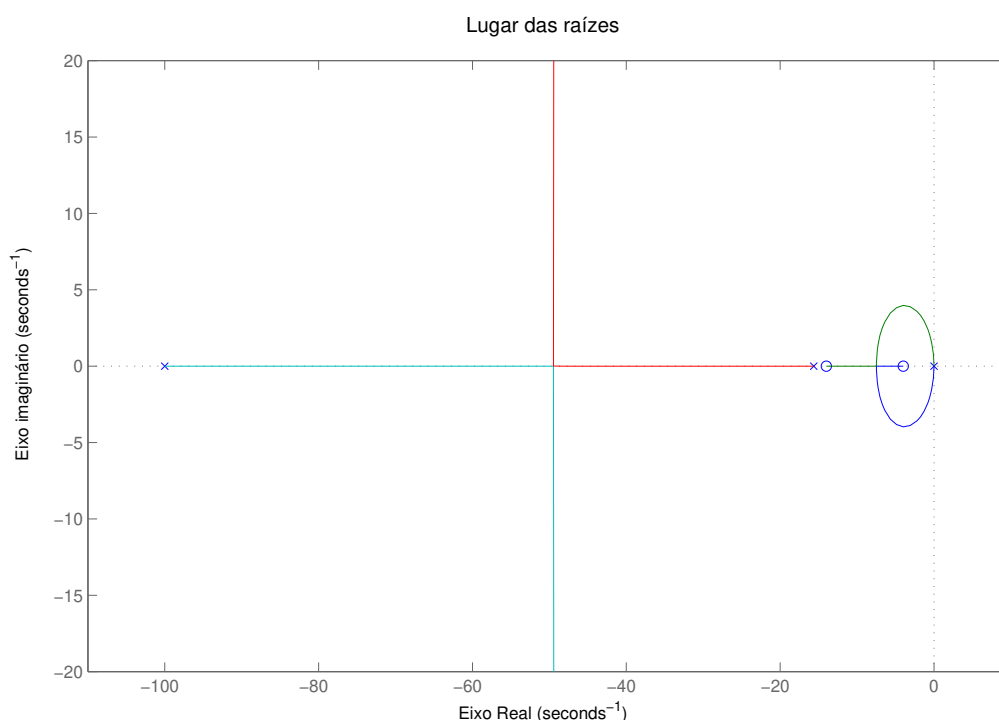
O controlador é projetado com um polo em 0 s^{-1} (integrador), um polo em -100 s^{-1} para limitar a ação do derivativo e torná-lo causal e coloca-se dois zeros entre o polo do processo ($15,6250 \text{ s}^{-1}$) e 0. Neste controlador não se cancela o polo da planta a fim de rejeitar perturbações do tipo salto.

A partir do lugar das raízes (LGR), o ganho é escolhido de modo que na função de transferência do sistema haja apenas raízes reais (-51, -47,9, -11,5 e -5,18) a fim de evitar *overshoot* no seguimento de referências. O controlador foi projetado conforme a seguinte equação:

$$C(s) = 4,5 \frac{(s + 4)(s + 14)}{s(s + 100)}. \quad (6)$$

O Lugar das raízes pode ser observado em destaque na Figura 18.

Figura 18: Lugar das raízes.



Fonte: Do Autor.

Ao aplicar este controlador da Equação 6 na prática, o motor trava próximo ao chegar à posição desejada, isso ocorre devido ao atrito da caixa de redução do motor, que necessita de um *duty cycle* maior que 39% com uma entrada de 5 V para se movimentar (dado obtido empiricamente). Esses travamentos por atrito aliados à saturação do controlador, que pode fornecer no máximo até a mesma tensão de entrada, geram não linearidades no sistema.

Para combater a não linearidade gerada pelo atrito, aceita-se erro de 1 grau em regime permanente. O programa do controlador envia um sinal nulo quando o erro é menor que 1 para que se reduza a movimentação do motor nesta faixa de operação e mantenha-se dentro dos limites desejados.

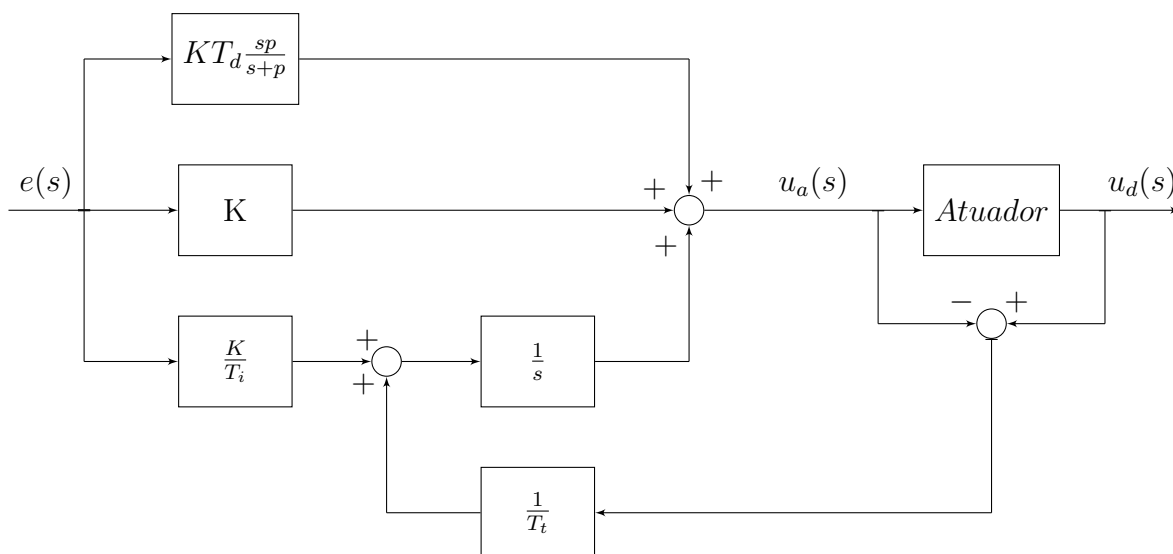
3.5.3.1 Laço de anti wind-up

O fato de o controle apresentar limites (pode apenas introduzir um sinal de controle de 0 V à tensão de entrada) faz com que, dependendo da referência, o esforço de controle

gerado pelo controlador seja maior que do que o dispositivo possa entregar, isso gera a saturação do sinal de controle. Caso o controlador tenha uma ação integral, esta continua integrando o erro, fazendo-o ser carregado excessivamente. Para voltar a operar na região linear é necessário que o termo integral descarregue, para isso usa-se o laço de *anti-wind-up*, conforme descrito por Bazanella e Silva Jr (2005c).

