

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Rafael Lins Nobre

**Desenvolvimento de sistema para controle de
velocidade de esteiras ergométricas**

Uberlândia, Brasil

2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Rafael Lins Nobre

**Desenvolvimento de sistema para controle de velocidade
de esteiras ergométricas**

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.

Orientador: Pedro Augusto Queiroz de Assis

Universidade Federal de Uberlândia – UFU

Faculdade de Engenharia Mecânica

Bacharelado em Engenharia Mecatrônica

Uberlândia, Brasil

2024

Rafael Lins Nobre

Desenvolvimento de sistema para controle de velocidade de esteiras ergométricas

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, 24 de Maio de 2024:

Pedro Augusto Queiroz de Assis
Orientador

Carlos Alberto Gallo

Eder Alves de Moura

Uberlândia, Brasil
2024

Agradecimentos

Gostaria de agradecer e dedicar essa dissertação às seguintes pessoas:

Aos meus pais Angélica e Paulo, que me concederam a oportunidade de realizar minha graduação acadêmica longe deles, por mais que fosse doloroso, e apoiaram todas as etapas da minha jornada.

Ao meu professor orientador Pedro Augusto, um grande mentor e amigo que me incentivou a me desafiar durante o projeto e sempre me auxiliou nos momentos de adversidade, dedicando seu tempo à me ensinar e aprender junto comigo.

Aos professores, técnicos e alunos do Laboratório de Automação e Robótica, que ao longo do projeto me fizeram companhia e me auxiliaram.

Resumo

O emprego de estruturas robóticas para reabilitação da marcha humana pode facilitar o trabalho de profissionais da saúde envolvidos no processo e auxiliar na recuperação do indivíduo. Neste contexto, a estrutura denominada HOPE-G está sendo desenvolvida no Laboratório de Automação e Robótica (LAR) da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia. O objetivo é desenvolver um sistema que faça com que o indivíduo realize o máximo possível do protocolo de reabilitação sem restringir a movimentação natural do indivíduo. Dentre os elementos que compõem a HOPE-G, encontra-se uma esteira bipartida, isto é, duas esteiras posicionadas lado a lado que serão utilizadas no reaprendizado do caminhar. A ideia é fazer com que as esteiras se movimentem em velocidades ligeiramente diferentes, forçando o indivíduo a adotar ritmos distintos de passo em cada perna. Isso pode auxiliar na recuperação da coordenação das pernas. Para que a HOPE-G funcione adequadamente, é necessário desenvolver um sistema de controle e um circuito eletrônico que façam com que as esteiras sigam referências de velocidade fornecidas por um profissional da saúde ou um sistema externo. São esses os objetivos do presente trabalho. Mais especificamente, objetiva-se desenvolver e implementar controladores de velocidade para as esteiras da HOPE-G. O trabalho é realizado modificando-se esteiras ergométricas comerciais já disponíveis no LAR, para reduzir o tempo de desenvolvimento do trabalho. Inicialmente, tais esteiras foram modificadas de forma a possibilitar a medição das velocidades e a alteração das velocidades por meio de um Arduino UNO sem atrasos significativos. Então, através de ensaios experimentais, foram obtidos modelos matemáticos para descrever a relação entre a tensão média aplicada ao motor e a velocidade linear desenvolvida pelas esteiras. A partir desses modelos, projetam-se dois controladores (um para cada esteira) utilizando o lugar geométrico das raízes. Os desempenhos desses controladores são verificados por meio de simulações e testes experimentais. Ambos mostram que os controladores conseguem fazer com que as velocidades das esteiras sejam guiadas para valores de referência de acordo com os requisitos de projeto. Com a presença de um paciente sobre as esteiras, as performances dos controladores foram afetadas devido à inconsistência da marcha humana. Entretanto, considerou-se que os resultados foram satisfatórios com as velocidades medidas mantendo-se em torno de 20 % das referências estabelecidas, cumprindo assim com a proposta do projeto.

Palavras-chave: Reabilitação de marcha humana, controle de velocidade de motor CC, malha fechada, controle clássico.

Abstract

The use of robotic structures for human gait rehabilitation can facilitate the work of healthcare professionals involved in the process and assist in the individual's recovery. In this context, the structure named HOPE-G is being developed at the Automation and Robotics Laboratory (ARL) of the Federal University of Uberlândia's Mechanical Engineering Faculty. The goal is to develop a system that allows the individual to perform as much of the rehabilitation protocol as possible without restricting the natural movement of the individual. Among the elements that compose HOPE-G, is a split treadmill, i.e., two treadmills positioned side by side that will be used in gait retraining. The idea is to make the treadmills move at slightly different speeds, forcing the individual to adopt distinct step rhythms on each leg. This can help in the recovery of leg coordination. For HOPE-G to function properly, it is necessary to develop a control system and an electronic circuit that make the treadmills follow speed references provided by a healthcare professional or an external system. These are the objectives of the present work. More specifically, the aim is to develop and implement speed controllers for HOPE-G's treadmills. The work is carried out by modifying commercially available ergometric treadmills already present in ARL, to reduce the development time. Initially, these treadmills were modified to enable speed measurement and speed adjustment through an Arduino UNO without significant delays. Then, through experimental tests, mathematical models were obtained to describe the relationship between the average motor voltage applied and the linear speed developed by the treadmills. From these models, two controllers (one for each treadmill) are designed using the root locus method. The performances of these controllers are verified through simulations and experimental tests. Both show that the controllers can guide the treadmills speeds to reference values according to project requirements. With a patient on the treadmills, the performances of the controllers were affected due to the inconsistency of human gait. However, it was considered that the results were satisfactory with measured speeds remaining around 20 % of the established references, thus fulfilling the project proposal.

Keywords: Human gait rehabilitation, DC motor speed control, closed-loop control, classical control.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Tipos de estruturas robóticas para reabilitação da marcha humana. (a) Equipamentos baseados em esteiras. (b) Plataformas acopladas aos pés. (c) Estruturas com base móvel. (d) Estruturas com base fixa (DÍAZ; GIL; SÁNCHEZ, 2011).	14
Figura 2 – Exemplo de equipamento comercial para reabilitação.	15
Figura 3 – Estrutura robótica denominada HOPE-G.	16
Figura 4 – Estrutura de controle a ser desenvolvida para manipulação das velocidades das esteiras.	17
Figura 5 – Esteira Dream Fitness Concept 1600: Vista geral (a) e vista explodida (b).	18
Figura 6 – Motor FCM 1,6 HP–6800 rpm–150 V.	19
Figura 7 – Acoplamento de polias entre motor e rolo da esteira direita: Vista frontal (a) e vista lateral (b).	19
Figura 8 – Placa de potência da esteira.	20
Figura 9 – Painel de controle da esteira.	20
Figura 10 – Encoder LPD3806-600BM-G5-24C.	21
Figura 11 – Peças de fixação dos encoders: Base (a) e suporte (b).	22
Figura 12 – Montagem das peças de fixação do encoder na esteira.	22
Figura 13 – Polias de transmissão: Polia do eixo do encoder (a) e polia do eixo do motor (b). São impressas duas cópias da peça (b) que são parafusadas juntas, se prendendo ao eixo do motor por pressão.	23
Figura 14 – Montagem das polias com a correia GT2 400	23
Figura 15 – Diagrama de acoplamento. Polia do encoder (1), polia do eixo do motor (2), eixo do motor(3), polia do rolo dianteiro (4) e rolo dianteiro (5).	24
Figura 16 – Experimento de medição de velocidade. Vista geral da esteira com marcações (a) e vista ampliada dos marcadores utilizados para cronometragem do tempo de uma volta da lona (b).	25
Figura 17 – Resultado para uma referência de 1,3 km/h na saída da esteira direita.	26
Figura 18 – Espectro de frequência dos dados coletados na Figura 17.	26
Figura 19 – Dados do ensaio da Figura 17 após a aplicação do filtro passa-baixas.	27
Figura 20 – Controlador Arduino UNO utilizado para controlar a velocidade das esteiras.	28
Figura 21 – Diagrama PCB da placa de potência desenvolvida	29
Figura 22 – Evolução temporal da velocidade da esteira direita para um degrau de 50% de ciclo ativo.	30

