

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Alexandre Mendes Marcelo

**Desenvolvimento de máquina tracionadora para
sonda de inspeção de trocadores de calor**

Uberlândia, Brasil

Novembro 2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Alexandre Mendes Marcelo

**Desenvolvimento de máquina tracionadora para sonda de
inspeção de trocadores de calor**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
à Faculdade de Engenharia Mecânica da Uni-
versidade Federal de Uberlândia, Minas Ge-
rais, como requisito exigido parcial à obten-
ção do grau de Bacharel em Engenharia Me-
catrônica.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Augusto Queiroz de Assis

Universidade Federal de Uberlândia – UFU

Faculdade de Engenharia Mecânica

Bacharelado em Engenharia Mecatrônica

Uberlândia, Brasil

Novembro 2024

Alexandre Mendes Marcelo

Desenvolvimento de máquina tracionadora para sonda de inspeção de trocadores de calor

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, como requisito exigido parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecatrônica.

Trabalho aprovado. Uberlândia, Brasil, 12 de novembro de 2024:

Prof. Dr. Pedro Augusto Queiroz de Assis
Orientador

Prof. Dr. Ruham Pablo Reis

Eng. Rafael Nordon Ferraresi

Uberlândia, Brasil
Novembro 2024

Dedico este trabalho a todos os que colaboraram para a sua realização e acreditaram no seu sucesso.

Agradecimentos

Meus agradecimentos ao Prof. Dr. Pedro Augusto Queiroz de Assis pela prontidão do suporte nas dificuldades enfrentadas. Também sou grato por toda a orientação nos últimos anos da graduação. Me orgulho dessa parceria.

Ao Laboratório de Acústica e Vibração também demonstro gratidão pela oportunidade de desenvolver este trabalho e por receber ajuda do pesquisador Eng. Rafael Nordon Ferraresi e Prof. Dr. Ruham Pablo Reis nos processos de aquisição de materiais e orientação diante dos desafios. A ajuda prestada pelos alunos pesquisadores Vinícius Nunes, Pedro Mariano Ribeiro e Pedro Lucas Nunes na fabricação de peças também foi essencial para cumprir com o projeto no tempo estipulado.

Resumo

A indústria do gás e petróleo utiliza trocadores de calor do tipo Casco e Tubos em inúmeras etapas de produção, necessitando desse equipamento sempre dentro dos requisitos de qualidade. Para isso é necessário validar essa qualidade com inspeções regulares, especialmente por meio de ensaios não destrutivos. Uma possibilidade para realizar a inspeção desse tipo de equipamento é utilizar o método *Remote Field Testing* (RFT). Esse ensaio consiste na passagem de uma sonda inspetora dotada de bobinas excitadoras e receptoras no interior de um feixe tubular. A leitura dos campos magnéticos induzidos possui um sinal característico para tubos dentro dos requisitos de qualidade. Quando a leitura do tubo em inspeção apresenta sinais fora do padrão é possível inferir a existência de irregularidade(s) e/ou defeito(s), como perda de material por corrosão. Mais ainda, os sinais explicitam quais são os tipos de defeitos e seus graus. Para o sucesso da detecção dos defeitos é necessário tomar certos cuidados, como a tração da sonda inspetora numa velocidade constante. O Laboratório de Acústica e Vibração da Universidade Federal de Uberlândia faz pesquisas envolvendo o RFT, fazendo-se necessário um equipamento para a tração da sonda, mas os equipamentos comerciais disponíveis têm alto custo. Nesse contexto, o presente trabalho visa o desenvolvimento de uma máquina tracionadora de baixo custo para viabilizar os ensaios. Para esse desenvolvimento, divide-se o tracionador em três módulos: tração, alimentação e controle. O primeiro comporta um motor CC e encoder incremental para proporcionar movimento e leitura da velocidade angular. No módulo de alimentação existem componentes para conversão de corrente alternada da rede em corrente contínua e alimentação da máquina. Por fim, o módulo de controle consiste numa Interface Homem-Máquina no formato de *Joystick* com um microcontrolador e sistema operacional de tempo real FreeRTOS para implementação de um controlador digital em malha fechada para rastreamento de velocidades comandadas para a movimentação da sonda. Visando o desenvolvimento do controlador, realizou-se a identificação de um modelo matemático para o motor adotado utilizando a resposta em frequência. Então, com base no modelo obtido, projetou-se um controlador do tipo Proporcional-Integral. Resultados de simulação e experimentais mostraram que o sistema de controle desenvolvido é capaz de fazer a sonda se movimentar em torno da velocidade comandada pelo operador. Portanto, a máquina tracionadora desenvolvida ao longo do presente trabalho alcançou o objetivo proposto. Mais ainda, somando-se os custos de materiais e equipamentos utilizados, obteve-se um custo estimado de R\$ 1.992,17, significativamente inferior aos preços dos equipamentos comerciais.

Palavras-chave: Trocadores de Calor; inspeção; RFT; movimentação de sonda; controle de velocidade de motor CC; tracionador de baixo custo.

Abstract

The oil and gas industry uses Shell and Tubes heat exchangers in a large amount of production steps, needing this equipment always within the quality requirements. For that is necessary to validate this quality with regular inspections, especially through non-destructing testing. One possibility for this kind of equipment testing is using the Remote Field Testing (RFT). This testing consist of passing an inspection probe equipped with excitation and receiving coils inside a tubular bundle. The induced magnetic field reading has a characteristic signal for tubes within the quality requirements. When the tube under inspection presents out of pattern readings, it is possible to infer the existence of irregularity(s) and/or defect(s), generally material loss due to corrosion. Even more so, the signals show which type of defects and their degrees. For the defect detection success it is necessary to take certain precautions, such as the probe traction in a constant speed. The Acoustics and Vibration Laboratory of the Federal University of Uberlândia does researches involving the RFT, making it necessary to have a traction probe equipment, however commercial equipment has high costs. In this context, the present work aims the development of a low cost traction machine to enable the tests. For this development, the traction machine is divided in three modules: traction, power and control. The first holds a CC motor and incremental encoder to provide movement and angular speed reading. In the power module there is components to convert de alternating current in constant current to supply the machine. Finally, the control module consists of a Human-Machine Interface in a Joystick shape with a microcontroller and FreeRTOS real time operational system for closed loop digital controller implementing to track commanded speed probe motion. Aiming the controller development, a mathematical model was identified for the adopted engine using the frequency response. Then, based on the model achieved, a Proportional-Integral type controller was designed. Results of simulation and experimentation show that the control system developed is able to make the probe move next to the speed set by the operator. Therefore, the traction machine developed throughout the present work achieved the proposed goal. Even more so, adding the costs of material and equipment used, an estimated cost of R\$ 1.992,17 was obtained, significantly lower than commercial equipment costs.

Key-words: *Heat Exchangers; inspection; RFT; probe motion; CC motor speed control; low cost traction machine.*

Lista de ilustrações

Figura 1 – Trocador de calor do tipo Casco & Tubos. Fonte: adaptado de Ferraresi (2023)	13
Figura 2 – Sonda RFT com duas bobinas excitadoras e duas receptoras. Fonte: adaptado de Ferraresi (2023)	14
Figura 3 – Perturbação no fluxo magnético devido à perda de material tubular. Fonte: adaptado de Ferraresi (2023)	15
Figura 4 – Tracionador fabricado para ensaios RFT no LAV. Fonte: adaptado de Ferraresi (2023)	15
Figura 5 – Tracionador de mercado da empresa <i>Eddyfi Technologies</i>	16
Figura 6 – Foto do tracionador destacando os três módulos, tripé, polia e o para-fuso de nivelamento	19
Figura 7 – Engrenagens internas ao módulo de tração usadas para transformar o movimento angular do motor em movimento linear da sonda e medir a velocidade do motor.	20
Figura 8 – Mecanismo interno do Módulo de Tração.	20
Figura 9 – Módulo de Tração	21
Figura 10 – Módulo de Alimentação.	21
Figura 11 – Foto dos componentes internos do módulo de alimentação.	22
Figura 12 – Foto da ponte H BTS7960B	22
Figura 13 – Módulo de Controle.	23
Figura 14 – Placa eletrônica do Tracionador	24
Figura 15 – Módulo de Controle aberto, mostrando seus componentes internos. . .	24
Figura 16 – Tela inicial do menu operacional.	25
Figura 17 – Protótipo do tripé.	25
Figura 18 – Peças do tripé.	26
Figura 19 – Foto da versão final do tripé.	27
Figura 20 – Desenho do circuito eletrônico geral da máquina, integrando todos os módulos.	28
Figura 21 – Diagrama de blocos do sistema de controle. Fonte: Autor	29
Figura 22 – Gráfico para medição do atraso na resposta a uma entrada do tipo degrau. Têm-se a velocidade em rad/s do motor (linha laranja) e o valor normalizado para a entrada (linha azul).	30
Figura 23 – Gráfico para medição do atraso ampliado no instante da aplicação do degrau (3000 ms).	30

Figura 24 – Evolução temporal da velocidade a uma entrada senoidal, destacando os limiares da zona morta. Têm-se a velocidade angular do motor em rad/s (linha tracejada verde) e a entrada normalizada [0,1] (linha contínua azul).	31
Figura 25 – Ilustração dos dados V_{ppu} , V_{ppy} e t_d nos gráficos da resposta em frequência.	32
Figura 26 – Diagrama de Bode da amplitude 23,43 %.	33
Figura 27 – Diagrama de Bode da amplitude 46,87 %.	34
Figura 28 – Diagrama de Bode da amplitude 93,75 %.	35
Figura 29 – Identificação da largura de banda no diagrama de Bode de malha fechada.	37
Figura 30 – Simulação do rastreamento de uma velocidade de referência de 2,5 rad/s. Em laranja tem-se a referência aplicada, em amarelo a velocidade medida e em azul a ação de controle normalizada.	39
Figura 31 – Simulação do rastreamento de uma velocidade de referência de 1,3 rad/s. Em laranja tem-se a referência aplicada, em amarelo a velocidade medida e em azul a ação de controle normalizada.. . . .	40
Figura 32 – Rastreamento pelo controlador PI da velocidade de 2,5 rad/s.	41
Figura 33 – Rastreamento pelo controlador PI da velocidade de 1,3 rad/s.	41
Figura 34 – Rastreamento pelo controlador PI da velocidade de 4,8 rad/s.	42
Figura 35 – Resultados em bancada para uma velocidade variante no tempo.	42
Figura 36 – Foto do menu inicial.	47
Figura 37 – Foto dos botões do joystick com descrição de suas funcionalidades.	47
Figura 38 – Fotos das páginas do menu para iniciar um ensaio.	48
Figura 39 – Foto da página de configuração da velocidade linear de tração.	48
Figura 40 – Foto da página de monitoramento do ensaio em diferentes momentos de operação.	49

Lista de abreviaturas e siglas

ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
CC	Corrente Contínua
END	Ensaio não Destrutivo
FFF	<i>Fused Filament Fabrication</i>
IHM	Interface Homem-Máquina
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
LAV	Laboratório de Acústica e Vibração
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
PI	Proporcional-Integral
PLA	Ácido Polilático
RFT	<i>Remote Field Testing</i>
SLIT	Sistema Linear e Invariante no Tempo
UFU	Universidade Federal de Uberlândia

Lista de símbolos

$C(s)$	Controlador analógico
$C(z)$	Controlador digital
$e(k)$	Erro digital
$e(k - 1)$	Erro digital no instante anterior
$E(s)$	Erro analógico
$G(s)$	Modelo matemático analógico do motor
$H(s)$	Filtro Butterworth de segunda ordem analógico
$H(z)$	Filtro Butterworth de segunda ordem digital
K_p	Ganho proporcional
K_i	Ganho integral
t_d	Atraso entre entrada e saída
T_a	Período de amostragem
$u(k)$	Ação de controle
$u(k - 1)$	Ação de controle no instante anterior
$U(s)$	Entrada analógica normalizada
ω_c	Frequência de corte
ω_s	Frequência de amostragem
ω_{ref}	Velocidade de referência em simulação
$W_{ref}(s)$	Velocidade de referência
$W_Y(s)$	Velocidade do motor
$V_{ref}(s)$	Velocidade de referência
$V_Y(s)$	Velocidade do motor
V_{ppu}	Valor de pico a pico da entrada
V_{ppy}	Valor de pico a pico da saída

Sumário

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Trocadores de calor	12
1.2	Ensaaios não destrutivos em trocadores de calor	13
1.3	Objetivos	16
2	DESCRIÇÃO DA MÁQUINA DE TRAÇÃO	18
2.1	Visão Geral	18
2.2	Módulo de tração	19
2.3	Módulo de alimentação	21
2.4	Módulo de controle	23
2.5	Tripé	25
2.6	Circuito Eletrônico	27
3	SISTEMA DE CONTROLE	29
3.1	Caracterização do sistema	29
3.1.1	Identificação do atraso de resposta do motor	30
3.1.2	Zona Morta	31
3.1.3	Identificação de modelo para a relação entrada-saída do motor	31
3.1.4	Filtro Butterworth	36
3.1.5	Projeto de controlador	36
4	RESULTADOS	39
4.1	Resultado em simulação	39
4.2	Resultados em bancada	40
4.3	Resultados práticos	42
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	44
5.1	Conclusões	44
5.2	Trabalhos futuros	44
	REFERÊNCIAS	45
	APÊNDICES	46
	APÊNDICE A – MANUAL DE NAVEGAÇÃO	47

1 Introdução

A dependência humana de energia para realizar atividades cotidianas, como cozinhar alimentos e iluminar o ambiente, continuamente motiva o desenvolvimento de diferentes fontes energéticas. Por milhares de anos o fogo gerado pela queima de madeira foi usado como fonte energética. Porém, a descoberta do petróleo resultou em uma mudança da matriz energética e na produção de uma extensa gama de recursos, como objetos de plástico, tecidos e materiais de produção (GARCIA, 2015).

Com esse propósito, foram desenvolvidas formas de processar o petróleo a fim de diversificar a sua aplicabilidade, aumentando o potencial de produção com tal recurso natural. Sabe-se que esse processamento é feito em várias etapas até atingir os materiais esperados. É preciso levar o petróleo a refinarias e submetê-lo a altas temperaturas, para que seja vaporizado, e então resfriá-lo em diferentes níveis da torre de refinaria para produzir os diferentes subprodutos (SZKLO; ULLER, 2008). Em particular, a tarefa de resfriamento é tipicamente realizada utilizando-se trocadores de calor nesse setor industrial.