Esse laço introduz uma realimentação extra no controle que calcula a diferença entre a entrada e a saída do atuador, o resultado é somado à ação integral, conforme pode ser visto na Figura 19. Este método é utilizado no trabalho para combater as não linearidades advindas da saturação do controlador.

Figura 19: Laço *anti-wind-up*



Fonte: Adaptado de (BAZANELLA; SILVA JR, 2005c).

Segundo Bazanella e Silva Jr (2005c) uma regra empírica sugerida para a constante de tempo T_t é:

$$T_t = \sqrt{T_i T_d}.$$

3.5.3.2 Discretização do controle

Para a implementação digital do controlador PID contínuo, foram utilizadas as seguintes equações de diferenças:

$$erro(k) = r(k) - y(k) \quad (7)$$

$$P(k) = K \cdot erro(k) \quad (8)$$

Na qual k refere-se à k -ésima amostragem do sinal cujo período é de $T = 0,1 \text{ ms}$, o $erro(k)$ é a diferença entre a saída $y(k)$ e a referência $r(k)$, o ganho proporcional é representado por K e a ação proporcional na amostra k é $P(k)$.

A ação integral é implementada por transformação bilinear tal qual a ação derivativa, conforme indica Bazanella e Silva Jr (2005b), nela T_i refere-se à constante de tempo de integração. Para contemplar a ação do laço de *anti-wind-up* também foi adicionado o

termo equivalente advindo da diferença dos sinais antes e depois do atuador, dif , somado a K/T_i antes do integrador.

$$I(k) = I(k-1) + \frac{KT}{T_i} \frac{e(k) + e(k-1)}{2} + \frac{T}{T_t} \frac{dif(k) + dif(k-1)}{2} \quad (9)$$

Na ação derivativa, T_d refere-se à constante de tempo derivativa e p é o polo limitador utilizado para tornar a ação derivativa causal e limitar o ganho de altas frequências no sistema.

$$D(k) = \frac{2-pT}{2+pT} D(k-1) + \frac{pKT_d}{1+pT} (e(k) - e(k-1)) \quad (10)$$

A saída do controlador $u_a(k)$ é dado pela soma dos termos P, I e D.

$$u_a(k) = P + I + D \quad (11)$$

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo é feita uma comparação dos resultados obtidos com os controladores projetados.

4.1 COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO DA CÉLULA DE CARGA.

A balança de precisão utilizada para a confirmação dos dados é do modelo AC10K da marca Marte, esta balança é capaz de medir massas de 5 g a 10 kg e possui classe 2 e valor de divisão de verificação "e" = 1 g, o que implica que sua incerteza é de ± 1 g para massas de até 5kg e de ± 2 g para massas de até 10 kg (INMETRO, 1994).

Os objetos padrões utilizados no experimento foram 3 blocos metálicos similares ao bloco representado na Figura 20 e a conversão entre massa e peso para os dois métodos foi obtida por meio da aceleração gravitacional $g = 9,81$ m/s².

Figura 20: Bloco metálico utilizado no ajuste da célula de carga.



Fonte: Do Autor.

Os resultados para o método da parametrização do software a partir dos valores de *datasheet* (1º método) são demonstrados na Tabela 4.

A linearidade foi comprovada através do primeiro método, conforme é possível verificar na Figura 21, entretanto os resultados foram mais próximos à estimativa da balança através do segundo método que, por este motivo, foi o método escolhido para o ajuste da célula de carga.

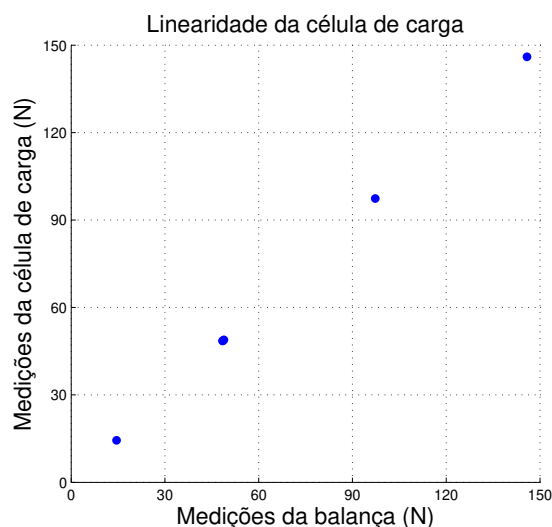
Os resultados do método da técnica de aferição (2º método) são demonstrados na Tabela 5.

Tabela 4: Comparação entre pesos obtidos pela balança e através da célula de carga parametrizada.

Bloco	Peso balança (N)	Peso Célula de carga (N)	Diferença
1	48,4408	46,61	3,779%
2	48,5418	46,64	3,918%
3	48,8558	46,12	5,600%
1+2	97,2966	93,30	3,798%
1+2+3	145,8384	139,45	4,380%

Fonte: Do Autor.

Figura 21: Comparação entre as medidas obtidas através de balança de precisão e célula de carga, demonstrando a linearidade da célula de carga.



Fonte: Do Autor.

Tabela 5: Comparação entre pesos obtidos pela balança e através da célula de carga aferida.

	Peso balança (N)	Peso Célula de carga (N)	Diferença
Bloco 1	48,4408	48,5	-0,122%
Bloco 2	48,5418	48,6	-0,120%
Bloco 3	48,8558	48,9	-0,090%
Bloco 1+3	97,2966	97,4	-0,106%
Bloco 1+2+3	145,8384	146,0	-0,111%
Peça de validação	14,5316	14,4	0,217%

Fonte: Do Autor.

Para a confirmação das medições da célula de carga com uma incerteza de $\pm 1N$ e nível de confiança de 95% foi realizado o cálculo para se obter o número correto de

amostras necessárias, conforme:

$$n = \left(\frac{z\sigma}{\Delta}\right)^2, \quad (12)$$

a Equação 12 foi obtida de (BRUSAMARELLO; BALBINOT, 2019b), na qual n representa o número de amostras, Δ representa a incerteza de medição, z é o número de desvios padrões correspondentes para se chegar ao nível de confiança desejado, σ é o desvio padrão da balança de precisão.

Para concluir este cálculo foi necessário descobrir o desvio padrão em Newtons da célula de carga, para tal, foi utilizada sensibilidade do equipamento, conforme o *datasheet* de 2,0000 mV/V $\pm 10\%$, o que implicou em uma incerteza de precisão de $\pm 0,2$ mV/V. Como a fonte utilizada para se alimentar o circuito foi de 5 V, a incerteza foi de 1 mV/V.

A partir deste resultado em tensão elétrica, foi necessário transformá-lo para seu correspondente valor em força. Este procedimento foi feito através da equação da reta obtida pela aferição, dada por:

$$N = -1040,81 \cdot V,$$

na qual N representa a força aplicada sobre a célula de carga e V a tensão em volts medida pelo módulo de aquisição de sinais. Para uma variação de $\pm 1mV$, a correspondente em força foi de $\mp 1,04081$ N.