Figura 23 – Evolução temporal da velocidade da esteira esquerda para um degrau de 30% de ciclo ativo.	32
Figura 24 – Diagrama de blocos do controle em malha fechada.	34
Figura 25 – LGR da função de transferência da esteira direita.	36
Figura 26 – LGR do sistema sob influência do controlador.	37
Figura 27 – LGR da função de transferência da esteira esquerda.	38
Figura 28 – LGR do sistema sob influência do controlador.	39
Figura 29 – Modelo de simulação das esteiras direita e esquerda com inclusão de efeitos práticos.	41
Figura 30 – Simulação do sistema da esteira direita - Velocidade linear.	41
Figura 31 – Simulação do sistema da esteira direita - Ciclo ativo.	42
Figura 32 – Simulação do sistema da esteira esquerda - Velocidade linear.	43
Figura 33 – Simulação do sistema da esteira esquerda - Ciclo ativo.	43
Figura 34 – Resultados dos testes experimentais na esteira direita - Velocidade linear.	44
Figura 35 – Resultados dos testes experimentais na esteira direita - Ciclo ativo.	45
Figura 36 – Resultados dos testes experimentais na esteira esquerda - Velocidade linear.	46
Figura 37 – Resultados dos testes experimentais na esteira esquerda - Ciclo ativo.	46
Figura 38 – Sinal de referência com comportamento de sistema de primeira ordem.	47
Figura 39 – Resultados dos testes experimentais na esteira direita com a mudança no sinal de referência - Velocidade linear.	48
Figura 40 – Resultados dos testes experimentais na esteira direita com a mudança no sinal de referência - Ciclo ativo.	48
Figura 41 – Resultados experimentais da esteira esquerda com a mudança no sinal de referência - Velocidade linear.	49
Figura 42 – Resultados experimentais da esteira esquerda com a mudança no sinal de referência - Ciclo ativo.	49
Figura 43 – Resultados experimentais da esteira direita com a marcha humana.	50
Figura 44 – Resultados experimentais da esteira esquerda com a marcha humana.	51

Lista de tabelas

Tabela 1 – Medidas do experimento para validação da medida de velocidade da esteira.	25
Tabela 2 – Parâmetros K_d e a_d obtidos	31
Tabela 3 – Parâmetros K_e e a_e obtidos	33

Lista de abreviaturas e siglas

AVE	Acidente Vascular Encefálico
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
LAR	Laboratório de Automação e Robótica
LGR	Lugar Geométrico das Raízes
MF	Malha Fechada
MS	Máximo Sobressinal
MOSFET	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>

Lista de símbolos

a_d	Polo da função de transferência da esteira direita
a_e	Polo da função de transferência da esteira esquerda
$C_d(s)$	Controlador da esteira direita
$C_e(s)$	Controlador da esteira esquerda
D_1	Diâmetro da polia do encoder
D_2	Diâmetro da polia do eixo do motor
D_3	Diâmetro do eixo do motor
D_4	Diâmetro da polia do rolo dianteiro da esteira
D_5	Diâmetro do rolo dianteiro da esteira
$E(s)$	Transformada de Laplace do erro de rastreamento
$F(s)$	Função de transferência do filtro de primeira ordem da referência
$G(s)$	Função de transferência
$G_d(s)$	Função de transferência da esteira direita
$G_e(s)$	Função de transferência da esteira esquerda
$H(s)$	Função de transferência do filtro passa-baixas de velocidade
$H(z)$	Função de transferência discreta do filtro passa-baixas de velocidade
K_{Cd}	Ganho proporcional do controlador da esteira direita
K_{Ce}	Ganho proporcional do controlador da esteira esquerda
K_d	Ganho proporcional da função de transferência da esteira direita
K_e	Ganho proporcional da função de transferência da esteira esquerda
L_e	Comprimento da lona da esteira
MS	Máximo Sobressinal
P_{MF}	Polos desejados de malha fechada

$R(s)$	Transformada de Laplace do sinal de referência
t	Tempo
t_s	Tempo de estabelecimento
Δt	Variação de tempo
T	Período de amostragem
u	Porcentagem de ciclo ativo
$U(s)$	Transformada de Laplace do sinal de entrada
$U_d(s)$	Transformada de Laplace do ciclo ativo da esteira direita
$U_e(s)$	Transformada de Laplace do ciclo ativo da esteira esquerda
$V(s)$	Transformada de Laplace do sinal de saída
V_{Est}	Velocidade linear da esteira
$V_d(s)$	Transformada de Laplace da velocidade da esteira direita
$V_e(s)$	Transformada de Laplace da velocidade da esteira esquerda
$y_f(k)$	Sinal de saída filtrado em determinado instante no tempo discreto
$y_o(k)$	Sinal de saída original em determinado instante no tempo discreto
$Y_f(s)$	Transformada de Laplace do sinal de saída filtrado
$Y_f(z)$	Transformada Z do sinal de saída filtrado
$Y_o(s)$	Transformada de Laplace do sinal de saída original
$Y_o(z)$	Transformada Z do sinal de saída original
ξ	Coefficiente de amortecimento
ω_n	Frequência natural não amortecida
ω	Velocidade angular
ω_{Enc}	Velocidade angular do encoder
ω_1	Velocidade angular da polia do encoder
ω_2	Velocidade angular da polia do eixo do motor
ω_3	Velocidade angular do eixo do motor