1.1 Trocadores de calor

Entre os variados modelos de trocadores de calor existentes, um bastante utilizado é o trocador de calor do tipo Casco & Tubos. Esse equipamento consiste em vários tubos de diâmetro pequeno internos a uma tubulação de grande diâmetro, como mostrado na Figura 1. Por dentro do feixe tubular escoam o fluido refrigerador, enquanto petróleo ou seus derivados escoam entre o casco e o feixe tubular (SILVA, 2013). Esse processo de escoamento de fluidos com diferentes temperaturas intensifica a refrigeração, acelerando o processo de refinamento dessa matéria-prima.

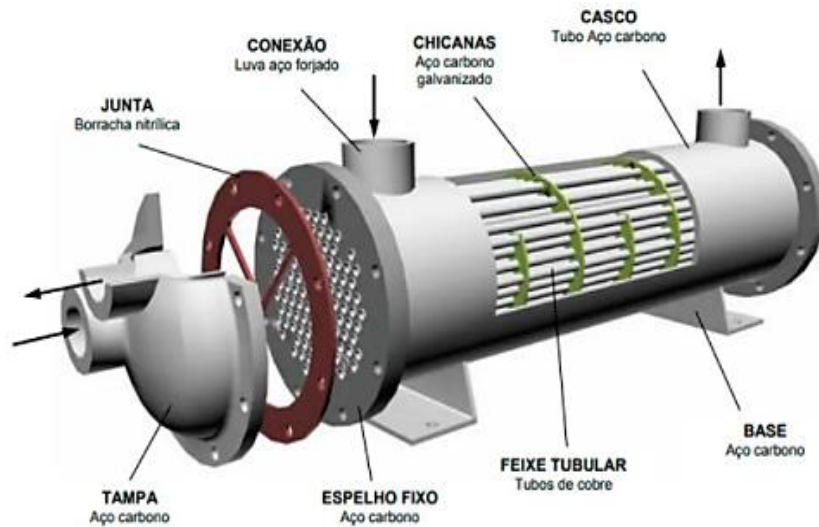


Figura 1 – Trocador de calor do tipo Casco & Tubos. Fonte: adaptado de Ferraresi (2023)

Os trocadores de calor sofrem danos inevitáveis devido às condições de operação, tais como alta pressão nos feixes tubulares, diferença de temperatura e propriedades físico químicas dos fluidos (MADI, 2006). Os principais defeitos gerados por essas condições são trincas longitudinais e circunferenciais, erosão, incrustação, desgaste por atrito, corrosão e perda de espessura da parede do tubo (CARNEVAL, 2021). Para manter o equipamento dentro das condições de qualidade exigidas, é preciso realizar manutenções preventivas nos feixes tubulares para remediar possíveis fontes de defeitos, como limpeza por água em contracorrente, limpeza a vapor, limpeza química e limpeza mecânica. Mais ainda, é preciso checar a qualidade atual da tubulação a partir de Ensaio não Destrutivos (END), o que demanda uma equipe treinada, equipamentos calibrados e protocolos de ensaios previamente estabelecidos (FERRARESI et al., 2021).

1.2 Ensaio não destrutivos em trocadores de calor

A principal função dos ensaios não destrutivos é a identificação de discontinuidades, que podem ser entendidas como uma interrupção da estrutura típica e homogênea do material, e defeitos, quando a tubulação apresenta condições físicas em nível crítico para sua qualidade, resultando na substituição de tal peça (FERRARESI et al., 2021). Para realizar tais ensaios, existem vários métodos com suas características e condições particulares. Um dos principais tipos de ensaios, segundo Carneval (2021), é o usado no Laboratório de Acústica e Vibração (LAV) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU): o Ensaio por Campo Remoto (*Remote Field Testing* - RFT).

A técnica de Ensaio por Campo Remoto é destinada a tubos de material ferromagnético e fornece boa sensibilidade à detecção de discontinuidades geradas pelos processos de corrosão, erosão, desgaste e outras formas de perda de material tubular (CARNEVAL,

2021).

A técnica RFT consiste na passagem de uma sonda por dentro do tubo a ser inspecionado, a qual possui bobinas para liberar (excitadoras) e receber (receptoras) pulsos eletromagnéticos em baixas frequências (40 a 500 Hz) que se propagam axialmente na tubulação (AL-QADEEB, 2005). Os campos magnéticos produzidos pelas bobinas são chamados de campo próximo, os quais geram um campo magnético por reação na tubulação, sendo este percebido pela sonda receptora e chamado de campo remoto (FERRARESI et al., 2021). A quantidade de bobinas excitadoras e receptoras pode variar e um exemplo de sonda com duas bobinas excitadoras e duas receptoras é mostrado na Figura 2

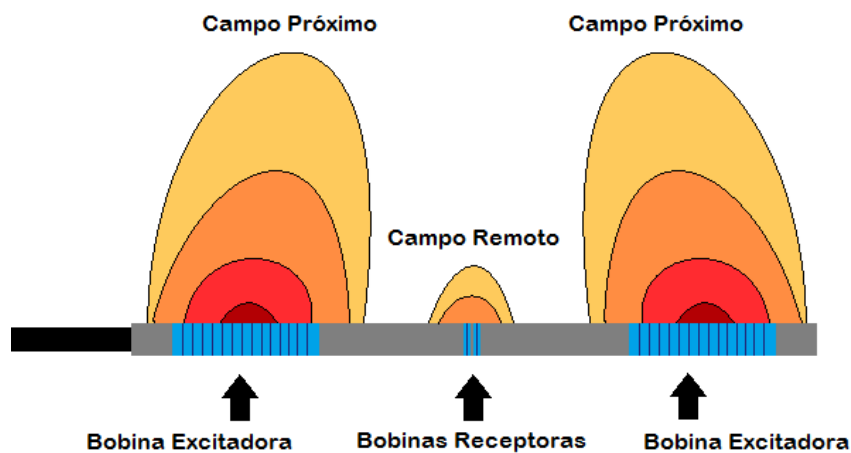


Figura 2 – Sonda RFT com duas bobinas excitadoras e duas receptoras. Fonte: adaptado de Ferraresi (2023)

O campo remoto gerado em oposição ao campo próximo provém da movimentação de correntes parasitas induzidas, as quais percorrem as paredes tubulares. Caso existam descontinuidades nas paredes tubulares, a movimentação dessas correntes é perturbada, resultando numa mudança no campo magnético que, por sua vez, é percebida pela sonda receptora (AL-QADEEB, 2005). A Figura 3 ilustra essa perturbação.

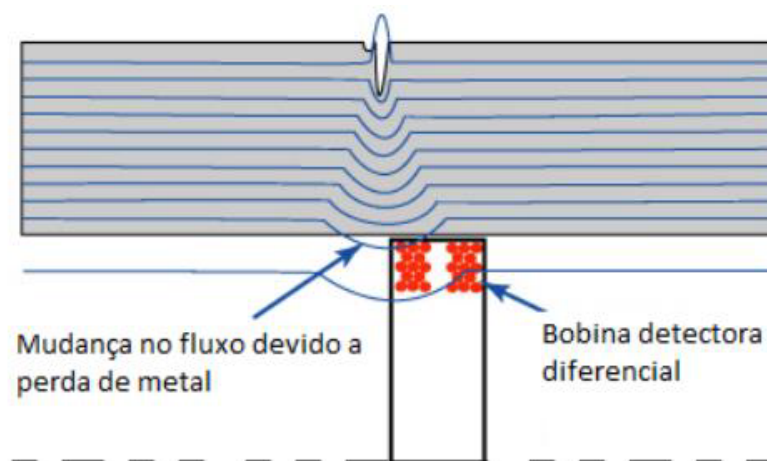


Figura 3 – Perturbação no fluxo magnético devido à perda de material tubular. Fonte: adaptado de Ferraresi (2023)

Um aspecto importante para o sucesso do ensaio é a velocidade de movimentação da sonda, a qual deve ser mantida constante durante todo o percurso da sonda. Para isso, o LAV utiliza um equipamento fabricado com roldanas ajustáveis para prender a sonda, um motor de passe modelo MOTION® - WS23 - 0150-30-4, uma chave seletora para inversão do sentido de tração e um driver MOTION® WD - 2404 para variação da velocidade de 0 mm/s a 800 mm/s. O conjunto é alimentado por uma fonte 12V CC a Figura 4 mostra esse equipamento.

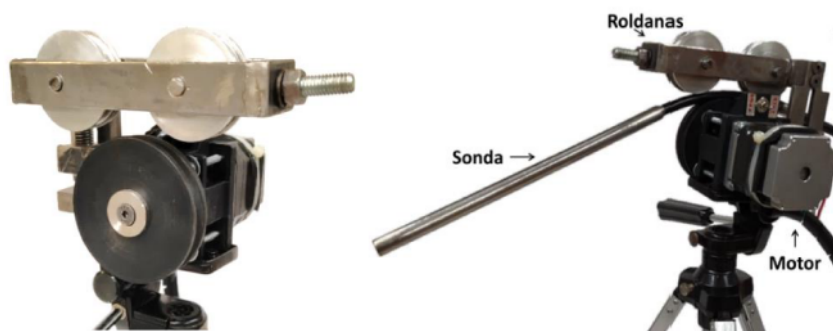


Figura 4 – Tracionador fabricado para ensaios RFT no LAV. Fonte: adaptado de Ferraresi (2023)

O tracionador descrito não apresenta desempenho satisfatório no rastreamento de velocidades definidas pelo operador e também está danificado devido ao uso. Logo, uma substituição se faz necessária. Os equipamentos encontrados no mercado para cumprir essa tarefa são de alto custo, como o modelo *Probot*^{TM 1} da empresa *Eddyfi Technologies*, o qual é avaliado em \$ 62.0250,00 e necessita de um controle remoto (*Probot*TM *remote control*²) avaliado em \$ 7.795,00 para realizar os ensaios. A Figura 5 mostra esses equipamentos.

¹ <https://encurtador.com.br/LHIPT>

² <https://encurtador.com.br/SLLus>



(a) Tracionador de sonda modelo ProbotTM no valor de \$ 62.250,00. Fonte: *Eddyfi Technologies*



(b) Controle remoto para o tracionador ProbotTM no valor de \$ 7.795,00. Fonte: *Eddyfi Technologies*

Figura 5 – Tracionador de mercado da empresa *Eddyfi Technologies*.

Neste contexto, o desenvolvimento de um tracionador de baixo custo se faz necessário para manutenção da qualidade das inspeções de trocadores de calor realizadas no LAV.

1.3 Objetivos

O presente trabalho envolve a construção de uma máquina tracionadora de baixo custo para sondas inspetoras de trocadores de calor. Para isso, divide-se a máquina em três módulos. O primeiro é denominado módulo de tração, no qual utiliza-se um motor CC como elemento motriz da sonda. Nesse módulo, uma polia transfere o giro do motor para a tração da sonda. Um encoder incremental faz a leitura da velocidade e todo esse conjunto é acomodado numa caixa feita com impressão 3D. O módulo de controle (*joystick*) gerencia o funcionamento da máquina a partir de um microcontrolador EPS32,

utilizado para controlar a velocidade e o sentido de giro do motor CC, e também para embarcar a Interface Homem-Máquina. O módulo de energia, possui uma fonte 12 VDC para alimentação geral e um regulador de tensão para reduzir a tensão a 5 VDC, nível adequado para alimentar o microcontrolador e encoder. Por fim, também é desenvolvido um tripé para o módulo de tração, feito com tubos de alumínio e peças modeladas e produzidas com impressão 3D. Mais ainda, o sistema emprega um controlador digital de velocidade projetado para rastrear a velocidade de referência configurada pelo operador a partir do *joystick*.

O restante do trabalho encontra-se organizado da maneira descrita a seguir: no Capítulo 2 tem-se um detalhamento dos módulos e dos componentes que compõem o tracionador. O Capítulo 3 descreve o desenvolvimento do controlador digital de velocidade em malha fechada, abrangendo a modelagem, tipo de controlador escolhido e digitalização. Os resultados de testes em simulação, bancada e práticos estão apresentados no Capítulo 4, enquanto no Capítulo 5 têm-se as conclusões e oportunidades de trabalhos futuros.

2 Descrição da Máquina de Tração

Neste capítulo será apresentada uma visão geral do tracionador desenvolvido, bem como um detalhamento dos módulos que o compõem. Também será descrito o circuito eletrônico projetado ao longo do trabalho.

2.1 Visão Geral

A máquina de tração criada e mostrada na Figura 6 possui três módulos (destacado em azul) com funções específicas que combinadas resultam na ação de puxar ou empurrar a sonda de inspeção em uma velocidade desejada. Essa divisão proporciona maior praticidade de manutenção, pois junta elementos com características semelhantes num mesmo módulo. O tracionador também conta com um tripé de sustentação. Vale comentar que foi usada impressão 3D em PLA (ácido polilático) para fabricar grande parte das peças, o que agrega em flexibilidade e redução de custos.

O módulo de tração executa a ação de puxar ou empurrar a sonda a partir do giro de um motor CC. Com esse propósito, utiliza-se a polia destacada na Figura 6 para converter o giro do motor em velocidade linear para a sonda, a qual é presa na estrutura pelas polias menores a partir do rosquear do parafuso de nivelamento. O módulo de alimentação é empregado para fornecer a tensão adequada aos componentes elétricos e eletrônicos do tracionador. O módulo de controle é responsável por fazer a sonda se movimentar numa velocidade desejada. Além disso, nesse módulo há uma Interface Homem Máquina (IHM), possibilitando ao operador definir as configurações de ensaio. O tripé foi projetado para permitir posicionar o módulo A em diferentes alturas. Este tripé é composto de perfis cilíndricos e retangulares de alumínio, unidos por parafusos a peças modeladas e impressas em PLA. Essas peças permitem a articulação da estrutura, variando a altura do módulo de tração e a posição das pernas do tripé.

Na sequência, detalhar-se-ão a construção e o funcionamento de cada módulo e do tripé. Vale comentar que os desenhos das peças, bem como o software desenvolvido encontram-se disponíveis no github ¹.