Então, a fim de se obter medições com incerteza de $\pm 1N$, com 95 % de confiança (o que implica em 1,96 desvios padrão) e sendo a incerteza da célula de carga equivalente a 1,04081 N, obteve-se um total de 5 amostras para cada medição, conforme:

$$n = \left(\frac{1,96 \cdot 1,04081}{1}\right)^2 = 4,16,$$

Em seguida foram realizados experimentos em laboratório utilizando a medição de uma balança de precisão para se confirmar a teoria desenvolvida. Os resultados destes experimentos podem ser vistos no Apêndice E. Por meio dos experimentos, pode-se observar que nenhuma das medições feitas com a célula de carga foi mais de 1 N diferente das medições realizadas com a balança.

4.2 MEDIÇÃO DE TENSÃO NOS CABOS E POSIÇÃO DO ROBÔ SNAKE

Por meio de medições com papel milimetrado e análise de imagens foram medidos 4 ângulos para a célula quase antes de tocar no fim de curso (limitado devido à inserção da célula de carga). Foram eles: $-81,09^\circ$, $-78,97^\circ$, $-74,95^\circ$ e $-81,09^\circ$. As 4 medições têm uma média de $-79,02^\circ$.

Com isso, foram feitos testes de carga para avaliar a ordem de grandeza de força necessária para levar o robô do estado de repouso a 0° para o estado de maior esforço a $-79,02^\circ$ com objeto na ponta do robô ou sem, conforme Tabela 6, na qual a última linha refere-se à média dos valores.

Tendo em vista os testes realizados com o robô *snake* pré-tensionado com uma carga de 5,88 N e com uma carga de 9,81 N na ponta, a diferença de força entre o estado a 0° e o estado a 79° implica na necessidade de no mínimo 37,04 N por cabo para se movimentar a estrutura do robô mais uma carga de 9,81 N em 79° no ar.

Tabela 6: *Medições de tensão em 1 cabo tensionado entre 0 e 79°.*

Medições de tensão em robô <i>snake</i> com 4 cabos					
Pré tensão de 600 g/cabo sem carga na ponta		Pré tensão de 600 g/cabo + 600g carga na ponta		Pré tensão de 600 g/cabo + 1kg carga na ponta	
Tensão em 0° (N)	Tensão em 79° (N)	Tensão em 0° (N)	Tensão em 79° (N)	Tensão em 0° (N)	Tensão em 79° (N)
6,4	22,7	6,9	33,9	4,6	42,2
6	23,3	6,6	34	4,6	43
6,4	21	5,6	33,9	4,5	42,8
6,6	20,2	6,4	36,2	4,4	42
7,3	20	5,6	35	6,9	40,2
6,5	21,4	6,2	34,6	5	42,0

Fonte: Do Autor.

4.3 FABRICAÇÃO DAS PEÇAS

A estrutura para ser inserida dentro dos módulos e que contém os motores, eixos, mancais, mecanismo coroa parafuso sem fim, barras roscadas e suportes para estabelecer os sistemas de movimentação no espaço são modelados em 3D por meio de desenho assistido por computador (CAD). Os componentes foram projetados para serem fabricados por usinagem, os rolamentos foram projetados para serem fixados aos mancais por ajustes com interferência, "no qual ocorre uma interferência entre o furo e o eixo quando montados, isto é, a dimensão máxima do furo é sempre menor ou, em caso extremo, igual à dimensão mínima do eixo" (ABNT, 1995).

Figura 22: *Vista inferior da estrutura que contém mecanismos e atuadores.*

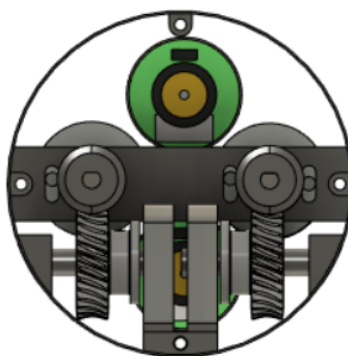


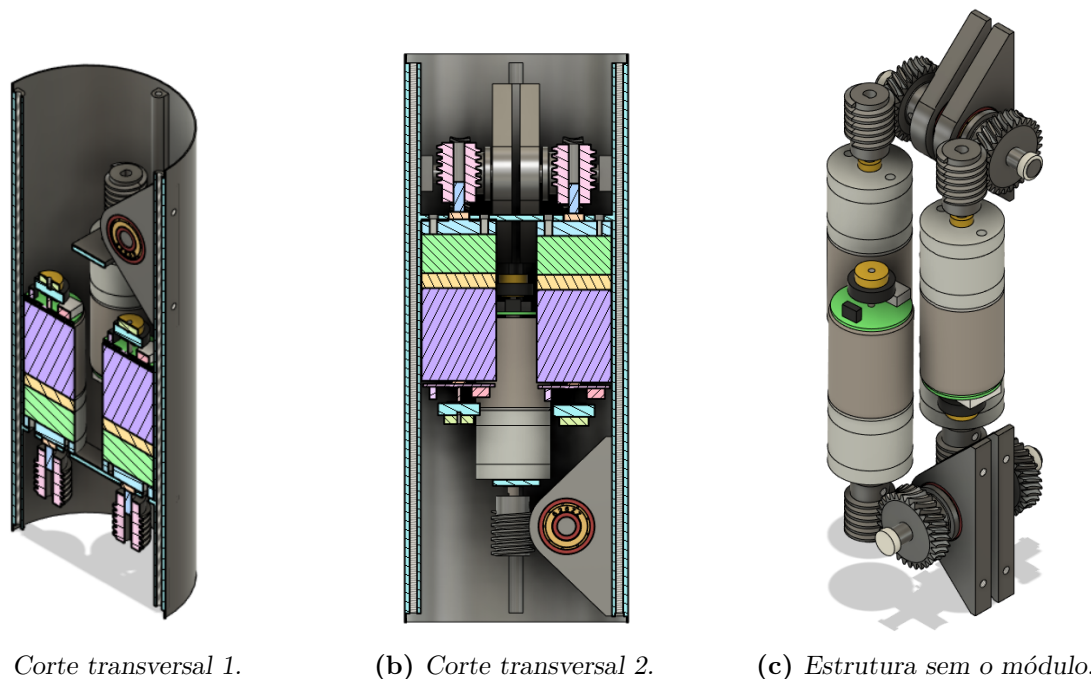
Figura 23: *Estrutura para ser inserida no módulo do projeto contendo mecanismos e atuadores.*

Fonte: Do Autor, desenhado no *software* Fusion 360.