ω_4 Velocidade angular da polia do rolo dianteiro da esteira

ω_5 Velocidade angular do rolo dianteiro da esteira

Sumário

1	INTRODUÇÃO	14
2	DESCRIÇÃO DO SISTEMA	18
2.1	Modificações na estrutura das esteiras para medição de velocidade	21
2.1.1	Verificação da medida de velocidade linear	25
2.2	Alteração da placa de potência da esteira	28
2.3	Modelagem a partir de dados experimentais	29
2.3.1	Modelagem do sistema da esteira direita	29
2.3.2	Modelagem do sistema da esteira esquerda	31
3	ESTRATÉGIA DE CONTROLE	34
3.1	Localização desejada para os polos de malha fechada	35
3.2	Controle em malha fechada - Esteira direita	35
3.3	Controle em malha fechada - Esteira esquerda	37
4	RESULTADOS	40
4.1	Resultados de simulação	40
4.1.1	Simulação do sistema de controle em malha fechada para a esteira direita	41
4.1.2	Simulação do sistema de controle em malha fechada para a esteira esquerda	42
4.2	Resultados experimentais	44
4.2.1	Esteira direita	44
4.2.2	Esteira esquerda	45
4.2.3	Suavização do pico de velocidade com filtro na referência	47
4.2.4	Resultados experimentais com a marcha humana	50
5	CONCLUSÃO	52
	REFERÊNCIAS	54
	APÊNDICES	55
	APÊNDICE A – CÓDIGO DE CONTROLE IMPLEMENTADO NA IDE DO ARDUINO	56

1 Introdução

O Acidente Vascular Encefálico (AVE) e a paralisia cerebral são problemas neurológicos que podem afetar a capacidade de locomoção do ser humano (CLAFLIN; KRISHNAN; KHOT, 2015). O processo que visa a recuperação física e psicológica de uma pessoa é denominado reabilitação, englobando desde o diagnóstico da enfermidade até a recuperação das funções residuais (BARBOSA, 2013). No caso da reabilitação de membros superiores, o emprego de estruturas robóticas para auxiliar os profissionais da saúde e melhorar a eficiência da reabilitação tem resultados consolidados (SUSKO, 2015). Já no caso da reabilitação da marcha humana, os resultados publicados na literatura não constatarem vantagem significativa no uso de dispositivos robóticos como esteiras, plataformas e suportes (LEWEK et al., 2017). Ademais, sugerem ainda que é necessário um maior desenvolvimento deste tipo de equipamento para auxiliar em uma recuperação eficaz (DOBKIN; DUNCAN, 2012; DUNCAN et al., 2011). Isso tem motivado intensa pesquisa nesta área, o que resultou no desenvolvimento de diferentes tipos de dispositivos robóticos para reabilitação da marcha. Por exemplo, equipamentos baseados em esteiras, plataformas para os pés, bases móveis e estacionárias (vide Figura 1)(DÍAZ; GIL; SÁNCHEZ, 2011).

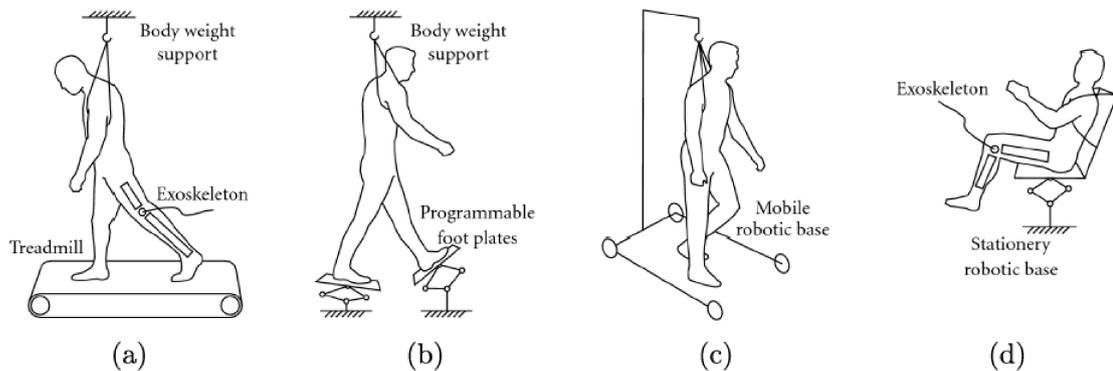


Figura 1 – Tipos de estruturas robóticas para reabilitação da marcha humana. (a) Equipamentos baseados em esteiras. (b) Plataformas acopladas aos pés. (c) Estruturas com base móvel. (d) Estruturas com base fixa (DÍAZ; GIL; SÁNCHEZ, 2011).

Normalmente os equipamentos que utilizam esteiras trabalham juntamente com exoesqueletos para impor uma caminhada sincronizada. Por exemplo, o Lokomat®, mostrado na Figura 2, é um equipamento composto por exoesqueleto e esteira. Apesar de auxiliar na recuperação do paciente, uma adversidade que surge do uso de exoesqueletos é a imposição de movimentos não naturais sobre o paciente, o que pode resultar em lesões (BARBOSA; CARVALHO; GONÇALVES, 2018).

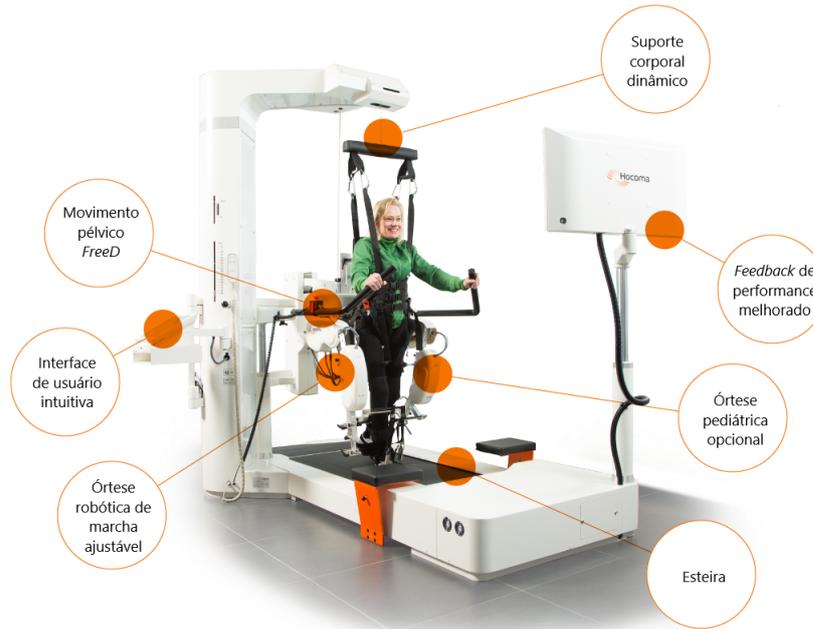


Figura 2 – Exemplo de equipamento comercial para reabilitação.

Fonte: Site da Hocoma. Disponível em <<https://www.hocoma.com/solutions/lokomat/>>. Acesso em 02 jul. 2024

Para oferecer uma alternativa, está sendo construída no Laboratório de Automação e Robótica (LAR) uma estrutura robótica para reabilitação da marcha humana, denominada HOPE-G. Essa estrutura, ilustrada no digrama da Figura 3, é composta por três módulos principais: Esteira bipartida, suporte para peso corporal e sistema de controle sem marcadores. A esteira bipartida é composta por duas esteiras colocadas lado a lado. O princípio base desse módulo é a movimentação de cada esteira em velocidades diferentes, estimulando a adaptação das funções motoras da pessoa à situação atípica. Esse efeito é particularmente útil na reabilitação de uma das principais consequências do AVE: A hemiplegia (SUSKO; SWAMINATHAN; KREBS, 2016). O suporte para peso corporal será fixado no paciente por meio de um braço mecânico ligado à cintura, de forma à fornecer apoio durante o exercício sem atenuar o exercício de reabilitação realizado pelos membros inferiores. O sistema de controle sem marcadores consiste na utilização de um sensor Kinect para rastreamento dos movimentos do paciente em até 48 pontos do seu corpo, por meio de um sensor infravermelho embutido, além de ser capaz de filmar o procedimento de reabilitação para posterior avaliação.