¹ <https://github.com/Okdovisk/Tracionador>

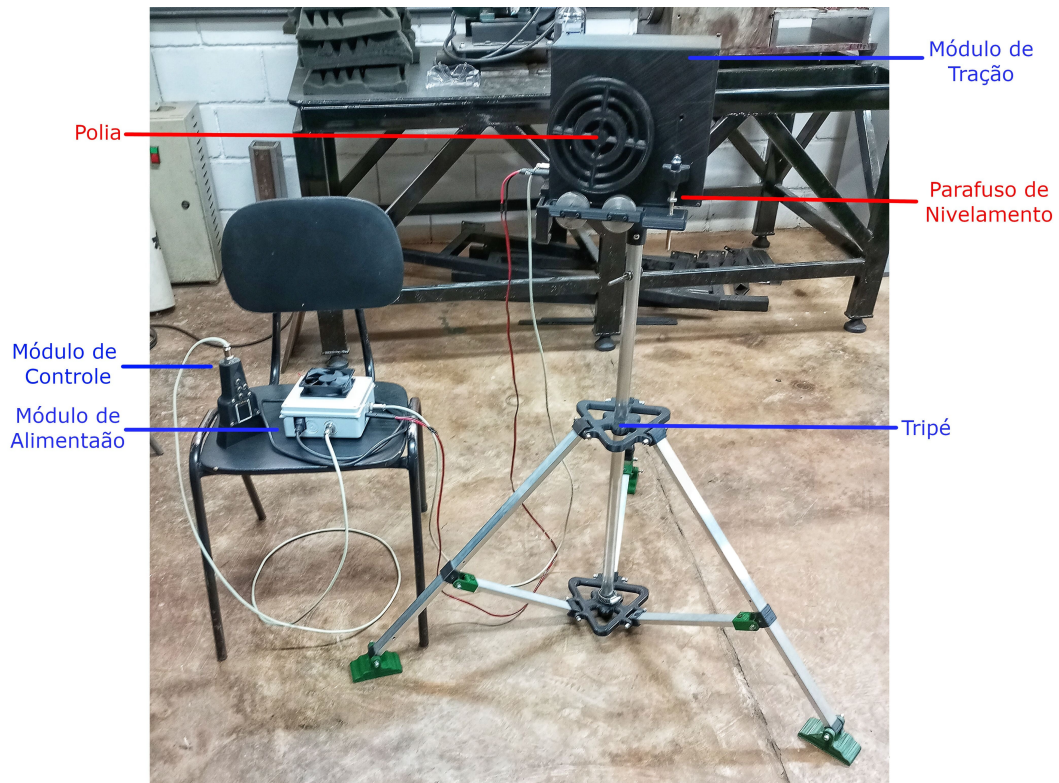
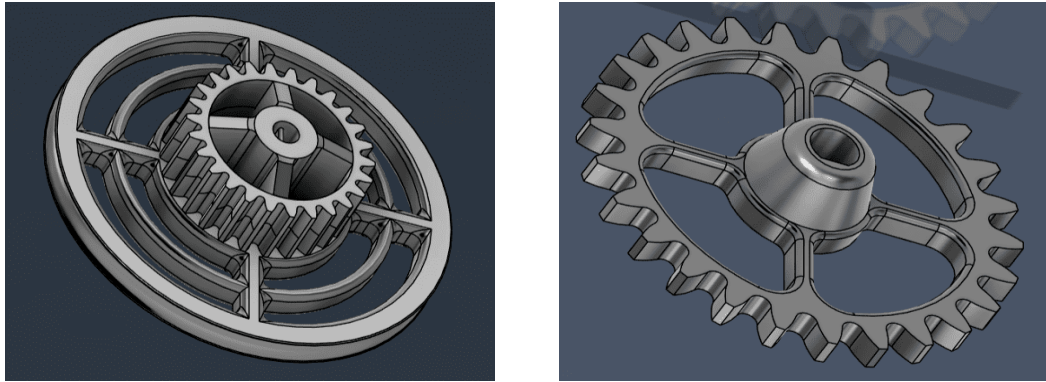


Figura 6 – Foto do tracionador destacando os três módulos, tripé, polia e o parafuso de nivelamento

2.2 Módulo de tração

O módulo de tração é o centro motor da máquina. Nesse módulo estão localizados os componentes eletrônicos e mecânicos que resultam na ação de puxar e empurrar a sonda. O movimento provém do giro do motor CC modelo F006.WM0.310, 24 VCC, marca Bosh. Para variar a velocidade de movimentação da sonda de maneira controlada, manipula-se a tensão média fornecida ao motor utilizando uma ponte H e a modulação por largura de pulso (UMANS, 2014). Em particular, o controle de velocidade é realizado em malha fechada. Com esse propósito, mede-se a velocidade angular do motor utilizando um encoder modelo E50S-5000-6L-5 da Autonics. A transmissão de movimento que proporciona essa medição é feita por um encaixe de engrenagens que estão ligadas aos eixos do motor e do encoder, modeladas e mostradas nas Figuras 7a e 7b. Além disso, a engrenagem ligada ao eixo do motor é uma peça que também possui uma polia, a qual mantém o contato com a sonda para a movimentação.



(a) Engrenagem-polia do motor.

(b) Engrenagem do encoder.

Figura 7 – Engrenagens internas ao módulo de tração usadas para transformar o movimento angular do motor em movimento linear da sonda e medir a velocidade do motor.

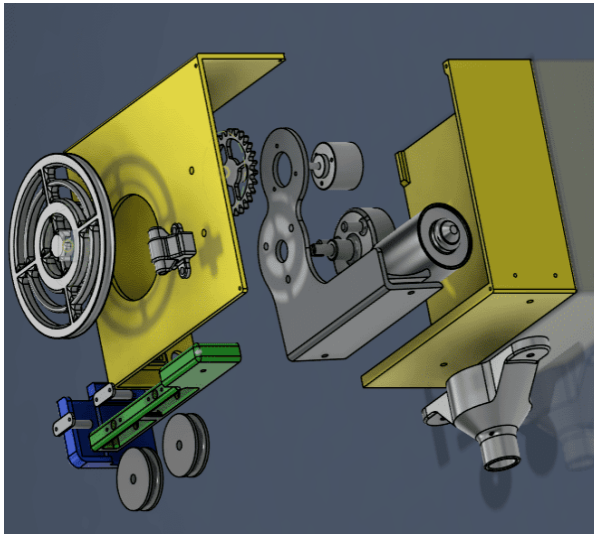
As engrenagens em contato possuem o mesmo diâmetro de 68,9 mm e 26 dentes, fazendo com que as velocidades angulares do motor e encoder sejam iguais. A montagem real das engrenagens pode ser vista na Figura 8. O conjunto motor-encoder foi posicionado dentro de uma caixa (mostrada na Figura 9b) que foi projetada para ser acoplável sobre o tripé. Para isso, na base da caixa há um perfil cilíndrico de diâmetro similar ao da haste do tripé com parafuso de fixação (vide Figura 9a).



Figura 8 – Mecanismo interno do Módulo de Tração.

A caixa é feita com peças projetadas para simplificar a montagem e desmontagem do conjunto de acordo com a necessidade, como manutenção e transporte. Tais peças podem se vistas na Figura 9a. Também podem ser vistos os elementos que formam o mecanismo utilizado para movimentar a sonda de inspeção. A ideia é girar um parafuso de ajuste que movimentam as polias menores até fazer a pressão necessária na sonda, fazendo com que essa fique presa entre as polias menores e a polia maior. Desse modo, ao girar o motor, tem-se um movimento da polia maior que resultará em um movimento linear

da sonda. Por fim, foram colocados dois conectores laterais para cabos de alimentação e transmissão de dados provenientes dos módulos de alimentação e controle.



(a) Detalhamento das peças que compõem o Módulo de Tração.



(b) Foto do módulo real.

Figura 9 – Módulo de Tração

2.3 Módulo de alimentação

O módulo de alimentação contém os componentes eletrônicos necessários para fazer a conversão da tensão da rede - 110/220 VAC - para tensões contínuas - VCC - adequadas para alimentar os componentes eletrônicos. Esses componentes foram posicionados em uma caixa ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno) mostrada na Figura 10. Além disso, o módulo conta com um motor ventilador para refrigeração dos eletrônicos de potência.



Figura 10 – Módulo de Alimentação.

Dentro da caixa (vide Figura 11), encontra-se uma fonte de 24 VCC (carregador portátil universal, entrada 110/220 VAC, saída 12-19 VCC/5,5 A ou 20-24 VCC/5 A). Essa fonte é utilizada para alimentar: ventilador, ponte H modelo BTS7960 e regulador

de tensão modelo L7805C, o qual abaixa a tensão da fonte de 24 VCC para 5 VCC, que é a tensão adotada para alimentar o módulo de controle e o encoder.

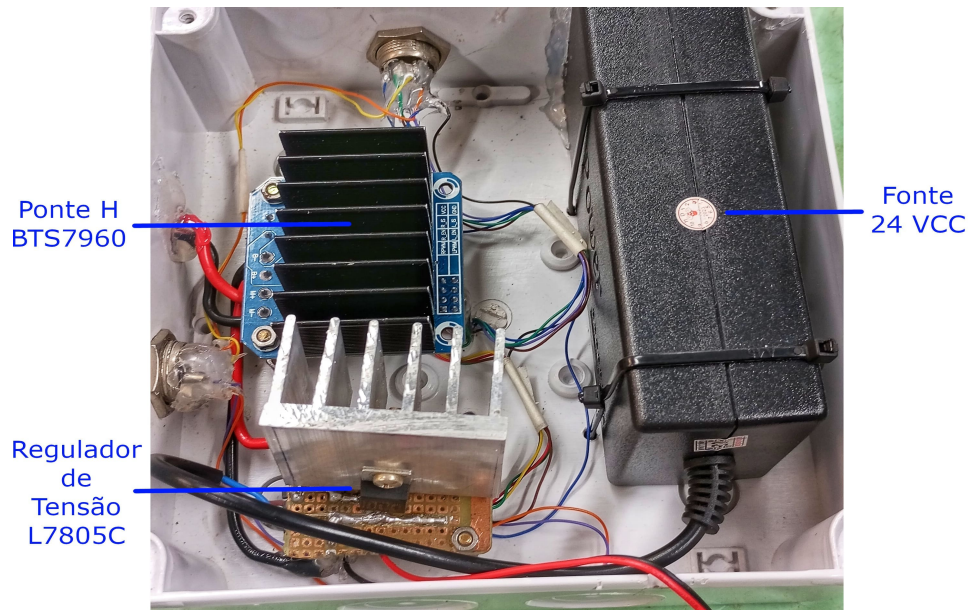


Figura 11 – Foto dos componentes internos do módulo de alimentação.

A ponte H BTS7960B (vide Figura 12) recebe 5 VCC do regulador de tensão para a alimentação de seu circuito de controle (pinos VCC) e ativação dos motores (pinos R_EN e L_EN). Esse circuito recebe os comandos do módulo de controle pelos pinos RPWM e LPWM, sendo esses as entradas dos sinais PWM para controlar a tensão média fornecida ao motor. Os pinos R_IS e L_IS são sensores de corrente e enviam sinais para o módulo de controle de forma que esse possa inspecionar a corrente do motor. O leitor pode encontrar mais detalhes sobre o funcionamento dessa ponte H em *instructables* ².

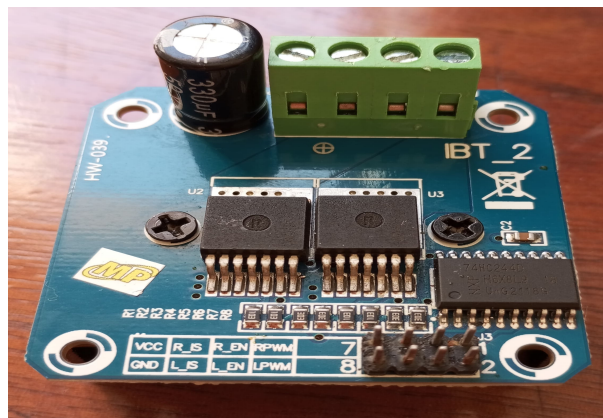


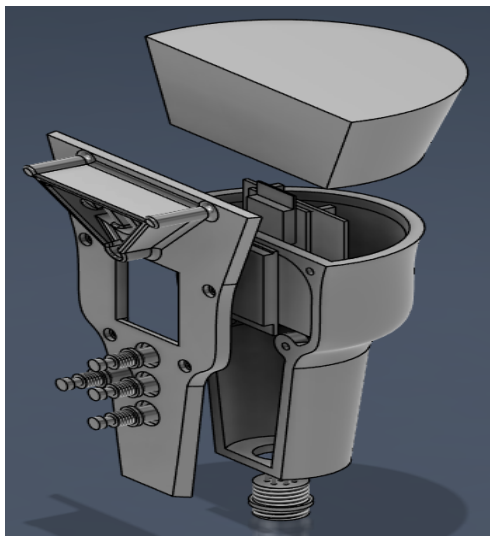
Figura 12 – Foto da ponte H BTS7960B

Os sinais do tipo PWM que comandam o motor são gerados no microcontrolador localizado dentro do módulo de controle, que é detalhado a seguir.

² <https://www.instructables.com/Motor-Driver-BTS7960-43A/>

2.4 Módulo de controle

O módulo de controle ou *Joystick* foi impresso em 3 partes que são combinadas numa montagem como mostra a Figura 13. Um conector na base do módulo recebe o cabo de sinais. Na Figura 13a pode-se ver que existem furos na peça anterior para o encaixe dos botões e *display*. A peça posterior possui um anteparo para segurar o *display* e armazenar os componentes eletrônicos. Ademais, foi projetada em um formato que facilita o manuseio pelo operador. A peça superior fecha o conjunto e pode ser removida para facilitar o acesso à ESP em manutenções ou atualizações de código. Todas as peças são unidas por parafusos.



(a) Desenhos em CAD das três partes do *joystick*.



(b) *Joystick* montado.

Figura 13 – Módulo de Controle.

Uma ESP32 DevKitC foi usada como microcontrolador da máquina devido a características como boa capacidade de processamento (2,4 MHz clock), elevado número de entradas/saída digitais e analógicas, baixo custo e por possuir dois processadores (dual-core). A ESP32 foi soldada numa placa de fenolite junto a resistores pull-up e barras de pinos, conforme mostrado na Figura 14. A afiação do cabo é também soldada na placa para transmissão de sinais entre o *joystick*, ponte H e encoder.

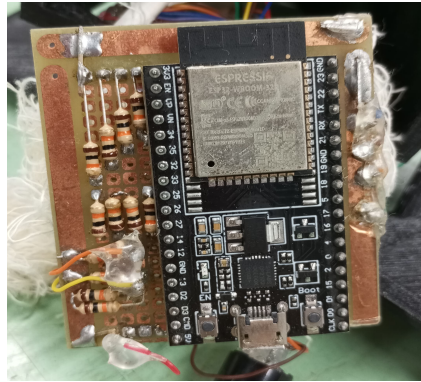


Figura 14 – Placa eletrônica do Tracionador

Os componentes de interface com o usuário são quatro botões e um módulo *display* TFT com resolução de 128x128 pixels. Esses componentes são também soldados na placa formando o circuito interno do módulo de controle e podem ser vistos numa montagem parcial na Figura 15.