A fim de fazer uma estrutura mais simples de ser usinada, as peças foram divididas em estruturas menores (anéis) que são unidas por barras roscadas e presas por porcas nas pontas e alguns do anéis do conector há furos externos para facilitar a fabricação e o encaixe dos eixos. A vista inferior pode ser observada na Figura 23.

Já a estrutura em corte e sem o módulo pode ser vista na Figura 24. Esta estrutura cilíndrica é projetada para ser inserida em módulos com espaço interno de 190x75 mm de diâmetro.

Figura 24: Estrutura para ser inserida no módulo do projeto contendo mecanismos e atuadores.



(a) Corte transversal 1.

(b) Corte transversal 2.

(c) Estrutura sem o módulo.

Fonte: Do Autor, desenhado no *software* Fusion 360.

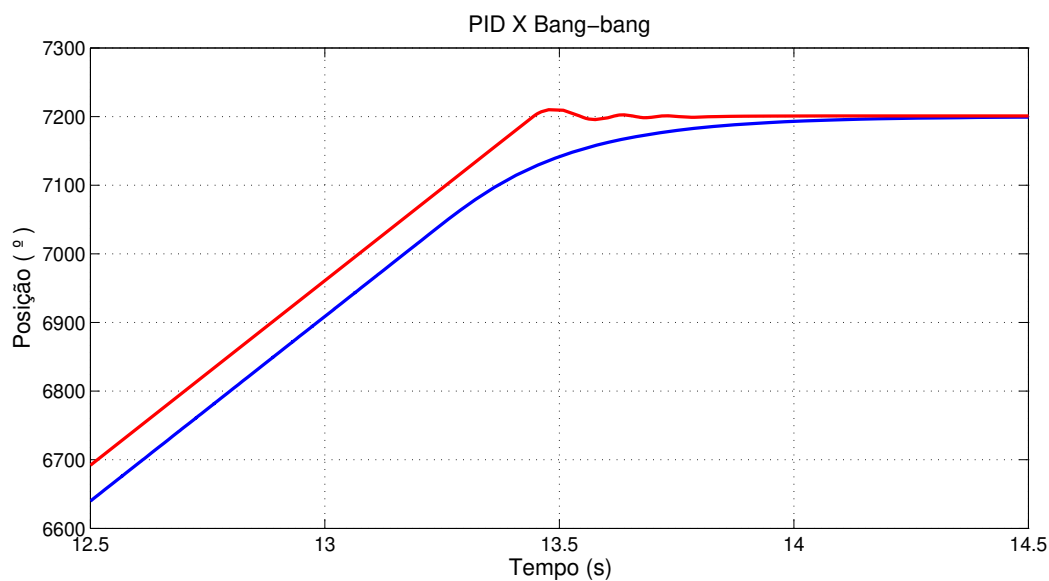
4.4 BANG-BANG OU PID

Essa seção compara os tipos de controle implementados, para isso foram levados em consideração os tempos de acomodação, *overshoot* e possibilidade de replicação no protótipo completo.

Na Figura 25 é possível observar a curva resultante de uma entrada do tipo salto para uma posição de $7200 \text{ }^\circ/s$, 20 voltas no eixo de saída após a caixa de redução, em função do tempo para os controladores *bang-bang* (vermelho) e PID (azul). A comparação de ambas as curvas indica que o *bang-bang* possui maior *overshoot* e menor tempo de acomodação.

No projeto em questão, variações de poucos segundos para se chegar à posição desejada são desprezíveis e as oscilações em torno da referência devem ser as mínimas possíveis, esta análise levaria à escolha do PID como o controlador a ser implementado no trabalho, entretanto a prática mostra que a não linearidade causada pelo atrito seco na caixa de redução do motor, que não foi considerada na simulação, implica em uma maior lentidão na resposta levando o tempo de estabilização para 26 segundos para ambos os controladores. Em ambos os controles implementados na prática também houve *overshoot* sendo o sobrepasso do *bang-bang* maior que o do PID. Este também apresenta a desvantagem de não ter sido implementado para o sistema acoplado, o que mudaria a função de transferência do processo deixando-o mais lento.

Figura 25: Comparação entre os controladores *bang-bang* e *PID*, para uma entrada do tipo salto.



Fonte: Do Autor.

Levando em conta essas considerações indica-se o controle *bang-bang* para a implementação no robô, pois é mais genérico e pode ser implementado sem a realização de novos testes para identificar o novo processo. Em um segundo momento, recomenda-se levantar a função de transferência do sistema motor + mecanismos e projetar-se um PID de forma análoga ao visto na seção 3.5.3.

5 CONCLUSÕES

Os objetivos do trabalho foram alcançados, definiram-se os atuadores a serem utilizados, o mecanismo de redução (rosca sem fim e coroa), a bateria para alimentação do circuito eletrônico junto do circuito abaixador para nivelar a tensão para as corretas tensões de alimentação do microcontrolador e dos motores, foram definidos os microcontroladores e *drivers* para acionamento dos motores e foram implementadas duas técnicas de controle que foram capazes de levar o motor à posição desejada.

Das duas técnicas de controle o PID apresentou menor sobrepasso, entretanto devido à impossibilidade da integração dos sistemas devido a falta de uma bancada de testes pronta a tempo, o *bang-bang* é o mais indicado para implementação no robô em um primeiro momento, pois o PID pode apresentar dinâmicas não conhecidas previamente devido a falta de um ensaio de resposta ao salto com todo o mecanismo acoplado. Em um segundo momento é possível refazer o teste com a bancada pronta e reprojeter o PID.

Para evitar oscilações contínuas em torno da referência foi inserido um bloco de código para desligar o controle quando este estivesse em um erro pequeno, essa técnica foi necessária pois o atrito seco presente na caixa de engrenagem gerou não linearidade em baixas rotações.

Em trabalhos futuros para melhoria deste projeto recomenda-se realizar os testes de controle de posição na bancada pronta, projetar um controle de torque através de sensores de corrente e projetar um controlador que tenha múltiplas entradas (4 motores) e múltiplas saídas, para isso é recomendado um estudo mais detalhado do controle baseado na cinemática deste robô.