A HOPE-G se destaca entre as estruturas robóticas para reabilitação da marcha humana como uma opção menos invasiva para o paciente, uma vez que o suporte para peso corporal na cintura limita minimamente a movimentação natural dos membros inferiores, o que permite uma execução mais eficiente do protocolo de reabilitação. Ademais, o design da esteira bipartida é um diferencial que estimula a realização do esforço de caminhada em ambas as pernas, ao dificultar que o paciente compense a marcha de uma perna debilitada com a outra, contribuindo principalmente com o tratamento de hemiplegia.

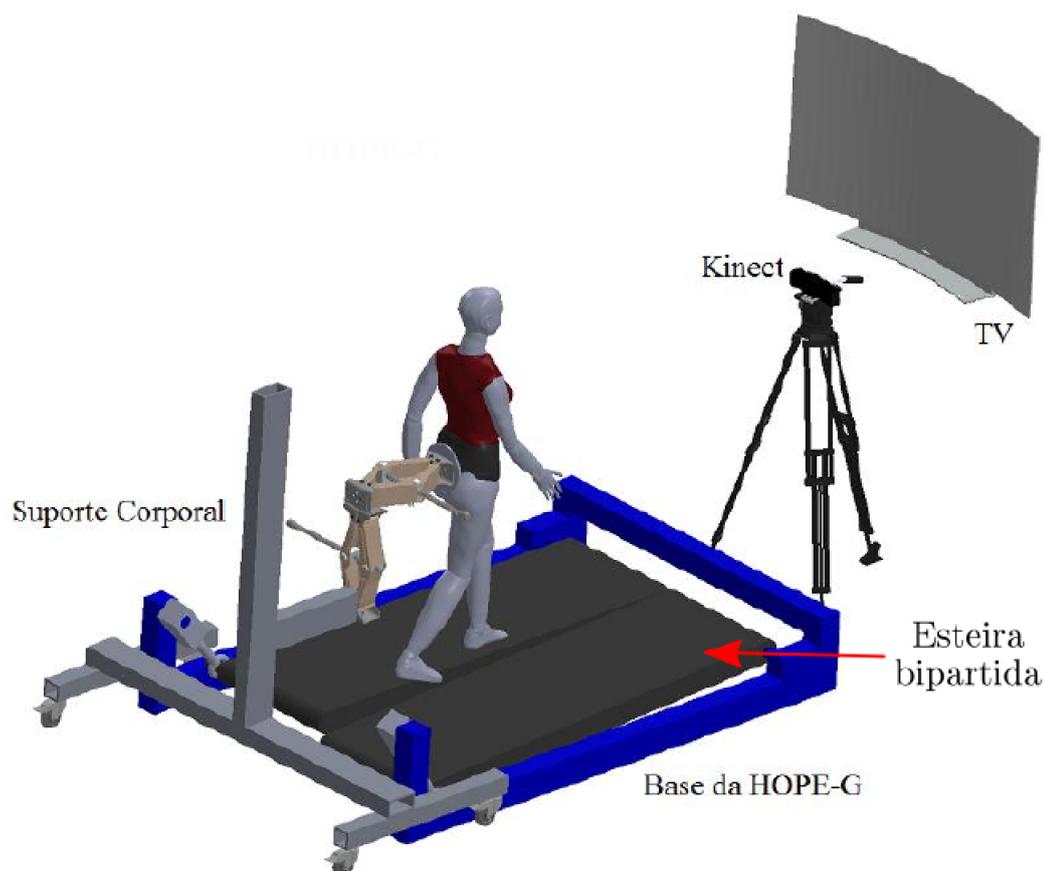


Figura 3 – Estrutura robótica denominada HOPE-G.

A fim de que a esteira bipartida funcione adequadamente, deve-se desenvolver e implementar um sistema de controle e um circuito eletrônico em cada esteira para fazer com que essa se movimentem em velocidades de referência definidas por um profissional da saúde. Esse é o principal objetivo do presente trabalho. Isto é, o presente trabalho visa o desenvolvimento e a implementação do sistema de controle das velocidades das esteiras da HOPE-G.

Com esse propósito, com base no que foi realizado em Silva (2013), serão modificadas esteiras comerciais ergométricas - já disponíveis no LAR - de modo a substituir o circuito eletrônico e o sistema de controle originais por versões desenvolvidas no laboratório. Partindo de equipamentos comerciais, diminui-se significativamente o tempo de desenvolvimento do projeto, uma vez que pode-se aproveitar elementos já desenvolvidos pelo fabricante original do equipamento. Vale comentar que o controlador original não é capaz de impor velocidades menores que 1 km/h à esteira, o que pode ser útil para a reabilitação, e nem de se comunicar com o sistema principal da HOPE-G.

Para alcançar velocidades baixas, implementar-se-ão controladores de velocidade em malha fechada para cada esteira. A Figura 4 mostra o digrama de blocos do sistema de controle a ser desenvolvido.

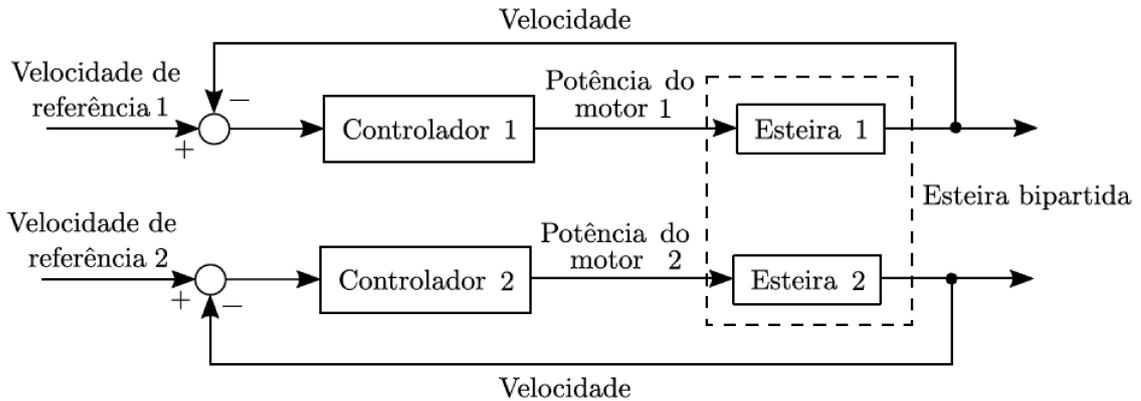


Figura 4 – Estrutura de controle a ser desenvolvida para manipulação das velocidades das esteiras.

O restante deste documento encontra-se organizado da maneira descrita a seguir.