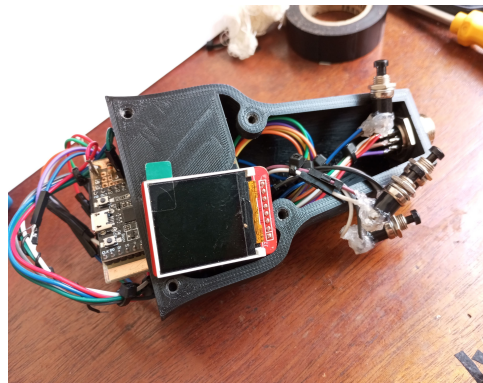


Figura 15 – Módulo de Controle aberto, mostrando seus componentes internos.

O software de controle da máquina e interface com o usuário foi desenvolvido no ambiente integrado de desenvolvimento - *Integrated Development Environment* (IDE) - PlatformIO, uma extensão presente no Visual Studio Code (Microsoft). Mais ainda, o código foi escrito sobre o FreeRTOS (AWS, 2017), um sistema operacional de tempo real para microcontroladores gratuito e de código aberto. Para manter a ordem operacional, foram criadas tarefas ligadas especificamente a algum dos processadores da ESP. Como a prioridade da máquina é manter a velocidade da sonda constante, foi criada uma tarefa exclusivamente para um dos processadores (PRO CPU) contendo o laço de controle de malha fechada. Para as atividades de IHM, como leitura dos botões e exibição de imagens no *display*, foram criadas tarefas que compartilham o outro processador (APP CPU).

A partir do código desenvolvido o operador pode usar os botões para navegar por um menu, o qual permite que algumas configurações de operação sejam definidas, bem como proporciona o controle do início e fim do ensaio. Uma das configurações possíveis é

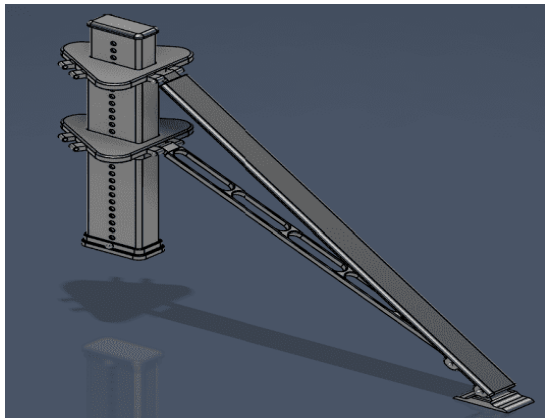
a alteração da velocidade de operação e outras configurações podem ser inseridas, dependendo dos aperfeiçoamentos futuros no sistema. A tela inicial pode ser vista na Figura 16 e um manual de utilização do tracionador se encontra no Apêndice A.



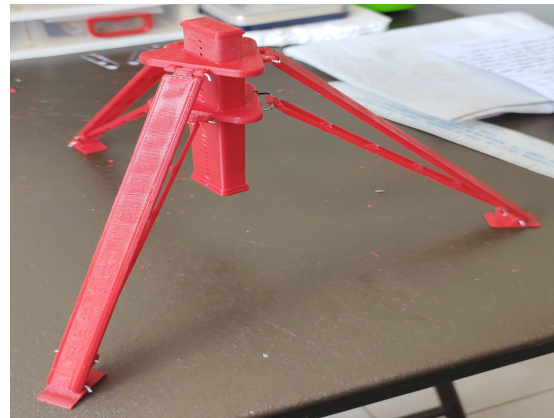
Figura 16 – Tela inicial do menu operacional.

2.5 Tripé

O tripé foi projetado para manter o módulo de tração em diferentes alturas. Esse tripé foi projetado em software AutoCAD (Fusion 360) - Figura 17a -, a partir da modelagem de cada uma das peças que formam e dão movimento à estrutura. Uma versão em miniatura do tripé foi impressa para análise - Figura 17b.



(a) Desenho em AutoCAD.



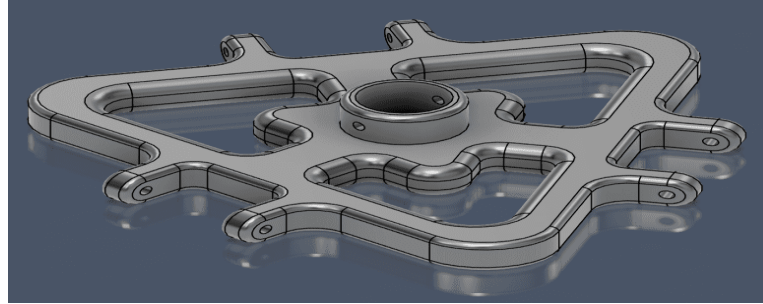
(b) Impressão 3D.

Figura 17 – Protótipo do tripé.

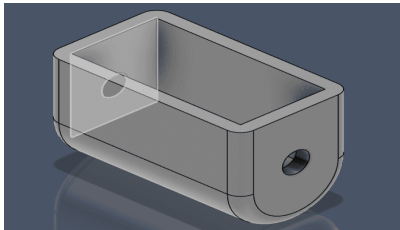
Para a fabricação do tripé real foram escolhidos perfis de alumínio, visto que esses possuem resistência necessária para o peso do conjunto e são consideravelmente mais leves que perfis de aço. Os perfis adquiridos foram de barras retangulares, para montar as pernas, e cilíndricas, para a haste vertical.

Visando unir as pernas e a haste vertical permitindo movimento em pontos específicos projetaram-se as peças mostradas na Figura 18. Essas peças são: um guia (Figura 18a), deslizando na haste vertical para alterar a abertura das pernas e altura do tripé; um batente (Figura 18a), igual à guia, porém fixa; calços para as barras (Figura 18b e Figura

18c), a fim de proteger as extremidades e dificultar a entrada de insetos; um conector (Figura 18d) em cada perna, proporcionando encaixe para a junta; uma junta (Figura 18e) em cada barra intermediária, permitindo a mobilidade das pernas; e o pé (Figura 18f), fornecendo, em conjunto com uma tira de borracha colada no solado, uma base de apoio estável para a estrutura manter contato com o chão.



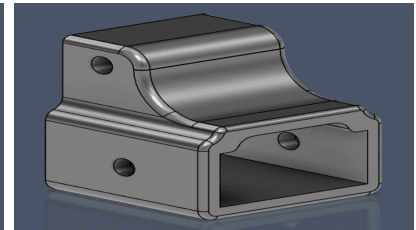
(a) Guia regulador de abertura das pernas e altura vertical. Também corresponde ao batente, sendo este uma versão fixa da peça.



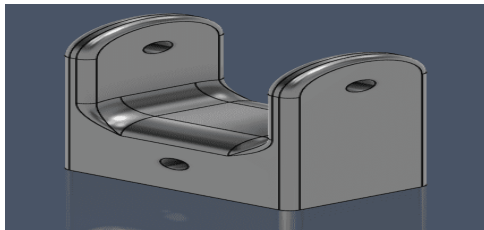
(b) Calço para as barra retangulares.



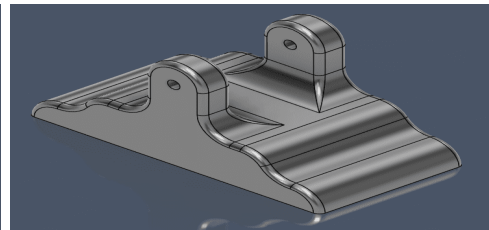
(c) Calço para a barra cilíndrica.



(d) Conector para encaixe entre pernas juntas.



(e) Junta para mobilidade das pernas.



(f) Pé de apoio.

Figura 18 – Peças do tripé.

Também é importante destacar que o tripé possui outra regulação de altura além daquela proporcionada pelo guia. Existe uma segunda barra vertical, interna à primeira. A barra interna é furada em alguns pontos no decorrer de seu comprimento, permitindo a passagem de um pino através deles. Com o posicionamento relativo das barras e o pino para travar o conjunto, tem-se mais uma forma de ajustar a altura do módulo de tração com relação ao nível do chão. Esse sistema pode ser visto na Figura 19, bem como quase todas as peças citadas anteriormente. Para facilitar a identificação, as partes mostradas na Figura 18 encontram-se destacadas na Figura 19

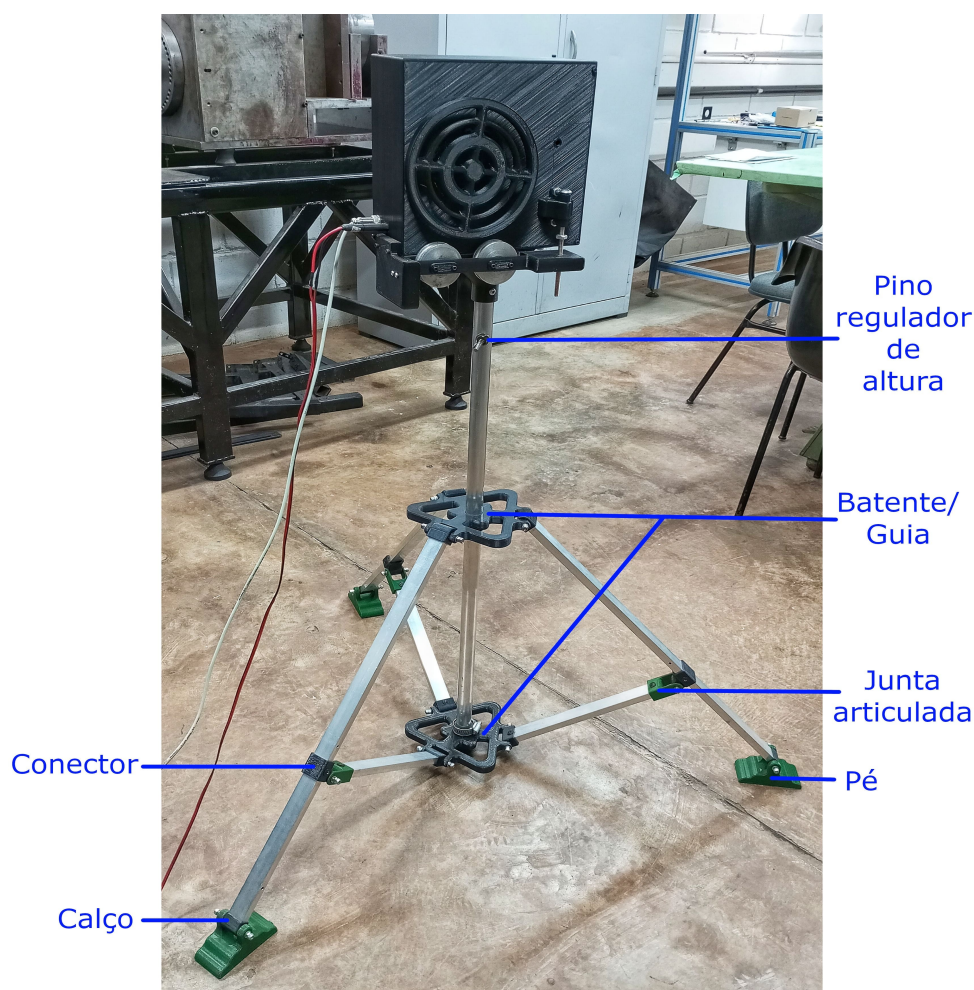


Figura 19 – Foto da versão final do tripé.

2.6 Circuito Eletrônico

O diagrama elétrico/eletrônico da Figura 20 mostra as conexões entre todos os módulos. As especificidades de cada componente já foram descritas nas sessões anteriores e a transmissão de energia e sinais são feitas por cabos conectados entre os módulos. Esses cabos podem ser vistos na Figura 6. É importante salientar que a alimentação do motor e a transmissão de dados foram realizadas em cabos distintos para evitar problemas causados por interferências eletromagnéticas. Esses cabos distintos foram representados pelos diferentes barramentos de fios conectados um ao motor e um ao encoder. Além disso, o diagrama mostra as ligações a partir da fonte VCC.

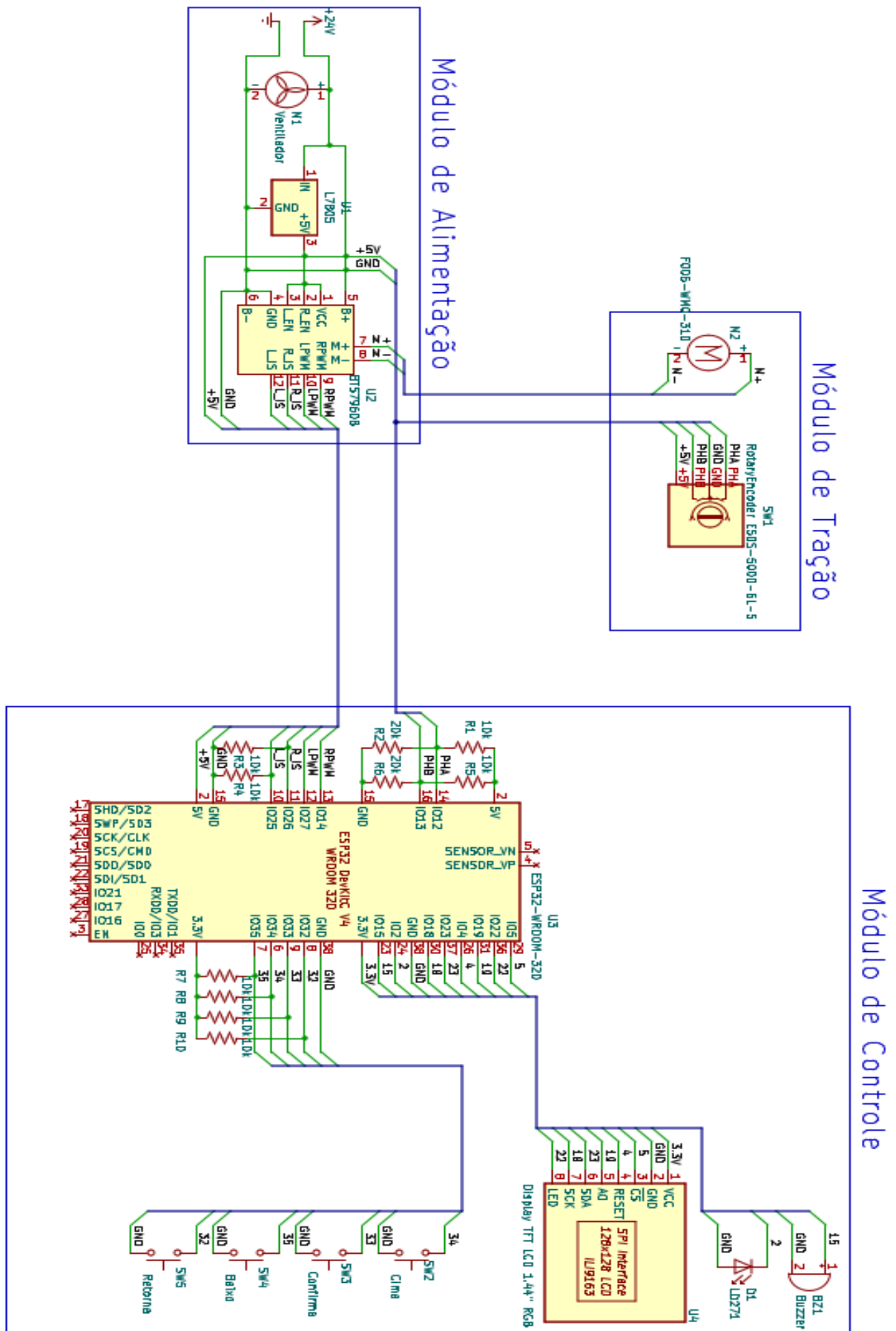


Figura 20 – Desenho do circuito eletrônico geral da máquina, integrando todos os módulos.