REFERÊNCIAS

- ABDUL ALI, A. W.; ABDUL RAZAK, F. A.; HAYIMA, N. A Review on The AC Servo Motor Control Systems. *ELEKTRIKA- Journal of Electrical Engineering*, v. 19, n. 2, p. 22–39, ago. 2020. DOI: 10.11113/elektrika.v19n2.214. Disponível em: <https://elektrika.utm.my/index.php/ELEKTRIKA_Journal/article/view/214>.
- ABNT. *NBR-6158: Sistema de tolerâncias e ajustes*. Rio de Janeiro, 1995.
- ANJOS, T. A. DOS. *Pilhas e Baterias*. [S.l.]. Disponível em: <<https://mundoeducacao.uol.com.br/fisica/pilhas-baterias-1.htm>>. Acesso em: 3 set. 2023.
- ASTROM, K. J.; WITTENMARK, B. Selection of Sampling Rate. In: *COMPUTER-CONTROLLED Systems theory and design*. 3. ed. [S.l.]: Prentice Hall, 1997. cap. 2, p. 66. ISBN 7-302-05008-2.
- BABA, T. et al. A snake robot propelling inside of a pipe with helical rolling motion. In: *PROCEEDINGS of SICE Annual Conference 2010*. [S.l.: s.n.], 2010. P. 2319–2325.
- BAZANELLA, A. S.; SILVA JR, J. DA. Ação bang-bang. In: *SISTEMAS de controle: princípios e métodos de projeto*, 1. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2005a. P. 33. ISBN 978-85-216-3584-0.
- BAZANELLA, A. S.; SILVA JR, J. DA. Implementação digital. In: *SISTEMAS de controle: princípios e métodos de projeto*, 1. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2005b. P. 68. ISBN 978-85-216-3584-0.
- BAZANELLA, A. S.; SILVA JR, J. DA. Laço anti-wind-up. In: *SISTEMAS de controle: princípios e métodos de projeto*, 1. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2005c. P. 243–245. ISBN 978-85-216-3584-0.
- BAZANELLA, A. S.; SILVA JR, J. DA. Método da resposta ao salto. In: *SISTEMAS de controle: princípios e métodos de projeto*, 1. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2005d. P. 75. ISBN 978-85-216-3584-0.
- BAZANELLA, A. S.; SILVA JR, J. DA. Modelagem de processos. In: *SISTEMAS de controle: princípios e métodos de projeto*, 1. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2005e. cap. 4, p. 101–103. ISBN 978-85-216-3584-0.
- BAZANELLA, A. S.; SILVA JR, J. DA. Sistemas de 1ª ordem. In: *SISTEMAS de controle: princípios e métodos de projeto*, 1. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2005f. P. 269. ISBN 978-85-216-3584-0.
- BOGUE, R. Snake robots : A review of research, products and applications. *The Industrial robot*, Emerald Group Publishing Limited, v. 41, n. 3, p. 253–258, mai. 2014. ISSN 0143991X. DOI: 10.1108/IR-02-2014-0309. Disponível em: <<https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/IR-02-2014-0309/full/html>>.

- BRUSAMARELLO, V. J.; BALBINOT, A. Instrumentação e fundamentos de medidas. In: 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019a. v. 2 Medição de Deslocamento, Posição, Velocidade, Aceleração e Vibração. ISBN 978-85-216-3584-0.
- BRUSAMARELLO, V. J.; BALBINOT, A. Instrumentação e fundamentos de medidas. In: 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019b. v. 2 Medição de Força, p. 128–129. ISBN 978-85-216-3584-0.
- CLEMSON, U. DE. *Motor CC escovado*. [S.l.], 2023. Disponível em: <<https://cecas.clemson.edu/cvel/auto/actuators/motors-dc-brushed.html>>. Acesso em: 5 ago. 2023.
- DONG, X. et al. Design and analysis of a family of snake arm robots connected by compliant joints. *Mechanism and Machine Theory*, v. 77, p. 73–91, 2014. ISSN 0094-114X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2014.01.017>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0094114X1400041X>>.
- DUERIG, T. W. et al. Shape Memory Actuators for Robotic Applications. In: ENGINEERING aspects of shape memory alloys. 1. ed. [S.l.]: Butterworth-Heinemann Ltd, 1990a. cap. iv, p. 338. ISBN 0-750-61009-3.
- DUERIG, T. W. et al. Using Shape Memory for Proportional Control. In: ENGINEERING aspects of shape memory alloys. 1. ed. [S.l.]: Butterworth-Heinemann Ltd, 1990b. cap. iv, p. 362. ISBN 0-750-61009-3.
- DYNAPAR. *Quadrature encoder*. [S.l.], 2023. Disponível em: <https://www.dynapar.com/technology/encoder_basics/quadrature_encoder/>. Acesso em: 3 ago. 2023.
- EMANUEL, P. C. D. S. *Exoesqueleto Modular Passivo Para Análise De Movimentos Do Membro Superior E Avaliação Das Atividades Da Vida Diária*. 2015. F. 77. Tese (Doutorado em engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Biomecânica da Universidade de Mogi das Cruzes, Mogi das Cruzes.
- EMBARCADOS. *acionamento de motor de passo com msp430*. [S.l.], 2023. Disponível em: <<https://embarcados.com.br/acionamento-de-motor-de-passo-com-msp430/>>. Acesso em: 17 ago. 2023.
- FELIX, A.; FARRET, B.; GODOY SIMÕES, M. Storage Systems. In: INTEGRATION of Alternative Sources of Energy. [S.l.]: John Wiley & Sons, Ltd, 2005. cap. 11, p. 262–300. ISBN 9780471755623. DOI: <https://doi.org/10.1002/0471755621.ch11>. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/0471755621.ch11>. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/0471755621.ch11>>.
- FIESC. *Robô Annelida imita movimento das minhocas para a limpeza de dutos do pré-sal*. [S.l.], 2023. Disponível em: <<https://fiesc.com.br/pt-br/imprensa/robo-annelida-imita-movimento-das-minhocas-para-limpeza-de-dutos-do-pre-sal>>. Acesso em: 16 ago. 2023.
- FOGAÇA, J. R. V. *Pilhas ou Células Eletroquímicas*. [S.l.]. Disponível em: <<https://mundoeducacao.uol.com.br/quimica/pilhas-ou-celulas-eletroquimicas.htm>>. Acesso em: 3 set. 2023.
- FURUYA, Y.; SHIMADA, H.; HONDA, R. An extreme operation submarine robot actuated by shape memory alloy. *Journal of Advanced Science*, Piscataway, NJ, v. 1, n. 1, p. 6–13, set. 1989. DOI: 10.2978/jsas.1.6.