- No Capítulo 2 apresentam-se uma descrição e as modificações nas esteiras ergométricas, além da modelagem das dinâmicas dos motores de ambas as esteiras a partir de resultados experimentais;
- No Capítulo 3 descrever-se-á a estratégia de controle desenvolvida;
- No Capítulo 4 serão expostos os resultados obtidos em simulação e experimentalmente;
- No Capítulo 5 encontram-se as conclusões do trabalho.

2 Descrição do sistema

As esteiras ergométricas escolhidas como base para o projeto são do tipo Dream Fitness Concept 1600 (Figura 5). Esse equipamento é amplamente acessível no mercado e possui um custo de aquisição baixo quando comparado a equipamentos similares. Por isso, e para reduzir o tempo de construção da HOPE-G, o desenvolvimento da esteira bipartida teve como etapa inicial a aquisição e a desmontagem de duas dessas esteiras comerciais. Vale comentar que tal esteira é capaz de impor velocidades entre 1 e 9 km/h (valores teóricos informados pelo fabricante).

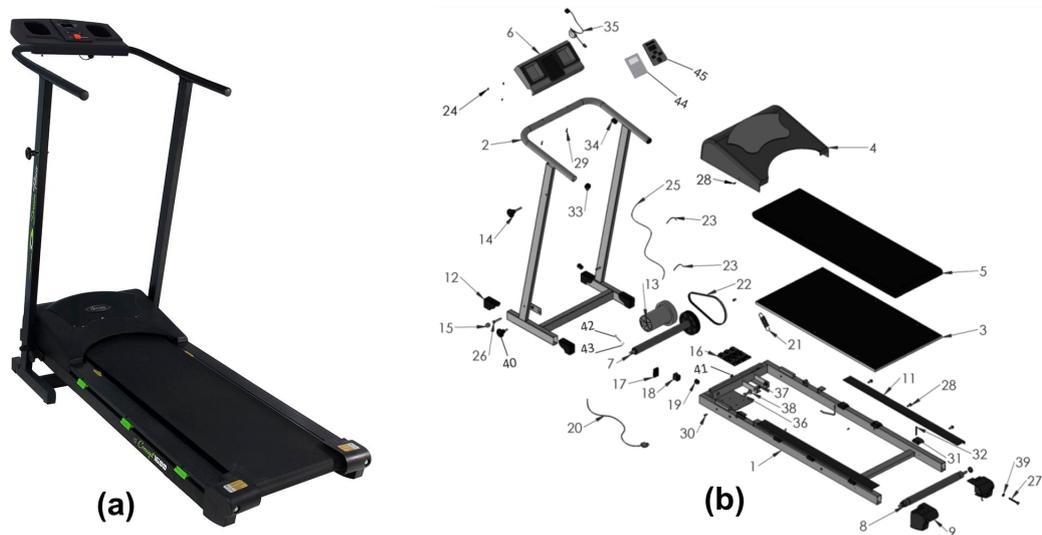


Figura 5 – Esteira Dream Fitness Concept 1600: Vista geral (a) e vista explodida (b).

Fonte: www.dream.com.br/esteira-eletronica-dream-concept-1600-bivolt/p

A força motriz da esteira é gerada por um motor de corrente contínua, da marca FCM, com 1,6 HP de potência (Figura 6), o qual transmite momento rotacional para o rolo dianteiro da esteira por meio de um acoplamento de polias, que pode ser visualizado na Figura 7.

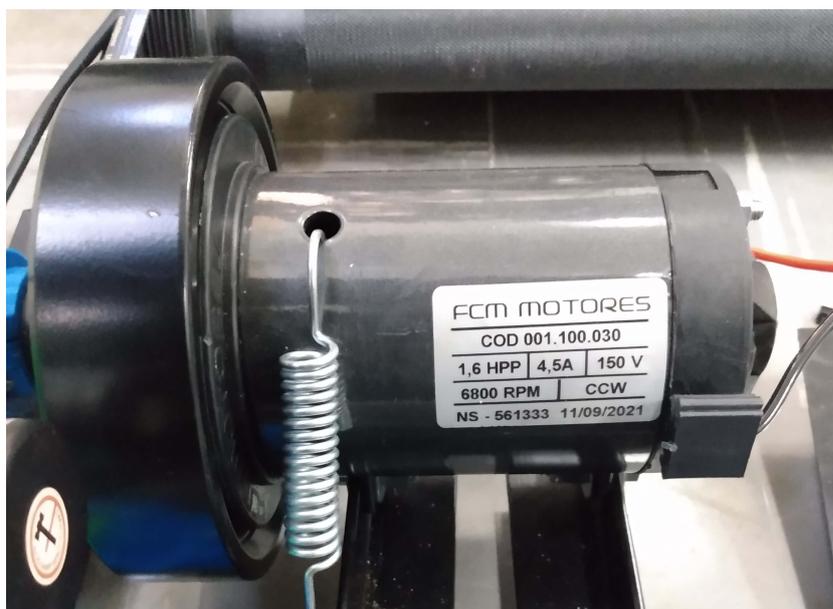


Figura 6 – Motor FCM 1,6 HP–6800 rpm–150 V.

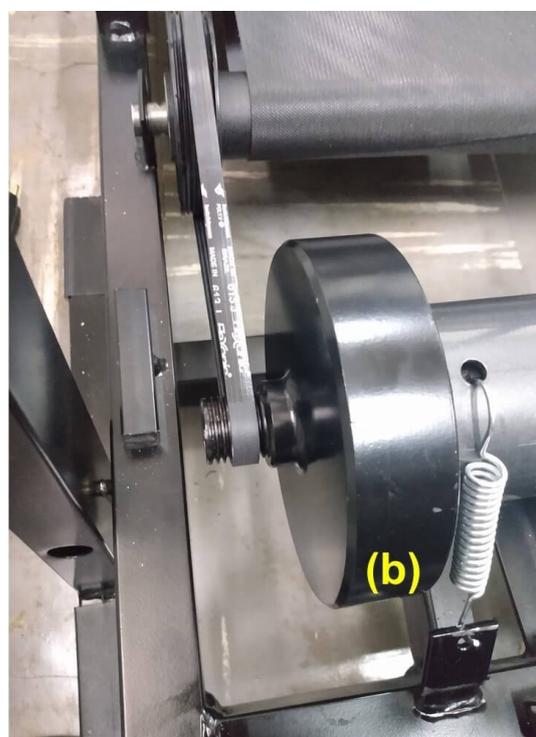


Figura 7 – Acoplamento de polias entre motor e rolo da esteira direita: Vista frontal (a) e vista lateral (b).

O fornecimento de tensão elétrica ao motor é realizado pela placa de potência Neotec 40700 NH3 (Figura 8). Essa placa é o principal componente eletrônico da esteira e é responsável por induzir no motor uma determinada rotação, que é definida em km/h no painel de controle da esteira (Figura 9).