3 Sistema de Controle

Neste capítulo será descrito o sistema de controle em malha fechada para a máquina de tração. O objetivo do controlador consiste em rastrear referências de velocidade linear fornecidas pelo operador da máquina.

3.1 Caracterização do sistema

A Figura 21 ilustra o sistema de controle completo, incluindo blocos para representar efeitos práticos como “Saturação”, “Atraso” e “Zona Morta”. O controlador $C(s)$ foi projetado usando como referência a rotação do encoder em radianos por segundo (rad/s), enquanto o operador define uma referência de velocidade linear em milímetros por segundo (mm/s) para a movimentação da sonda. Os blocos de “Conversão” possuem a finalidade de fazer a transformação entre essas duas representações de velocidades. Na primeira etapa converte-se a referência do operador de mm/s para rad/s - $V_{Ref}(s)$ para $W_{Ref}(s)$. Já no final da implementação, converte-se a velocidade angular do motor de rad/s para mm/s - $W_Y(s)$ para $V_Y(s)$.

O bloco “filtro passa-baixas $H(s)$ ” representa um filtro Butterworth digital de segunda ordem empregado para mitigar o ruído da medida de velocidade (SMITH, 2008). O bloco $C(s)$ é o controlador projetado para rastrear referências de velocidade angular, que será detalhado em seções posteriores. A saturação se refere à normalização da entrada $U(s)$ entre 0 e 1. Na prática, essa entrada calculada pelo controlador é, então, convertida para uma faixa entre $[0, 255]$ uma vez que o conversor digital-analógico do microcontrolador utilizado é de 8 bits. O erro é calculado pela subtração da velocidade de referência pela velocidade filtrada $E(s) = W_{Ref}(s) - W_{Y_F}(s)$. Os blocos “Atraso” e “Zona Morta” representam efeitos práticos não-lineares do motor CC em questão e serão caracterizados a seguir. Já $G(s)$ é o modelo matemático do motor e será identificado na Seção 3.1.3.

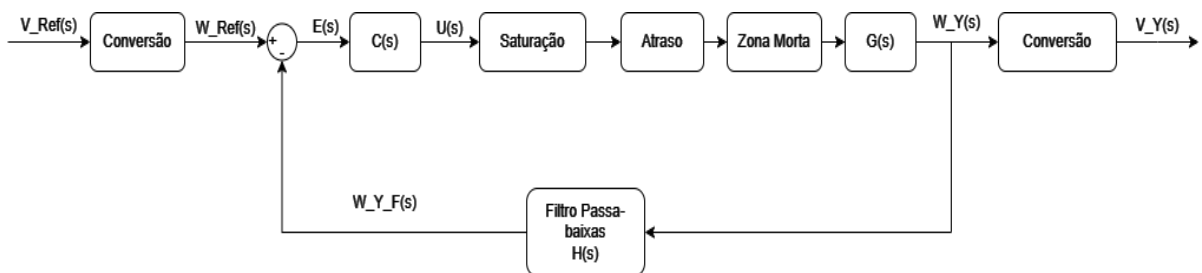


Figura 21 – Diagrama de blocos do sistema de controle. Fonte: Autor

3.1.1 Identificação do atraso de resposta do motor

Atraso de entrada é o tempo necessário para que a aplicação de uma entrada gere alguma alteração na saída. Para estimar o atraso do motor, foi aplicada uma entrada de amplitude 0,47 em 3 s e mediu-se a evolução temporal da velocidade. A evolução temporal da velocidade é mostrada na Figura 22 e uma ampliação em torno de 3 s na Figura 23. Como pode ser visto na ampliação, o motor apresenta um atraso de aproximadamente 10 ms em sua resposta. Esse atraso pode estar associado ao sistema de redução do equipamento e é considerado nas simulações.

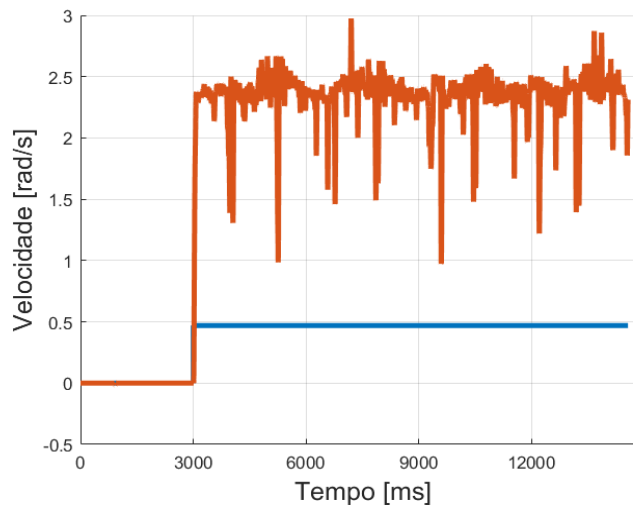


Figura 22 – Gráfico para medição do atraso na resposta a uma entrada do tipo degrau. Têm-se a velocidade em rad/s do motor (linha laranja) e o valor normalizado para a entrada (linha azul).

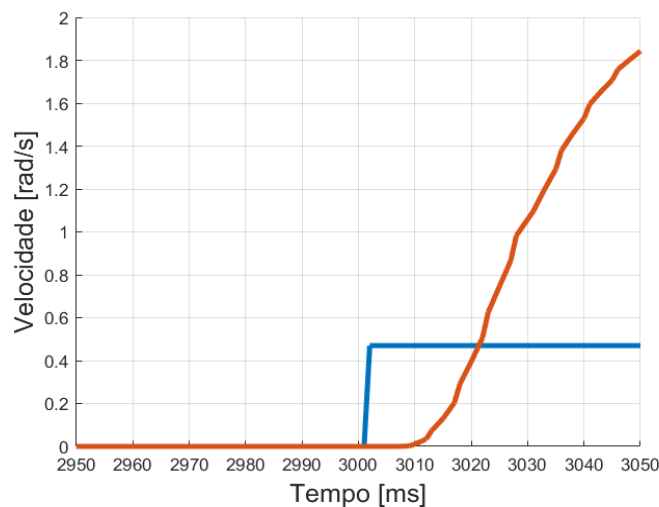


Figura 23 – Gráfico para medição do atraso ampliado no instante da aplicação do degrau (3000 ms).

Além disso, existe um atraso intrínseco à implementação de um controlador de

velocidade digital, definido como $\frac{T_a}{2}$, sendo T_a o período de amostragem adotado (OGATA, 2011).

3.1.2 Zona Morta

Teoricamente, a relação tensão aplicada a um motor CC e velocidade angular produzida é linear (FRANKLIN; POWELL; EMAMI-NAENI, 2019). Contudo, para valores baixos de entrada (i.e. para baixas tensões aplicadas ao motor), é possível que não seja gerada força suficiente para vencer a sua inércia e o atrito estático, e consequentemente o motor não gire. Essa faixa de valores de entrada na qual o motor não gira é chamada de zona morta (PAWLOWSKI et al., 2014). Para caracterizar a zona morta do motor adotado no presente trabalho, realizou-se um ensaio aplicando uma entrada senoidal de amplitude igual a 120 numa faixa de 8 bits [0, 255] disponível no microcontrolador. Essa amplitude é igual a 46,87% de ciclo ativo (ou *duty cycle*). Com os dados dos ensaios, construiu-se o gráfico da Figura 24. Na figura destacam-se 8 valores de velocidade. Tais valores são as primeiras velocidades de rotação antes/depois da zona morta. É possível verificar que a zona morta do motor é por volta de $\pm 0,2$ (aproximadamente 4,8 V). Ou seja, para valores de u dentro dessa faixa, o motor não produz nenhuma rotação. Tal efeito também é considerado nas simulações desenvolvidas.

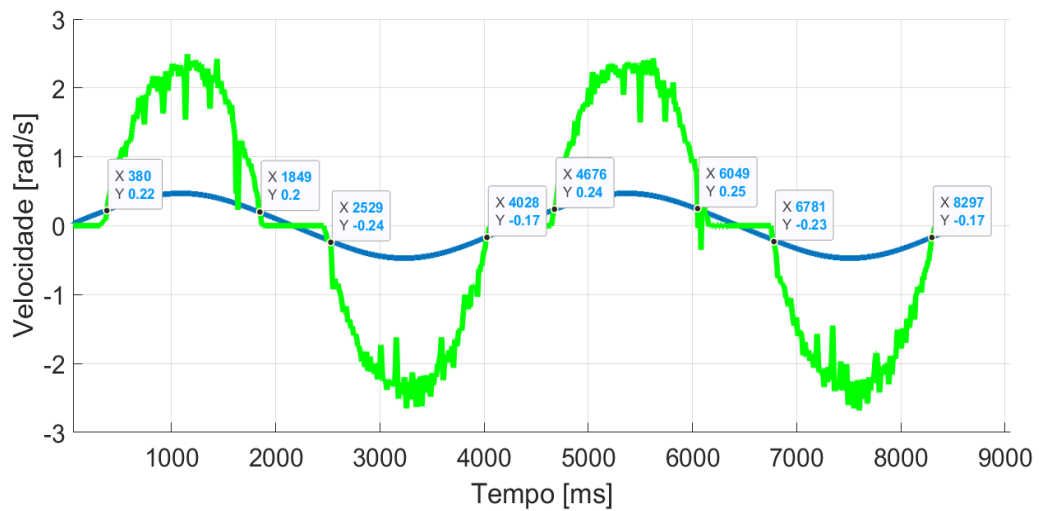


Figura 24 – Evolução temporal da velocidade a uma entrada senoidal, destacando os limites da zona morta. Têm-se a velocidade angular do motor em rad/s (linha tracejada verde) e a entrada normalizada [0,1] (linha contínua azul).

3.1.3 Identificação de modelo para a relação entrada-saída do motor

Para identificar um modelo matemático para o motor foi usado o método da resposta em frequência (OGATA, 2011). Esse método consiste na aplicação de entradas

senoidais com diferentes amplitudes e frequências. Logo, a entrada da planta é dada por:

$$u(t) = A \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (3.1)$$

em que A é a amplitude de entrada e ω é a frequência.

As amplitudes senoidais escolhidas foram de 23,43 %, 46,87 % e 93,75 % (relativas a uma faixa de 8 bits: 60, 120 e 240); e as frequências foram de 0,1; 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 4; 6; 10; 25; 40; 60; 85; 100 e 120 rad/s. Foram construídos gráficos contendo as senoides de entrada e saída em todas as frequências para cada uma das amplitudes, totalizando 48 gráficos. Analisando esses gráficos, foram extraídos três dados: o atraso entre saída e entrada t_d , valor de pico a pico da entrada V_{ppu} e valor de pico a pico da saída V_{ppy} . Esses dados são ilustrados na Figura 25.

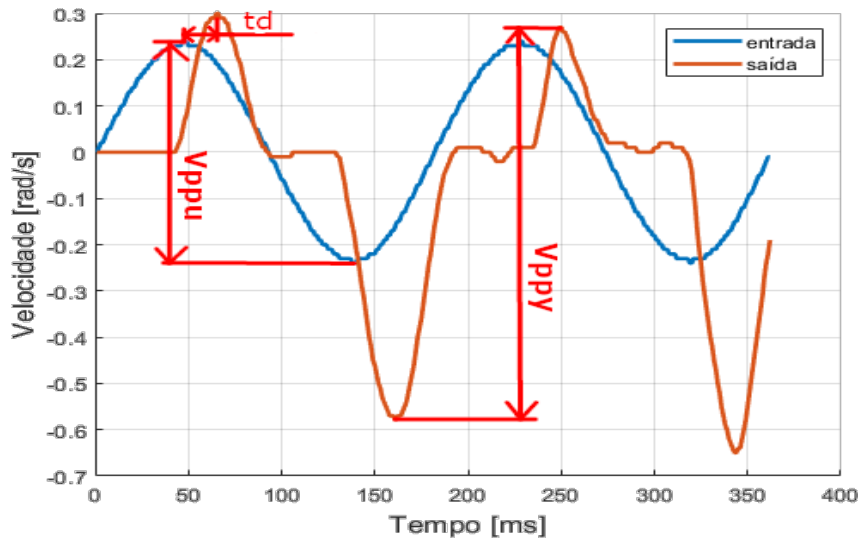
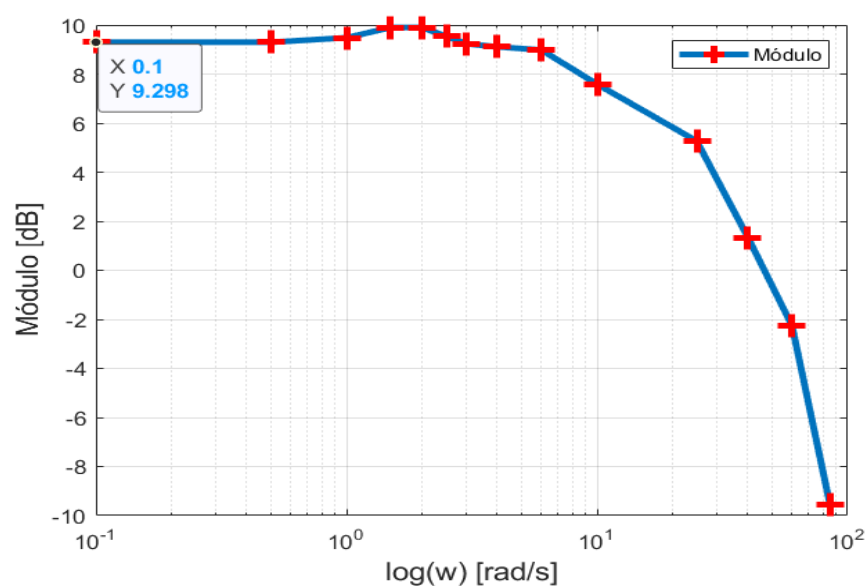


Figura 25 – Ilustração dos dados V_{ppu} , V_{ppy} e t_d nos gráficos da resposta em frequência.