- GUENETTE, P. *Worm Gear, vintage illustration Pro Vector*. [S.l.], 2023. Disponível em: <<https://www.vecteezy.com/vector-art/13778385-worm-gear-vintage-illustration>>. Acesso em: 8 jun. 2023.
- HANNAN, M.; WALKER, I. The 'elephant trunk' manipulator, design and implementation. In: 2001 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Proceedings (Cat. No.01TH8556). [S.l.: s.n.], 2001. v. 1, 14–19 vol.1. DOI: 10.1109/AIM.2001.936423.
- HE, J. et al. The mechanical design of snake-arm robot. In: IEEE 10th International Conference on Industrial Informatics. [S.l.: s.n.], 2012. P. 758–761. DOI: 10.1109/INDIN.2012.6301169.
- HENRIQUES, R. V. B. Ponte H. In: INTRODUÇÃO à Engenharia de Controle e Automação - Hardware Livre e Robótica Educacional - PARTE I. [S.l.: s.n.], 2017. cap. 4, p. 84.
- INMETRO. *Portaria INMETRO nº 236 de 22 de dezembro de 1994*. [S.l.], 1994. P. 1–62.
- LAVARDA, F. C. *Associação de Pilhas*. [S.l.]. Disponível em: <<https://www2.fc.unesp.br/experimentosdefisica/ele08.htm>>. Acesso em: 3 set. 2023.
- LILJEBÄCK, P. et al. A review on modelling, implementation, and control of snake robots. *Robotics and Autonomous Systems*, v. 60, n. 1, p. 29–40, 2012. ISSN 0921-8890. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2011.08.010>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921889011001618>>.
- MAZZOLAI, B. et al. Soft-robotic arm inspired by the octopus: II. From artificial requirements to innovative technological solutions. *Bioinspiration & Biomimetics*, IOP Publishing, v. 7, n. 2, p. 025005, mai. 2012. DOI: 10.1088/1748-3182/7/2/025005. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1088/1748-3182/7/2/025005>>.
- MEMRY. *Introdução ao nitinol*. Bethel, Estados Unidos, 2017a. P. 5.
- MEMRY. *Introdução ao nitinol*. Bethel, Estados Unidos, 2017b. P. 6.
- MEMRY. *Introdução ao nitinol*. Bethel, Estados Unidos, 2017c. P. 11.
- METRÓPOLE DIGITAL, U. *Motor de passo*. [S.l.], 2023. Disponível em: <<https://materialpublic.imd.ufrn.br/curso/disciplina/1/58/2/15/>>. Acesso em: 17 ago. 2023.
- MWANGI, J. W. et al. Suitability assessment of micro-EDM in machining Nitinol for medical applications. In.
- NORTON, R. L. Rosca sem fim e coroa. In: CINEMÁTICA e dinâmica dos mecanismos. [S.l.]: AMGH Editora Ltda, 2010. cap. 9, p. 490. ISBN 978-85-63308-19-1.
- RASHID, M. H. Choppers. In: ELETRÔNICA de potência: circuitos, dispositivos e aplicações. [S.l.]: Makron Books do Brasil Editora Ltda, 1999a. cap. 9, p. 371. ISBN 85-346-0598-X.
- RASHID, M. H. Classificação dos Choppers. In: ELETRÔNICA de potência: circuitos, dispositivos e aplicações. [S.l.]: Makron Books do Brasil Editora Ltda, 1999b. cap. 9, p. 385. ISBN 85-346-0598-X.
- RASHID, M. H. Reguladores Buck. In: ELETRÔNICA de potência: circuitos, dispositivos e aplicações. [S.l.]: Makron Books do Brasil Editora Ltda, 1999c. cap. 9, p. 387. ISBN 85-346-0598-X.

- RASHID, M. H. Reguladores chaveados. In: ELETRÔNICA de potência: circuitos, dispositivos e aplicações. [S.l.]: Makron *Books* do Brasil Editora Ltda, 1999d. cap. 9, p. 386. ISBN 85-346-0598-X.
- SENAI. *Robô Annelida*. [S.l.], 2023. Disponível em: <<https://institutos.sc.senai.br/cases/annelida/>>. Acesso em: 16 ago. 2023.
- SIMAAN, N.; TAYLOR, R.; FLINT, P. A Dexterous System for Laryngeal Surgery. In: INTERNATIONAL Conference on Robotics & Automation. New Orleans, LA: [s.n.], 2004. P. 351–357.
- UMANS, S. D. Máquinas CC. In: MÁQUINAS elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2014. cap. 7, p. 101–103. ISBN 978-85-8055-373-4.
- VISENTIN, F. et al. Simplified Sensing and Control of a Plant-Inspired Cable Driven Manipulator. In: p. 422–427. DOI: 10.1109/ROBOSOFT.2019.8722729.

Apêndices

Apêndice A - LINEARIDADE DA CÉLULA DE CARGA

A célula de carga é um sensor de força formado por extensômetros (também conhecidos como *strain gauge*), estes são filamentos metálicos cuja variação relativa da resistência sobre a variação relativa da deformação é uma constante "K" conhecida como "fator gauge" ou "fator do extensômetro". Sua fórmula é dada por:

$$K = \frac{\frac{\Delta R}{R_0}}{\varepsilon}.$$

Conforme a seção 10.4.4.3 de (BRUSAMARELLO; BALBINOT, 2019b) "A variação de um *strain gauge* colado em um corpo (como uma barra, por exemplo) submetido a um esforço de tração ou compressão pode ser definido como":

$$\frac{\Delta R}{R} = S_a \varepsilon_a + S_t \varepsilon_t + S_{cis} \gamma_{at}.$$

Sendo S_a o fator do extensômetro para deformação na direção axial, ε_a a deformação ao longo da direção axial do extensômetro, S_t o fator do extensômetro para a deformação na direção transversal, ε_t a deformação ao longo da direção transversal do extensômetro, S_{cis} o fator do extensômetro para deformação de cisalhamento, γ_{at} a deformação de cisalhamento associada às direções axial e transversal.

"O fator do extensômetro para a deformação na direção do cisalhamento é pequeno e pode ser desprezado" (BRUSAMARELLO; BALBINOT, 2019b). Tendo em vista que o fator que relaciona a sensibilidade na direção axial para cada sensor é dado por:

$$K_t = \frac{S_t}{S_a}$$

e sabendo que a calibração de uma célula de carga é feita com um barra de determinado coeficiente de Poisson γ , que relaciona as deformações transversal e axial, conforme:

$$\varepsilon_t = -\gamma \varepsilon_a.$$

Temos:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta R}{R} &= S_a(\varepsilon_a + K_t \varepsilon_t), \\ \frac{\Delta R}{R} &= S_a \varepsilon_a (1 - \gamma K_t), \\ \frac{\Delta R}{R} &= K \varepsilon_a. \end{aligned} \tag{13}$$

As condições para a simplificação da equação 13 são possíveis no caso em que o sensor for submetido apenas a um campo uniaxial de tensões, que este sensor esteja alinhado ao eixo principal de deformações e que o sensor seja fixado em um material com γ igual ao utilizado em sua calibração. Caso contrário surgirá um erro devido à sensibilidade transversal.

Apêndice B - INTERAÇÃO DO MOTOR DE PASSO COM O CONJUNTO ROSCA SEM FIM COROA

Essa seção relata sobre os cálculos feitos para avaliar velocidade, força e posição do motor de passo NEMA11-20-01D-AMT112S após interação com o mecanismo rosca sem fim e coroa.