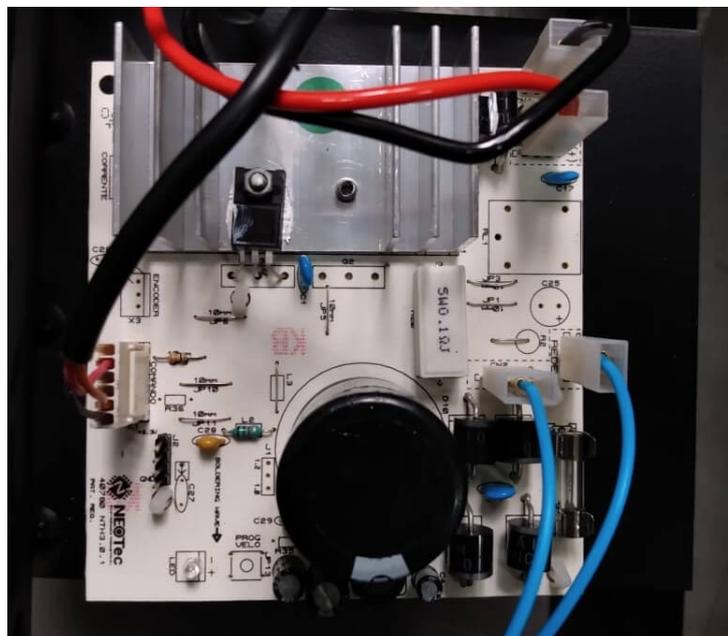


Figura 8 – Placa de potência da esteira.



Figura 9 – Painel de controle da esteira.

Por meio desse painel, o usuário pode selecionar a velocidade desejada. A partir dessa ação, será enviado um sinal elétrico para a placa de potência, onde tal sinal é processado e convertido em uma tensão média nos terminais do motor da esteira. Então, através de uma calibração feita pelo fabricante, espera-se que tal tensão resulte em uma rotação que induza a velocidade definida pelo usuário, note que essa esteira opera

originalmente em malha aberta. Para implementar controladores em malha fechada para rastreamento de velocidades de referência individuais para cada esteira será necessário medir as velocidades. Isso foi realizado instalando-se encoders no sistema, como descrito a seguir.

2.1 Modificações na estrutura das esteiras para medição de velocidade

Como já mencionado, o ajuste de velocidade original das esteiras é feito por meio de um sistema de malha aberta, ou seja, a ação de controle (tensão média aplicada ao motor) não é influenciada pela saída (velocidade da esteira). A associação entre tensão média e velocidade é realizada por meio de uma calibração do fabricante.

Para que possam ser desenvolvidos os sistemas de controle em malha fechada para as esteiras, foram instalados os encoders LPD3806-600BM-G5-24C (Figura 10) para medir as velocidades. A fixação dos encoders foi feita utilizando peças de impressão 3D, de forma que a instalação não interferisse no funcionamento das esteiras. Os desenhos de tais peças são mostrados na Figura 11 e a montagem na Figura 12.



Figura 10 – Encoder LPD3806-600BM-G5-24C.

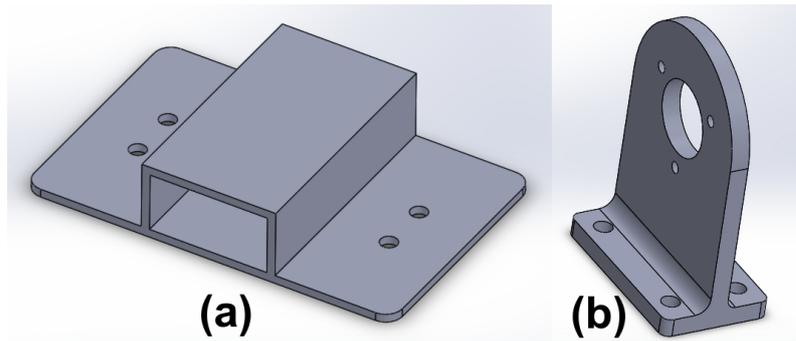


Figura 11 – Peças de fixação dos encoders: Base (a) e suporte (b).

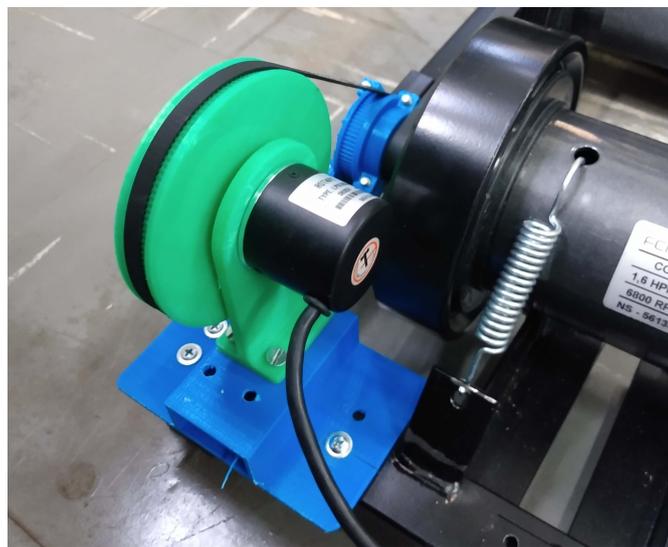


Figura 12 – Montagem das peças de fixação do encoder na esteira.

A transmissão da velocidade angular dos motores para os encoders foi feita utilizando um sistema de polias, o qual foi projetado em torno das correias de perfil GT2. Esse tipo de correia foi escolhido devido à alta disponibilidade desse modelo em diferentes tamanhos no mercado, o que facilitou no desenvolvimento do projeto. O modelo final da correia escolhido foi o GT2 400. Foram projetadas polias de encaixe nesse perfil para o eixo dos encoders e o eixo dos motores. Tais polias são mostradas na Figura 13 e a montagem na Figura 14 .

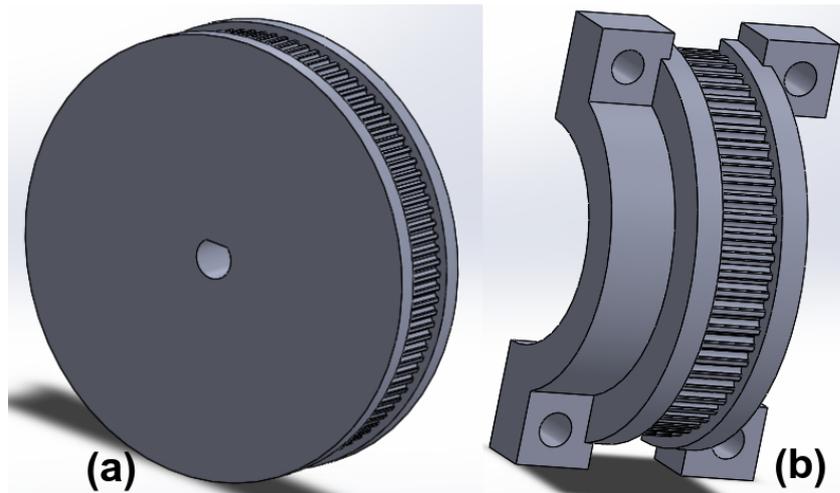


Figura 13 – Polias de transmissão: Polia do eixo do encoder (a) e polia do eixo do motor (b). São impressas duas cópias da peça (b) que são parafusadas juntas, se prendendo ao eixo do motor por pressão.