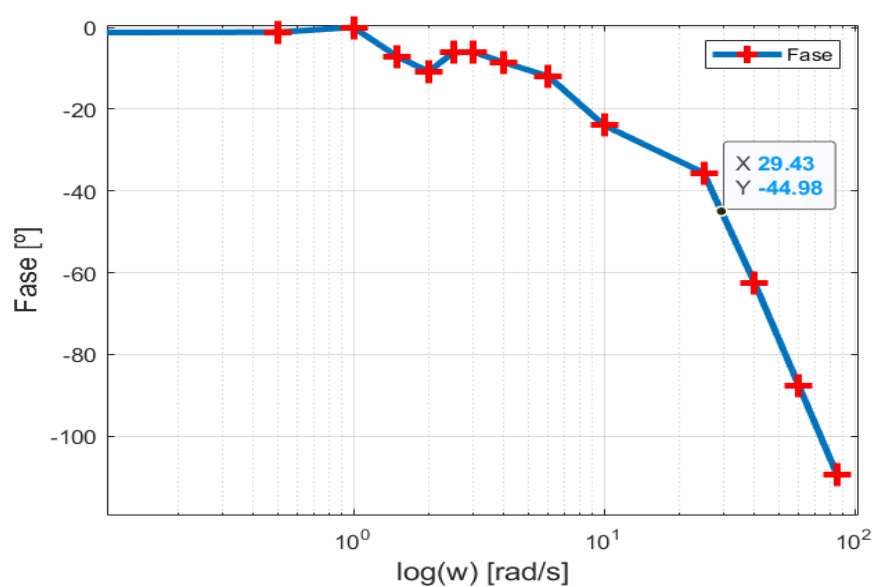
Da literatura, considerando que o motor CC é um sistema linear e invariante no tempo, sabe-se que a resposta em regime permanente a uma entrada senoidal é uma senoide de saída com a mesma frequência de excitação da entrada. Contudo, amplitude e fase são modificadas por $|G(s)j\omega|$ e $\angle G(s)j\omega$ (OGATA, 2011). Matematicamente, aplicando-se uma senoide em um Sistema Linear e Invariante no Tempo (SLIT), tem-se a seguinte saída em regime permanente:

$$y(t) = A |G(j\omega)| \cdot \text{sen}(\omega t + \angle G(j\omega)) \quad (3.2)$$

Logo, considerando (3.1) e (3.2), e de posse dos dados da Figura 25, é possível calcular $|G(j\omega)|$ e $\angle G(j\omega)$ para todas as frequências de excitação mencionadas anteriormente. Tais valores dão origem a digramas de Bode do motor para cada uma das amplitudes adotadas. As Figuras 26, 27 e 28 mostram os diagramas de Bode.

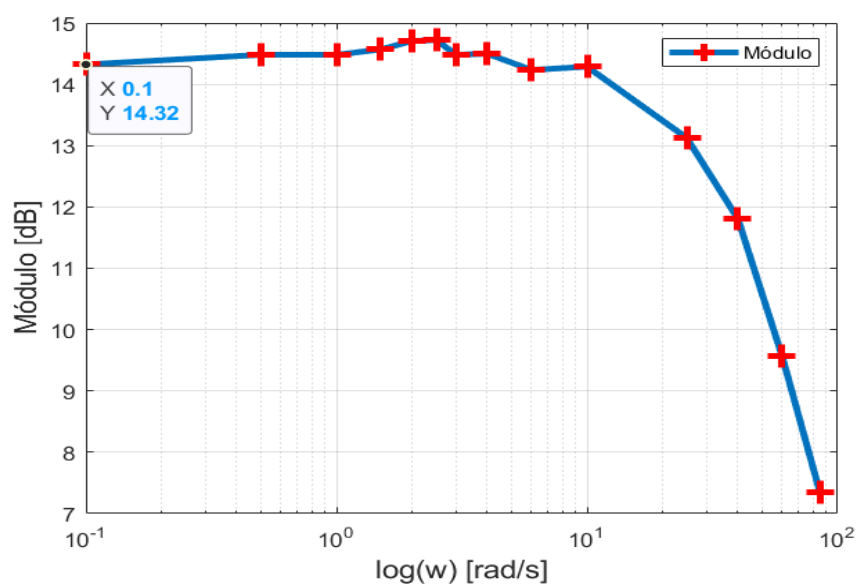


(a) Diagrama de módulo.

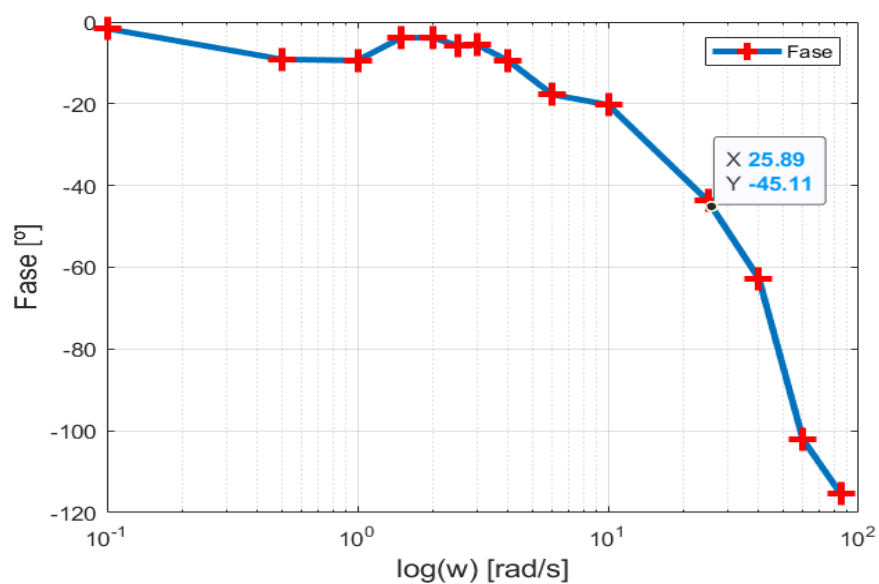


(b) Diagrama de fase.

Figura 26 – Diagrama de Bode da amplitude 23,43 %.

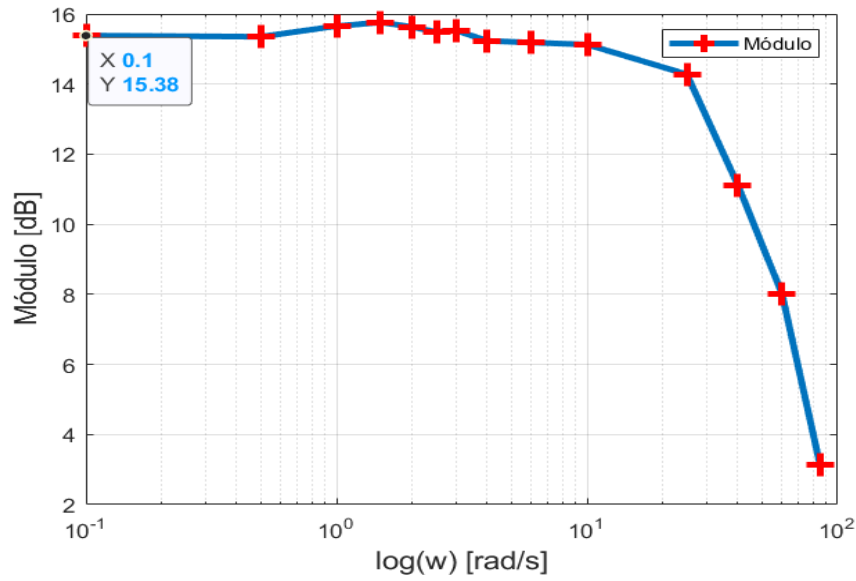


(a) Diagrama de módulo.

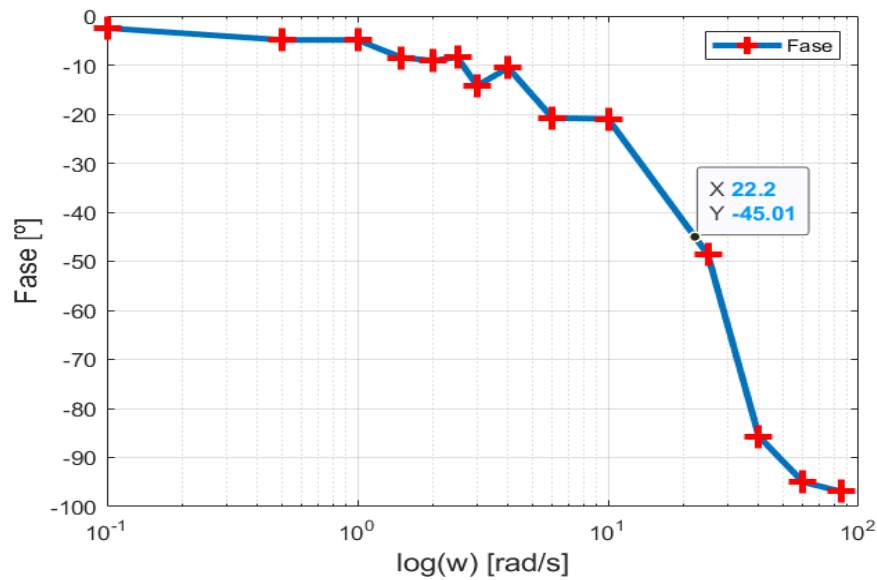


(b) Diagrama de fase.

Figura 27 – Diagrama de Bode da amplitude 46,87 %.



(a) Diagrama de módulo.



(b) Diagrama de fase.

Figura 28 – Diagrama de Bode da amplitude 93,75 %.

Assumindo um modelo de primeira ordem e negligenciando os efeitos do atraso, tem-se um modelo da seguinte forma para a dinâmica do motor:

$$G(s) = \frac{k}{s + \alpha} \quad (3.3)$$

O polo é marcado pela frequência relacionada à fase de -45° no diagrama de fase e o ganho estático pela curva de magnitude em baixas frequências (OGATA, 2011). Logo, podemos calcular α e k para cada uma das amplitudes de entrada do seguinte modo:

$$\alpha_1 \simeq 29,0 \quad (3.4)$$

$$\alpha_2 \simeq 25,8 \quad (3.5)$$

$$\alpha_3 \simeq 22,4 \quad (3.6)$$

$$9,3 = 20 \cdot \log \frac{k_1}{29} \Rightarrow k_1 \simeq 84,6 \quad (3.7)$$

$$14,3 = 20 \cdot \log \frac{k_2}{25,8} \Rightarrow k_2 \simeq 133,8 \quad (3.8)$$

$$15,4 = 20 \cdot \log \frac{k_3}{22,4} \Rightarrow k_3 \simeq 131,9 \quad (3.9)$$

Então, adotaram-se os valores médios de α e k para o modelo final, obtendo-se:

$$\frac{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3}{3} = 25,7 \quad (3.10)$$

$$\frac{k_1 + k_2 + k_3}{3} = 116,76 \quad (3.11)$$

$$G(s) = \frac{116,76}{s + 25,7} \quad (3.12)$$

3.1.4 Filtro Butterworth

Como dito anteriormente, foi preciso usar um filtro para os sinais de velocidade. Esse filtro foi um filtro Butterworth digital de segunda ordem (SMITH, 2008). Como desvantagem do uso de um filtro passa-baixas, tem-se um atraso na leitura do sensor. Esse efeito foi considerado durante as simulações e o projeto dos ganhos do controlador.

Ao observar os ruídos de leitura foi possível encontrar um limiar de $\omega_c = 30$ rad/s como valor para a frequência de corte. Uma vez definida essa frequência e considerando o período de amostragem $T_a = 5$ ms, foi possível obter a seguinte função de transferência para o filtro:

$$H(z) = \frac{0,00554272z^2 + 0,01108543z + 0,00554272}{z^2 - 1,77863178z + 0,80080265} \quad (3.13)$$

3.1.5 Projeto de controlador

Como já observado em motores CC, a velocidade da resposta em malha aberta é satisfatória, fazendo com que um controlador Proporcional-Integral (PI) seja uma boa escolha de projeto, dada a sua simplicidade de implementação, manutenção e projeto. Além disso, com um ajuste correto dos ganhos, é possível atingir bons níveis de robustez. A equação para o controlador PI é como se segue:

$$C(s) = \frac{sK_p + K_i}{s} \quad (3.14)$$

As constantes K_p e K_i são o ganho proporcional e o ganho integral, respectivamente. Esses ganhos foram definidos em simulação por tentativa e erro, já incluindo os

efeitos práticos de atraso, zona morta e filtro. Como resultado, foi obtido um desempenho satisfatório com $K_p = 0,1$ e $K_i = 3$.

Dessa forma, fica definida a equação do controlador como:

$$C(s) = \frac{0,1s + 3}{s} \quad (3.15)$$

Uma vez definido um controlador no modelo analógico, foi preciso encontrar seu equivalente discreto $C(z)$. Para isso, foi utilizado o método da Integração Numérica de Trapézios (Método de Tustin) (FRANKLIN; POWELL; EMAMI-NAENI, 2019).

A definição do período de amostragem T_a foi feita a partir da identificação da largura de banda de malha fechada. Isto é, da frequência em que a magnitude corta o -3 dB no diagrama de Bode de malha fechada. Esse valor é mostrado na Figura 29. É importante destacar que, nessa etapa, foram negligenciados os efeitos de atraso e a zona morta.