Uma variação de 360° no motor resulta em uma variação de 12° na coroa, conforme

$$\frac{\theta_{motor}}{Z} = \theta_{coroa} ,$$

na qual θ_{coroa} refere-se ao deslocamento angular da coroa, θ_{motor} refere-se ao deslocamento angular do motor e Z é a relação de transmissão.

Esses 12° puxam os cabos em $1,46 \text{ mm}$, conforme:

$$S = \theta_{coroa} \cdot \text{raio}_{carretel} ,$$

na qual S representa o deslocamento linear e $\text{raio}_{carretel}$ representa o raio do carretel.

Como o torque aumenta em 30 vezes devido à relação de transmissão, mas chega a ter apenas 40% de eficiência, o torque máximo após mecanismo coroa e sem fim é de $1,44 \text{ Nm}$, este torque implica em uma força de $205,71 \text{ N}$, maior do que a necessária para acionar o robô.

Tendo em vista que a velocidade máxima deste motor é de 11 rotações por segundo, isso implica em uma velocidade $\frac{11}{30}$ rps na coroa e $16,13 \text{ mm/s}$, conforme

$$V = 2 \cdot \pi \cdot f_{coroa} \cdot \text{raio}_{carretel} ,$$

na qual f_{coroa} representa a velocidade angular da coroa em rps e V é velocidade linear para puxar o cabo.

Apêndice C - BATERIA

As baterias são dispositivos que armazenam energia através da transformação da energia envolvida em reações químicas em corrente elétrica (ANJOS, 2023), suas células possuem um terminal positivo (cátodo) e um negativo (ânodo) (FOGAÇA, 2023) e fornecem corrente contínua. As células podem ser conectadas em série a fim de gerar maior tensão e em paralelo para ter capacidade de fornecer mais corrente (LAVARDA, 2023).

Para a escolha da bateria, é observado o consumo máximo solicitado pelos motores. Através do *datasheet* do motor escolhido na seção 3.3.2 verifica-se que os motores funcionam com alimentação de 6 V e a corrente máxima exigida pelo motor, no caso em que este aplica o torque máximo de 6,2 *kgfcm* é de 1,3 A. Considerando um caso extremo, no qual todos os motores estejam exercendo torque máximo obtém-se uma corrente de pico de 5,2A, junto a um microcontrolador que consome até 1,1 A (ESP32-WROOM-32) o consumo máximo é de 6,3 A.

O atuador foi escolhido de modo que não é necessário mantê-lo ligado enquanto o sistema está parado, dessa forma a corrente requisitada da bateria não é constante nem cíclica, mas é acionada apenas em momentos específicos no qual é necessário realizar uma mudança de direção dentro dos dutos de petróleo, o que torna a durabilidade da energia maior, haja vista que a bateria não é solicitada continuamente.

O conjunto bateria e microcontrolador devem ser acoplados em um módulo próprio tal qual o módulo dos atuadores, sendo este um cilindro de espaço útil interno de 190 x 75 *mm* de diâmetro. Este sistema irá operar a temperaturas por volta de 4 °C e imerso em petróleo. Para a seleção dos componentes de alimentação, considera-se que o módulo está completamente selado e que os componentes eletrônicos não têm contato com o óleo.

Com as condições de contorno definidas, analisa-se 2 diferentes tipos de baterias: bateria de chumbo-ácido e bateria de lítio-íon (Li-Íon) que foram as baterias mais comumente encontradas comercialmente com a tensão em torno de 6 V e dimensões compatíveis com o módulo.

As baterias de chumbo-ácido de 6 V são muito utilizadas em veículos e *no breaks*, entre as baterias encontradas comercialmente com esta construção a de menor dimensão é a EnergyAC 6STD1,3 de 1,3 Ah, sua dimensão é de 98x25x58 *mm* com massa aproximada de 0,28 kg e a corrente máxima de descarga é de 18 A durante 5 segundos. A bateria pode operar em modo de descarga (fornecendo corrente para um sistema) em temperaturas de -15 a 50 °C e sua capacidade é afetada pela temperatura. Em 0°C, sua capacidade é reduzida para 85% da capacidade total, o menor preço encontrado foi de R\$ 39,00 e seu ciclo de vida pode chegar a 800 ciclos dependendo da tensão até a qual ela é descarregada (FELIX; FARRET; GODOY SIMÕES, 2005).

A bateria de lítio-íon formada por 4 células 18650 (2 em série e 2 em paralelo) também foi analisada, sua capacidade é de 5200 *mAh* e apresenta valores de densidade de energia (*Wh/L*) e energia específica (*Wh/kg*) maiores que a bateria de chumbo-ácido, o que pode ser percebido tendo em vista que as dimensões da bateria são de 19x65x72

mm , a massa aproximada é de $0,20 \text{ kg}$. Apresenta menores valores de limite de corrente máxima ($10,4 \text{ A}$), pode operar em modo de descarga entre -20 e $60 \text{ }^\circ\text{C}$ foi encontrada no valor de R\$102,90, e seu ciclo de vida é de 300 ciclos.

Tabela 7: Comparação entre os tipos de bateria pesquisados.

Critérios	Pesos	Chumbo-ácido	Li-Íon
Dimensional	10	1	3
Massa	1	3	10
Máxima corrente	8	10	8
Ciclo de vida	1	10	8
Custo	1	10	3
Temperatura	3	10	10
Total		143	145

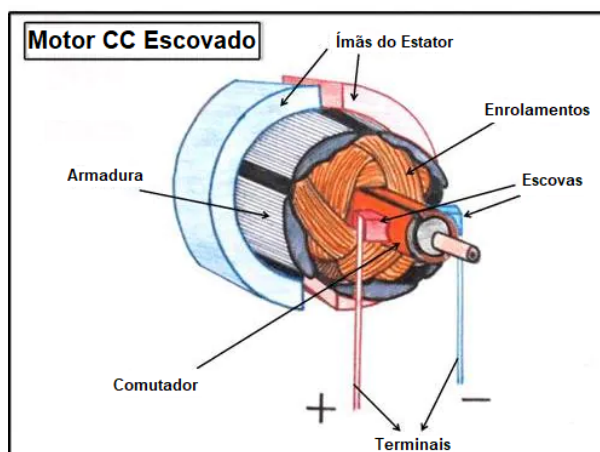
Fonte: Do Autor.

Baseado na tabela de decisão, a bateria escolhida foi a de lítio-íon.

Apêndice D - MODELAGEM DO MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA COM ÍMÃS PERMANENTES

O motor JGA25-370-0660 é um motor de corrente contínua escovado com estator com ímãs permanentes e rotor com enrolamentos (armadura), como pode ser visto de acordo como o exemplo da Figura 26.

Figura 26: Parte interna ao motor CC escovado.