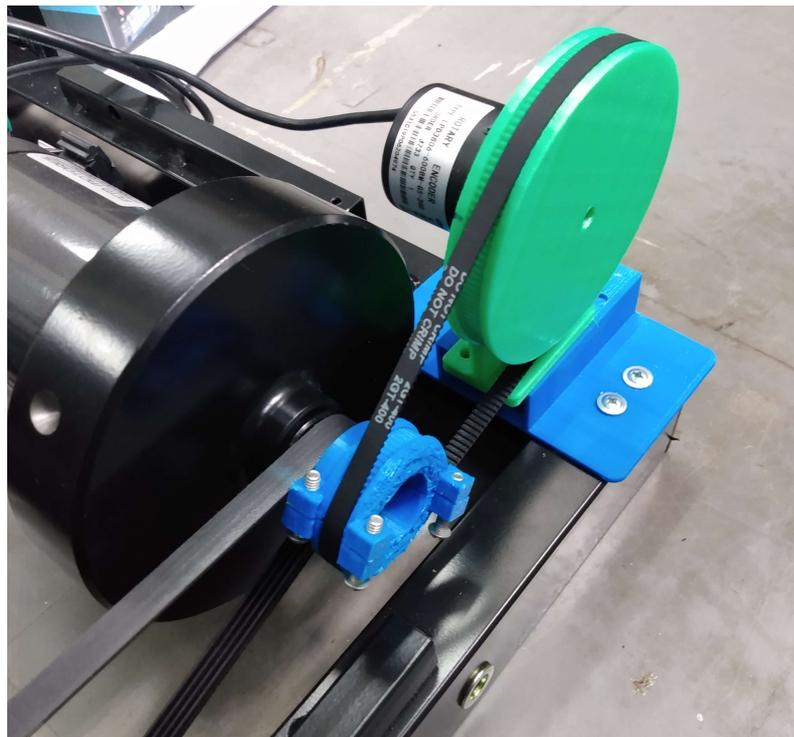


Figura 14 – Montagem das polias com a correia GT2 400

Com a montagem de polias concluída, foi estabelecida uma relação entre as velocidades angulares medidas pelos encoders e as velocidades lineares das lonas das esteiras. Tal relação é similar para as duas esteiras pois as dimensões dos componentes são iguais. Em particular, têm-se as seguintes dimensões: diâmetros da polia do encoder $D_1 = 9$ cm, da polia do eixo do motor $D_2 = 4,374$ cm, do eixo do motor $D_3 = 2,43$ cm, da polia do rolo dianteiro $D_4 = 10,37$ cm e do rolo dianteiro $D_5 = 4,48$ cm.

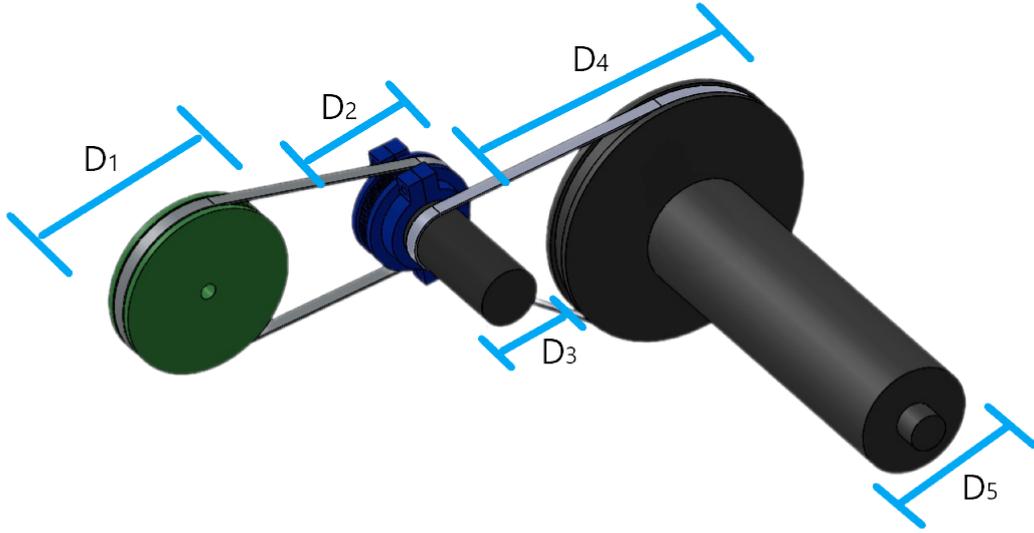


Figura 15 – Diagrama de acoplamento. Polia do encoder (1), polia do eixo do motor (2), eixo do motor(3), polia do rolo dianteiro (4) e rolo dianteiro (5).

Como o encoder está diretamente acoplado ao eixo do motor, tem-se que $\omega_1 = \omega_{Enc}$, sendo ω_1 a velocidade angular da polia do encoder e ω_{Enc} a velocidade angular medida pelo encoder. Mais ainda, a velocidade linear da esteira pode ser relacionada com a velocidade angular do rolo dianteiro da seguinte forma: $V_{Est} = \omega_5 \frac{D_5}{2}$. Então, considerando os acoplamentos mostrados na Figura 15, pode-se escrever:

$$\omega_1 \cdot D_1 = \omega_2 \cdot D_2 \quad (2.1)$$

$$\omega_2 = \omega_1 \cdot \frac{D_1}{D_2} \quad (2.2)$$

$$\omega_3 = \omega_2 \quad (2.3)$$

$$\omega_4 = \omega_3 \cdot \frac{D_3}{D_4} = \omega_1 \cdot \frac{D_1}{D_2} \cdot \frac{D_3}{D_4} \quad (2.4)$$

$$\omega_5 = \omega_4 = \omega_1 \cdot \frac{D_1}{D_2} \cdot \frac{D_3}{D_4} \quad (2.5)$$

$$V_{Est} = \omega_5 \cdot \frac{D_5}{2} = \omega_1 \cdot \frac{D_1}{D_2} \cdot \frac{D_3}{D_4} \cdot \frac{D_5}{2} \quad (2.6)$$

Dessa forma, tem-se a seguinte relação entre velocidade angular do encoder e velocidade linear da esteira:

$$V_{Est} = \omega_{Encoder} \cdot \frac{D_1}{D_2} \cdot \frac{D_3}{D_4} \cdot \frac{D_5}{2} \quad (2.7)$$

A relação (2.7) será empregada para calcular as velocidades das duas esteiras com base nas informações dos encoders.

2.1.1 Verificação da medida de velocidade linear

Para verificar se as velocidades calculadas por meio de (2.7) são coerentes, um experimento foi realizado. Mais especificamente, mediu-se a velocidade média real de uma das esteiras seguindo o procedimento descrito a seguir. Primeiramente aferiu-se o comprimento da lona da esteira, obtendo-se $L_e = 2,13$ m. Em seguida, realizaram-se algumas marcações na esteira, como mostrado na Figura 16.