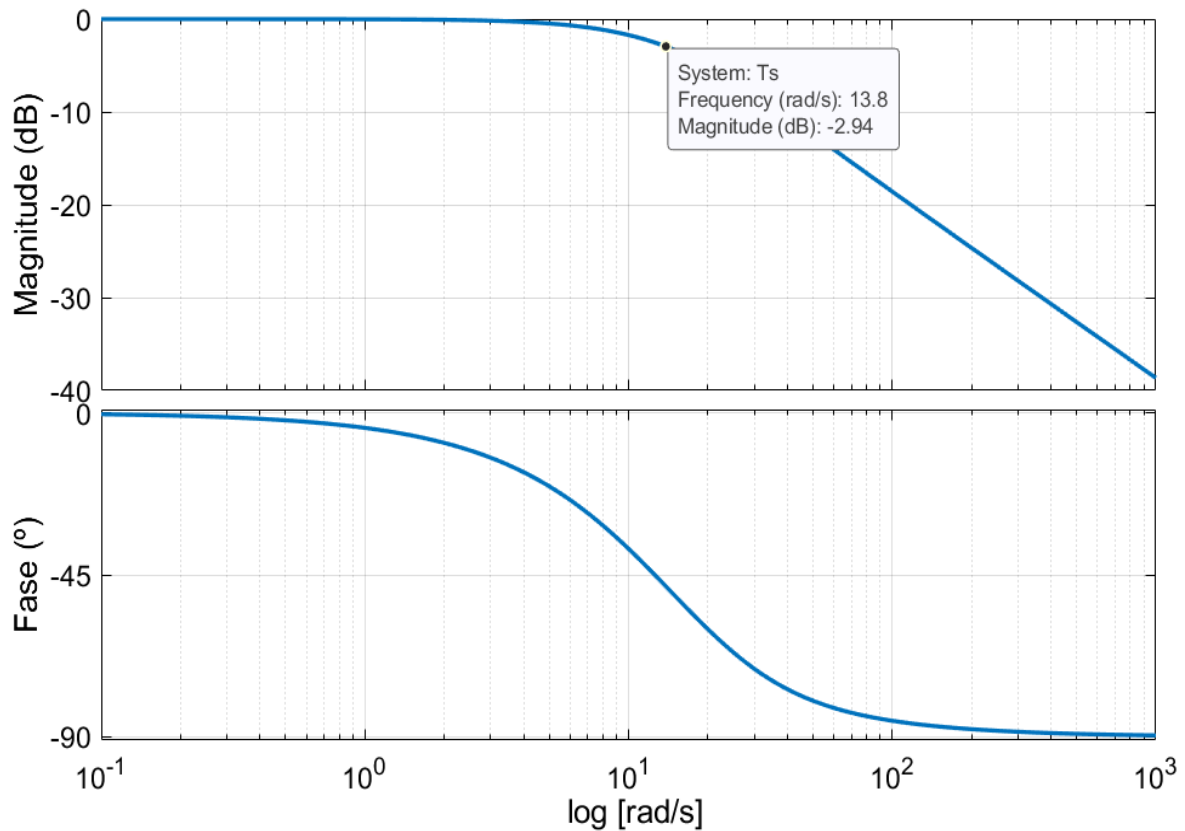


Figura 29 – Identificação da largura de banda no diagrama de Bode de malha fechada.

A frequência encontrada pelo diagrama é de 18,4 rad/s. Logo, definiu-se a frequência de amostragem ω_s como:

$$\omega_s = \omega_b 30 \Leftrightarrow \omega_s \simeq 552 \text{ rad/s} \quad (3.16)$$

Com tal frequência de amostragem, tem-se um período de amostragem dado por:

$$T_a = \frac{2\pi}{\omega_s} \Leftrightarrow T_a \simeq 11,38 \text{ ms} \quad (3.17)$$

A fim de reduzir ainda mais o atraso gerado pela implementação digital do controlador analógico, dentro dos limites suportados pelo microcontrolador, foi usado um período de amostragem $T_a = 5 \text{ ms}$.

Como já mencionado, o método de Tustin foi utilizado na emulação do controlador analógico, determinando-se o seguinte controlador digital:

$$C(z) = \frac{0,1075z - 0,0925}{z - 1} \quad (3.18)$$

Por fim, a implementação do controlador digital em linhas de código depende da equação de diferenças correspondente a $C(z)$, a qual pode ser encontrada pela relação $C(z) = \frac{U(z)}{E(z)}$ e utilizando a propriedade de deslocamento no tempo da Transformada Z, obtendo-se:

$$u(k) = u(k - 1) + 0,1075e(k) - 0,0925e(k - 1) \quad (3.19)$$

Dessa forma, a entrada atual $u(k)$ pode ser calculada a partir das demais variáveis $u(k - 1)$, $e(k)$ e $e(k - 1)$, correspondentes à entrada no instante anterior, o erro atual e o erro no instante anterior, respectivamente.

4 Resultados

Nesse capítulo serão descritos os resultados de testes em simulação, bancada e práticos. O objetivo dos testes é fazer com que o motor gire numa velocidade de referência. Como dito no Capítulo 3, o período de amostragem adotado é de $T_a = 5$ ms.

4.1 Resultado em simulação

As simulações foram feitas para analisar o comportamento do controlador a ser implementado em bancada. A velocidade de referência estabelecida inicialmente foi de $\omega_{ref} = 2,5$ rad/s. O resultado obtido é mostrado na Figura 30. É possível verificar que existe um overshoot de aproximadamente 20% e o tempo de estabelecimento é de aproximadamente 0,5 segundos. Mais ainda, verifica-se que a velocidade do motor foi guiada para o entorno da referência a despeito dos efeitos não lineares como zona morta e saturação. Observa-se ainda que em nenhum momento a ação de controle atingiu a saturação, o que é algo desejável em sistemas de controle.

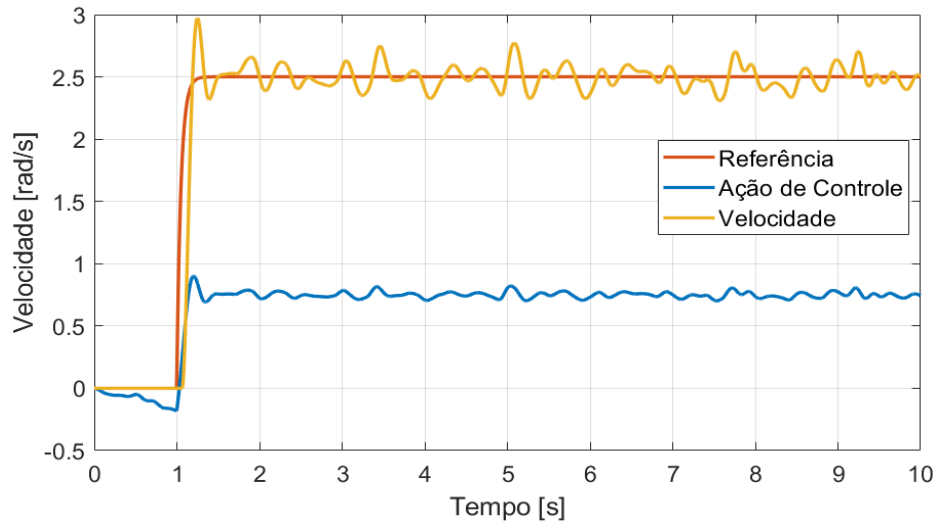


Figura 30 – Simulação do rastreamento de uma velocidade de referência de 2,5 rad/s. Em laranja tem-se a referência aplicada, em amarelo a velocidade medida e em azul a ação de controle normalizada.

Uma outra referência no valor de $\omega_{ref} = 1,3$ rad/s foi também usada para testar o controlador em simulação. Os resultados são mostrados na Figura 31. Novamente, constata-se que a velocidade real foi guiada para o entorno da referência pelo sistema de controle.

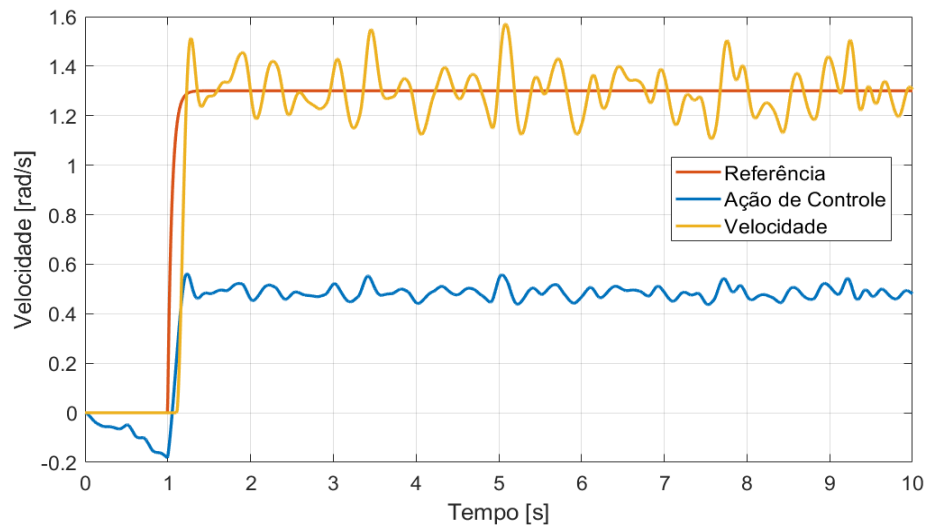


Figura 31 – Simulação do rastreamento de uma velocidade de referência de 1,3 rad/s. Em laranja tem-se a referência aplicada, em amarelo a velocidade medida e em azul a ação de controle normalizada..

4.2 Resultados em bancada

Após os testes em simulação, deu-se início aos testes em bancada. Foi mantido o padrão de uma entrada $\omega_{ref} = 2,5$ rad/s aplicada após 1 s a fim de que o controlador comece o rastreamento a partir do repouso. O gráfico da Figura 32 mostra o rastreamento durante 10 s e as linhas vermelha, azul e amarela representam a referência, entrada e velocidade medida, respectivamente.

Percebe-se que o sistema de controle foi capaz de fazer com que o motor gire com velocidade próxima da referência. A existência de oscilações pode ser explicada por ruídos de medida e não linearidades, como o atrito estático, zona morta e presença de caixa de redução.

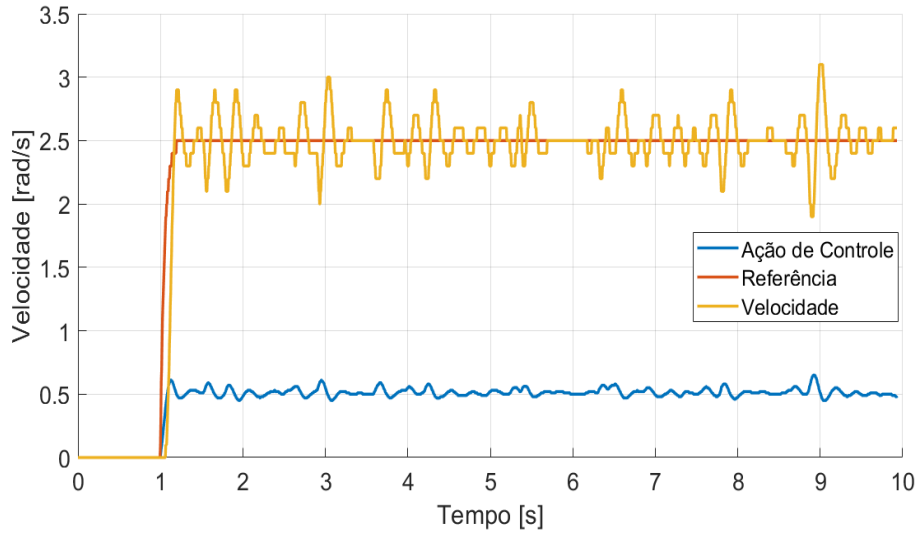


Figura 32 – Rastreamento pelo controlador PI da velocidade de 2,5 rad/s.

Outros testes foram feitos com diferentes valores de referência. As Figuras 33 e 34 mostram que o rastreamento também foi bem sucedido para as referências de $\omega_{ref} = 1,3$ rad/s e $\omega_{ref} = 4,8$ rad/s. Ressalta-se que as oscilações observadas na velocidade medida são mais protuberantes para velocidades baixas de rotação (Figura 33). Isso corrobora a argumentação que tais oscilações são causadas por efeitos não lineares. Por exemplo, para velocidades de referência mais baixas, o motor está operando mais próximo da zona morta.

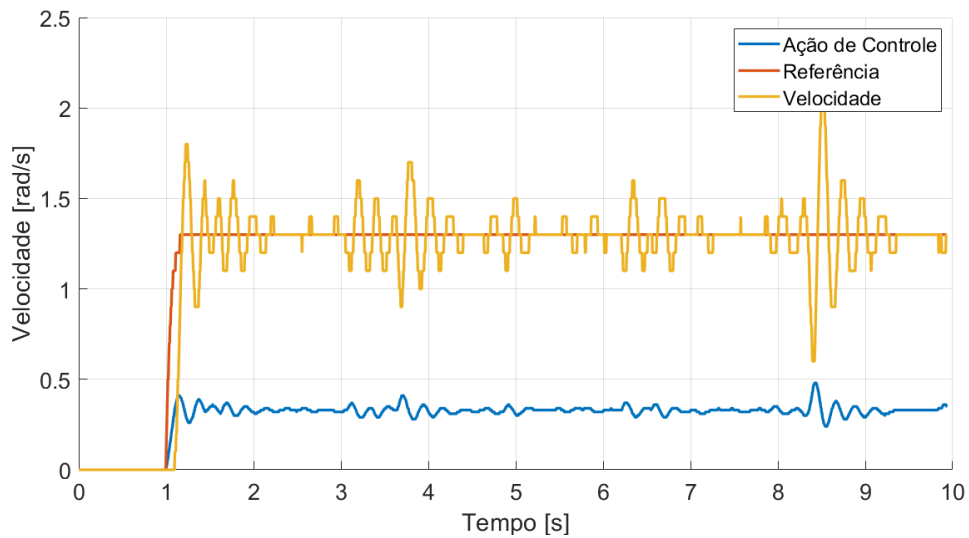


Figura 33 – Rastreamento pelo controlador PI da velocidade de 1,3 rad/s.