Fonte: Imagem adaptada de (CLEMSON, 2023).

Este motor pode ser modelado com uma parte elétrica e uma parte mecânica. A parte elétrica pode ser modelada conforme descrito em Bazanella e Silva Jr (2005e), com a ressalva de que o circuito equivalente de um motor de ímã permanente é idêntico ao de um motor CC de excitação externa, exceto que não há conexões de enrolamento de campo e sua indutância de armadura é baixa conforme informa Umans (2014). O circuito equivalente é mostrado na Figura 27.

Através do circuito, obtém-se a seguinte equação :

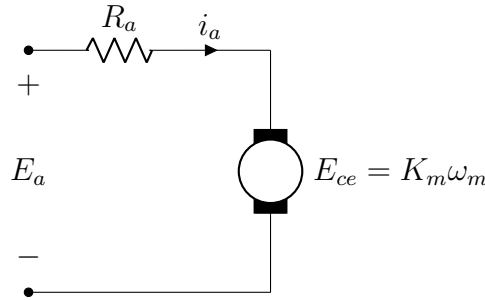
$$E_a = R_a i_a + E_{ce} , \quad (14)$$

na qual E_a é a tensão de armadura, R_a é a resistência de armadura, i_a é a corrente de armadura e E_{ce} é a força contra eletromotriz.

A tensão de velocidade de um motor, também conhecida como força contra eletromotriz, pode ser dada pela seguinte equação:

$$E_{ce} = K_m \omega_m ,$$

Figura 27: Circuito equivalente do motor CC de ímã permanente.



Fonte: Circuito elaborado pelo Autor.

na qual ω_m é a velocidade do motor e K_m é a constante de conjugado do motor, definido por:

$$K_m = K_a \Phi_d,$$

em que K_a é uma constante geométrica e Φ_d é o fluxo de entreferro de eixo direto.

O conjugado da máquina é dado por:

$$T_e = K_m i_a, \quad (15)$$

nesta equação T_e refere-se ao conjugado da máquina.

Para a parte mecânica, modela-se o movimento rotacional do motor através da segunda lei de Newton conforme:

$$J\dot{\omega} = T_e - T_m - B\omega, \quad (16)$$

onde T_m é o torque de carga, J é o momento de inércia e B é o coeficiente de atrito viscoso.

Para a análise de controle de posição através do controle da tensão de armadura, aplica-se a transformada de Laplace nas equações diferenciais de tensão de armadura e de movimento (equações 14 e 16) e na Equação 15 e obtém-se:

$$i_a(s) = \frac{1}{R_a} E_a(s) - \frac{K_m}{R_a} \omega(s), \quad (17)$$

$$T_e(s) = K_m i_a(s), \quad (18)$$

e

$$\omega(s) = \frac{1}{Js + B} [T_e(s) - T_m(s)]. \quad (19)$$

Unindo as equações 17 e 18:

$$T_e(s) = K_m \left[\frac{1}{R_a} E_a(s) - \frac{K_m}{R_a} \omega(s) \right] \quad (20)$$

Substituindo a equação 20 na equação 19, obtém-se:

$$\omega(s) = \frac{1}{Js + B} \left[\frac{K_m}{R_a} E_a(s) - \frac{K_m^2}{R_a} \omega(s) - T_m(s) \right]. \quad (21)$$

Reagrupando a Equação 21, temos:

$$\begin{aligned}\omega(s) &= \frac{K_m}{R_a(Js + B)}E_a(s) - \frac{K_m^2}{R_a(Js + B)}\omega(s) - \frac{1}{Js + B}T_m(s) \\ \frac{R_a(Js + B) + K_m^2}{R_a(Js + B)}\omega(s) &= \frac{K_m}{R_a(Js + B)}E_a(s) - \frac{R_a}{R_a(Js + B)}T_m(s) \\ \omega(s) &= \frac{K_m}{R_a(Js + B) + K_m^2}E_a(s) - \frac{R_a}{R_a(Js + B) + K_m^2}T_m(s) \\ \omega(s) &= \frac{K_m/R_a J}{s + \frac{B}{J} + \frac{K_m^2}{R_a J}}E_a(s) - \frac{1/J}{s + \frac{B}{J} + \frac{K_m^2}{R_a J}}T_m(s),\end{aligned}$$

como K_m , R_a , J , B são constantes, podemos simplificar as funções de transferência de E_a para ω e T_m para ω como duas funções de transferência de primeira ordem. Deste modo, temos que os sistemas podem ser simplificados pela seguinte função de transferência:

$$\frac{K/T}{s + 1/T},$$

em que T refere-se à constante de tempo e K corresponde ao ganho estático do processo (BAZANELLA; SILVA JR, 2005f). Com isso a velocidade angular pode ser descrita como:

$$\omega(s) = \frac{K_1/T_1}{s + 1/T_1}E_a(s) - \frac{K_2/T_2}{s + 1/T_2}T_m(s)$$

Apêndice E - MEDIÇÕES PARA VALIDAÇÃO DA INCERTEZA DA CÉLULA DE CARGA.

Para confirmar que a calibração da célula de carga foi feita corretamente e se ter a confirmação de que o dispositivo mede a força com no máximo $\pm 1N$ de incerteza, são realizadas 5 medidas de diversas cargas conforme comentado no texto principal.

O experimento consistiu em medir os 3 blocos padrão utilizados nos outros experimentos juntos (Tabela 8), os blocos 1 e 3 (Tabela 9) e a peça de validação (Tabela 10). Devido à capacidade máxima da balança ser de 10 kg, os experimentos com mais de um bloco tiveram seus pesos obtidos através das somas dos pesos dos blocos individuais. Já a peça de validação teve seu peso obtido através da medição de sua massa pela balança, multiplicada pela aceleração da gravidade (considerada constante no experimento de $9,81m/s^2$).

Tabela 8: Comparação entre pesos obtidos pela balança e através da célula de carga.

	Peso balança (N)	Peso Célula de carga (N)
Bloco 1+2+3	145,8384	146,0
		146,0
		146,0
		146,0
		146,0

Fonte: Do Autor.

Através dos resultados destes experimentos, pode-se confirmar que a célula de carga tem um incerteza de no máximo 1 N.

Tabela 9: Comparação entre pesos obtidos pela balança e através da célula de carga.

	Peso balança (N)	Peso Célula de carga (N)
Bloco 1+3	97,2966	97,4
		97,4
		97,4
		97,4
		97,5

Fonte: Do Autor.

Tabela 10: Comparação entre peso obtido pela balança e através da célula de carga.

	Massa balança (kg)	Peso balança (N)	Peso Célula de carga (N)
Peça de validação	1,4813	14,53	14,6
			14,6
			14,5
			14,5
			14,5

Fonte: Do Autor.