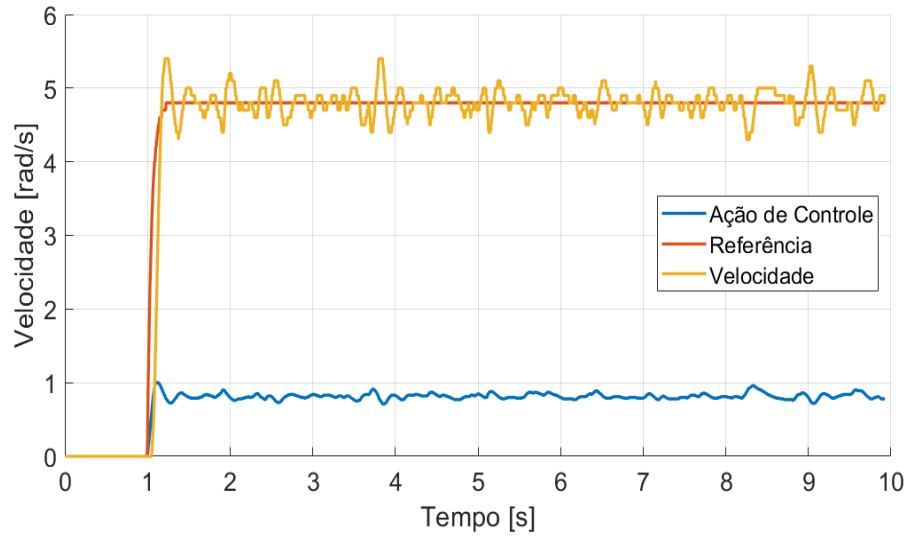


Figura 34 – Rastreamento pelo controlador PI da velocidade de 4,8 rad/s.

Além disso, outro teste em bancada foi feito utilizando uma referência variável, exigindo do controlador um rastreamento dinâmico. A Figura 35 mostra o resultado desse comportamento. Nota-se que o sistema de controle fez com que a velocidade real acompanha-se as variações da referência.

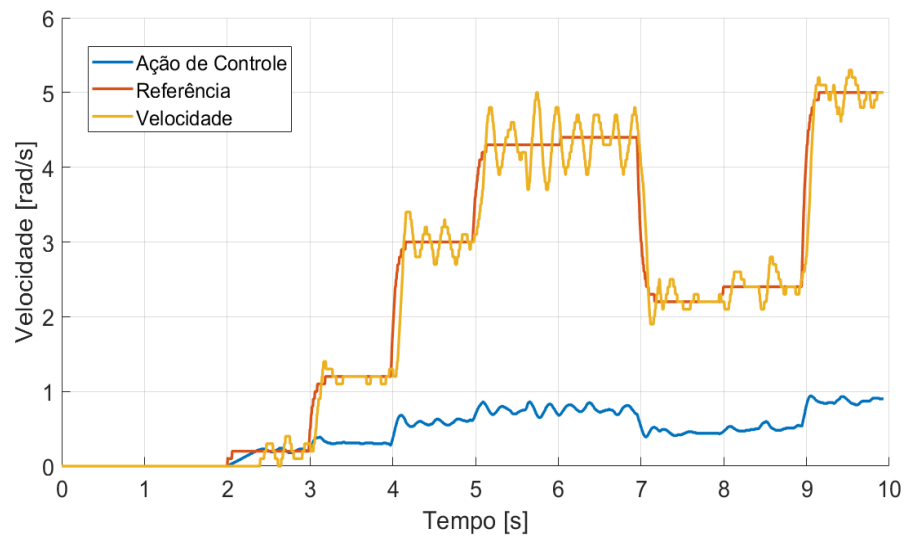


Figura 35 – Resultados em bancada para uma velocidade variante no tempo.

4.3 Resultados práticos

Também foram realizados testes de funcionamento da máquina tracionadora apresentada no Capítulo 2. Nesse caso, a velocidade linear de referência para a sonda foi de 300 mm/s. Essa velocidade é convertida em uma referência de velocidade angular de 4,126 rad/s, como descrito anteriormente. Após essa configuração de velocidade, o operador inicia o ensaio por meio da interface para que a sonda seja puxada ou empurrada.

Os testes feitos evidenciaram que o sistema de controle é capaz de manter a velocidade linear da sonda próxima da referência, resultando em uma movimentação adequada da sonda no interior da tubulação. Um vídeo de funcionamento da máquina pode ser visto no Youtube ¹.

Cabe salientar que não foi possível monitorar a velocidade angular do motor durante a operação da máquina tracionadora. Especificamente não foi possível estabelecer comunicação serial com o microcontrolador devido à forma que o mesmo foi montado no Módulo de Controle. Por isso, não são apresentados os gráficos com os resultados nessa seção. A verificação de que a velocidade linear de referência foi seguida adequadamente foi realizada medindo-se o tempo que a sonda demorava para percorrer uma distância conhecida.

¹ https://www.youtube.com/watch?v=EAqgeeYP8uw&ab_channel=AlexandreMM

5 Conclusões e sugestões de trabalhos futuros

5.1 Conclusões

Ensaaios em tubos de trocadores de calor são essenciais para o monitoramento da vida útil desses componentes, garantindo a eficiência dos mesmos e evitando a contaminação do fluido de resfriamento e aquele em processamento. Um dos ensaios comumente realizados envolve a passagem de uma sonda no interior da tubulação em uma velocidade constante. Mais ainda, a inspeção de um trocador de calor envolve a passagem da sonda por um número significativo de tubos. Logo, para que seja possível inspecionar trocadores de calor, na prática, são necessários equipamentos especializados para movimentação de sondas inspetoras encontrados no mercado por altos custos. Como alternativa, este trabalho se propôs a desenvolver uma máquina de tração de custo reduzido. Com esse propósito, foram utilizados tubos de alumínio, parafusos, porcas, microcontrolador, motor CC, encoder, módulos eletrônicos, e impressão 3D. Então foi projetado um controlador de malha fechada para a velocidade angular do motor CC utilizando o conhecido controlador Proporcional-Integral, como detalhado no Capítulo 3. Esse controlador foi testado em simulação, em bancada e em operações práticas. Os resultados apresentados no Capítulo 4 mostraram um desempenho satisfatório durante o rastreamento de velocidades definidas pelo operador, validando o atendimento dos requisitos de operação. Dessa forma, considera-se que o projeto da máquina tracionadora foi bem sucedido. O custo total estimado do projeto, em termos de materiais, foi de R\$ 1.992,18

5.2 Trabalhos futuros

Com a máquina desenvolvida até o momento, é possível realizar os ensaios de trocadores de calor com maior praticidade e conforto para o operador. Como trabalhos futuros, sugere-se o desenvolvimento de modos de operação automáticos, tornando possível, por exemplo, realizar um número específico de ciclos de “puxar” e “empurrar” a sonda por uma distância definida pelo operador. Isso traria mais repetibilidade aos resultados alcançados. Mais ainda, o operador poderia configurar o tempo de espera entre os ensaios, diferentes velocidades de tração para cada ensaio e o número de ciclos de ensaio. Também é possível alterar o tipo de suporte para o módulo de tração, criando algo diferente do tripé e que venha a ser mais conveniente para o transporte em trabalhos em campo. Além disso, um sistema para facilitar o embobinamento e desbobinamento do cabo da sonda é bastante desejado.

Referências

- AL-QADEEB, F. E. Tubing inspection using multiple NDT techniques. In: *NDT Level III Engineer Inspection Department*. Bahrain, Manama: Middle East Nondestructive Testing Conference Exhibition, 2005.
- AWS, A. W. S. *FreeRTOS - Real-time operating system for microcontrollers*. 2017. Open source project provided under the MIT license.
- CARNEVAL, R. de O. *GUIA DE INSPEÇÃO MECANISMOS DE DANOS*. Rio de Janeiro, Brasil, 2021.
- FERRARESI, R. N. Comparação entre ensaios não destrutivos RFT e IRIS em feixes tubulares de aço carbono de trocadores de calor do tipo Casco & Tubos. *Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia*, 2023.
- FERRARESI, R. N. et al. Análise de ensaios não-destrutivos para inspeção de tubos de trocadores de calor do tipo casco tubos: Campo remoto (RFT) versus sistema de inspeção rotativa interna (IRIS). *Soldagem & Inspeção*, 2021.
- FRANKLIN, G. F.; POWELL, J. D.; EMAMI-NAENI, A. *Feedback Control of Dynamic Systems*. 8. ed. New York, EUA: Pearson Education, 2019. ISBN 978-0134685717.
- GARCIA, S. Q. Petróleo: Visão geral e aspectos fundamentais nas relações internacionais. *Revista Política Hoje*, v. 23, n. 1^a Edição, p. p. 129–147, 2015.
- MADI, M. Otimização do período de limpeza de trocadores de calor utilizados no refino de petróleo. *Dissertação de Mestrado - Curso de Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba*, 2006.
- OGATA, K. *Engenharia de Controle Moderno*. 5^a. ed. São Paulo, Brasil: Pearson Education, 2011. ISBN 978-8576058106.
- PAWLOWSKI, A. et al. Generalized predictive control with actuator deadband for event-based approaches. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, v. 10, n. 1, p. 523–537, 2014.
- SILVA, V. L. C. M. da. Predição da incrustação em trocador de calor baseada em redes neurais artificiais. *Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Computacionais da Universidade Federal do Rio Grande do Norte*, 2013.
- SMITH, J. O. *Introduction to Digital Filters: with Audio Applications*. 2^a. ed. EUA: W3K Publishing, 2008. ISBN 978-0974560717.
- SZKLO, A. S.; ULLER, V. C. *Fundamentos Do Refino De Petroleo: Tecnologia e Economia*. 1^a. ed. Brasil: Interciência, 2008. ISBN 978-8571932043.
- UMANS, S. D. *Máquinas Elétricas*. 7. ed. Santana, Porto Alegre, RS, Brasil: AMGH Editora Ltda., 2014. ISBN 978-0073380469.

Apêndices

APÊNDICE A – Manual de navegação

Ao conectar o cabo de alimentação da fonte na tomada 110/220 VAC será mostrado o menu inicial como o da Figura 36. Essa é a página inicial e a partir dos botões pode-se navegar para o início do ensaio.



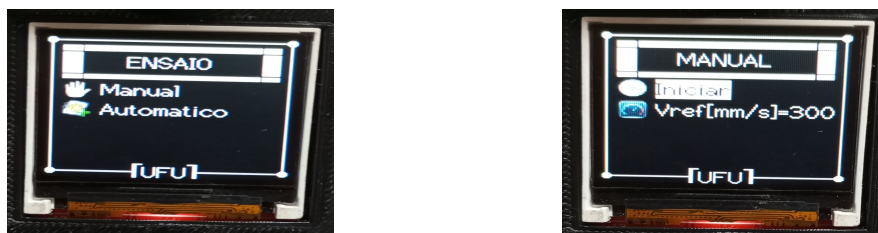
Figura 36 – Foto do menu inicial.

Os botões possui funcionalidades intuitivas de acordo com seus posicionamentos. O botão superior sobe o cursor de seleção, o inferior desce o cursor, o central confirma a seleção e aquele à esquerda retorna. A Figura 37 mostra esses botões.



Figura 37 – Foto dos botões do joystick com descrição de suas funcionalidades.

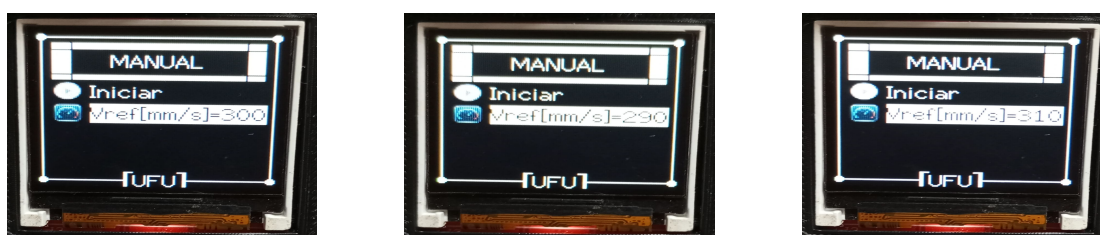
A primeira opção do menu principal - ENSAIO - avança na configuração de um ensaio. Ao confirmar essa seleção com o botão central, é mostrada a segunda página, vide Figura 38a. Como apenas o ensaio manual foi programado até o momento, é preciso confirmar a seleção na opção MANUAL, avançando para a página mostrada na Figura 38b.



- (a) Foto da página de escolha de tipo de ensaio. (b) Foto da página de configuração do ensaio manual.

Figura 38 – Fotos das páginas do menu para iniciar um ensaio.

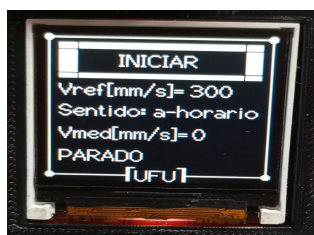
Na página MANUAL é possível fazer a alteração da velocidade linear de tração ao selecionar a segunda opção - Vref[mm/s]. Ao selecionar essa opção, como mostrado na Figura 39a, o cursor para de piscar e com os botões Baixo e Cima é possível decrementar ou incrementar em 10 mm/s a velocidade linear, respectivamente (vide Figuras 39b e 39c). Ao pressionar o botão Confirma a velocidade configurada se torna a nova referência.



- (a) Foto do *display* com a opção de configuração de velocidade em seleção. (b) Foto do *display* exibindo a redução de 10 mm/s na velocidade. (c) Foto do *display* exibindo o incremento de 10 mm/s na velocidade.

Figura 39 – Foto da página de configuração da velocidade linear de tração.

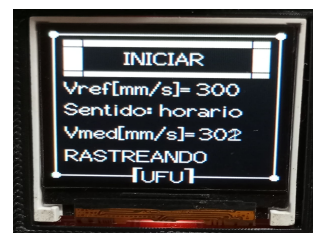
Com a escolha da velocidade de tração é possível começar o ensaio ao selecionar a opção Iniciar. A página seguinte, mostrada na Figura 40, exibe os dados de ensaio: velocidade de referência, sentido de giro, velocidade medida e estado de operação. A velocidade medida é uma média de um vetor de 100 medidas de velocidades. O sentido de giro pode ser alterado para que a sonda seja puxada ou empurrada. Isso só pode ser feito com o motor parado, ao clicar nos botões Cima ou Baixo.



(a) Foto da página de monitoramento de ensaio com o Tracionador parado.



(b) Foto da página de monitoramento de ensaio com o Tracionador em operação.



(c) Foto da página de monitoramento de ensaio com o sentido de rotação invertido.

Figura 40 – Foto da página de monitoramento do ensaio em diferentes momentos de operação.

A partir dos passos descritos é possível realizar ensaios usando o Tracionador. Outras páginas como a AUTOMÁTICO em ENSAIO, e CONFIGURAÇÕES em MENU ainda não foram criadas. A página CRÉDITOS em MENU é uma breve seção de autoria do projeto.