Figura 16 – Experimento de medição de velocidade. Vista geral da esteira com marcações (a) e vista ampliada dos marcadores utilizados para cronometragem do tempo de uma volta da lona (b).

Então, cronometrou-se o tempo por volta gasto pela esteira impondo-se um comando de 1 km/h no painel de controle. Os resultados são mostrados na Tabela 1, bem como a velocidade real do equipamento.

Tabela 1 – Medidas do experimento para validação da medida de velocidade da esteira.

Volta	t (s)	Δt (s)	Velocidade média real (km/h)	Velocidade do encoder (km/h)
1	4,01	4,01	1,91	1,85
2	8,11	4,10	1,87	1,84
3	12,08	3,97	1,93	1,87
4	16,13	4,05	1,89	1,85
5	20,31	4,18	1,83	1,82

À vista disso, constata-se que a medida de velocidade fornecida pelo encoder com base na relação (2.7) está adequada. Vale destacar que a velocidade imposta pelo usuário no painel de controle original era de 1 km/h. O erro de rastreamento elevado pode ser justificado pela operação em malha aberta, que depende da calibração do fabricante.

Ademais, as leituras dos sensores possuem ruído de medida significativo, o que pode ser observado na Figura 17, que mostra o resultado para atingir a referência de 1,3 km/h na saída.

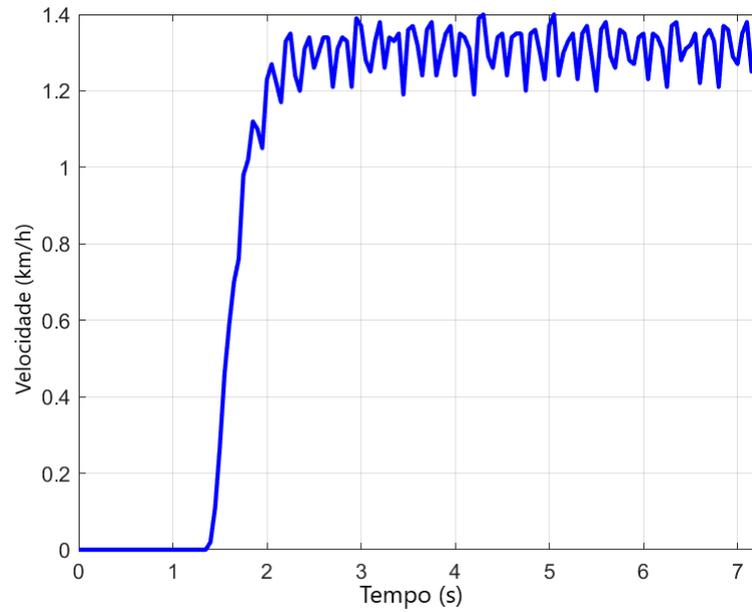


Figura 17 – Resultado para uma referência de 1,3 km/h na saída da esteira direita.

Para filtrar o ruído, foi projetado um filtro digital passa-baixas Butterworth de segunda ordem. Esse tipo de filtro foi escolhido devido à capacidade de ter um resposta muito plana para a banda passante e uma quase nula para a banda que deve ser rejeitada (PERTENCE, 2015). Outro fator que favorece o uso desse filtro é a facilidade de projeto utilizando ferramentas computacionais. Com o propósito de projetar o filtro, primeiramente determinou-se o espectro de frequência dos dados do ensaio anterior. Tal espectro é mostrado na Figura 18.

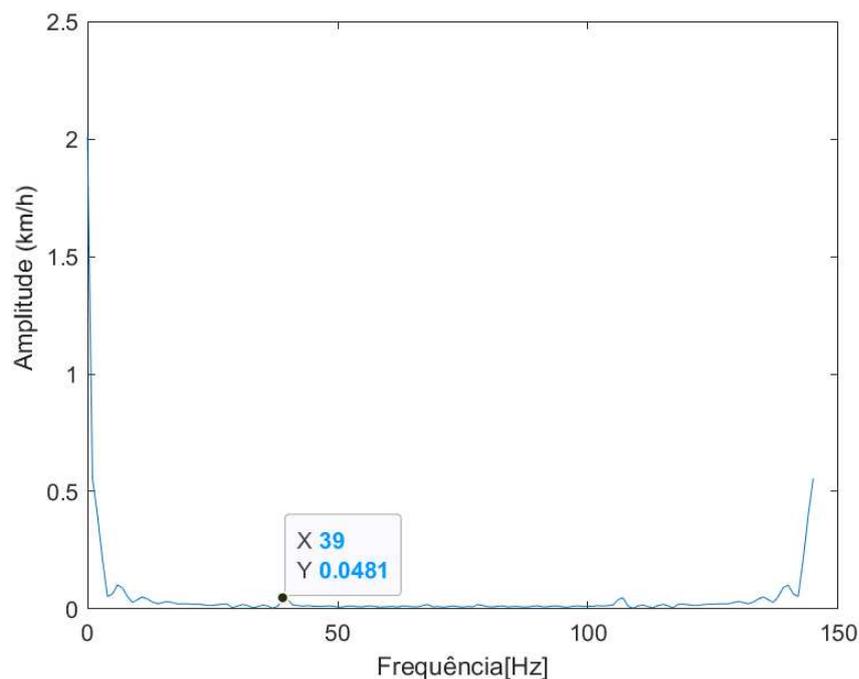


Figura 18 – Espectro de frequência dos dados coletados na Figura 17.

Como pode ser observado, a frequência principal é de 0, na qual os dados principais coletados estão presentes, enquanto o pico de frequência em 39 Hz, por exemplo, pode ser associado ao ruído. Portanto, a frequência de corte do filtro foi estabelecida como 20 Hz, metade da frequência observada para o ruído. O filtro passa-baixas do tipo Butterworth para essa frequência de corte têm a seguinte função de transferência:

$$H(s) = \frac{Y_f(s)}{Y_o(s)} = \frac{400}{s^2 + 28,28s + 400} \quad (2.8)$$

em que $Y_f(s)$ e $Y_o(s)$ denotam as transformadas de Laplace dos sinais filtrado e original, respectivamente. Essa função de transferência contínua foi então passada para tempo discreto utilizando o método de discretização de Tustin e um período de amostragem $T = 0,025$ s (OGATA, 1994). Como resultado, determinou-se:

$$H(z) = \frac{Y_f(z)}{Y_o(z)} = \frac{0,044z^2 + 0,088z + 0,044}{z^2 - 1,324z + 0,5} \quad (2.9)$$

Aplicando a transformada Z inversa em (2.9), obteve-se a seguinte relação a tempo discreto entre os dados filtrados e os não filtrados:

$$y_f(k) = 1,324 \cdot y_f(k-1) - 0,5 \cdot y_f(k-2) + 0,044 \cdot y_o(k) + 0,088 \cdot y_o(k-1) + 0,044 \cdot y_o(k-2) \quad (2.10)$$

A relação (2.10) foi empregada para filtrar os dados oriundos dos encoders de ambas as esteiras. A Figura 19 mostra os dados do ensaio da Figura 17 após a filtragem. Pode-se observar que o efeito do ruído de medida no sinal medido foi mitigado.

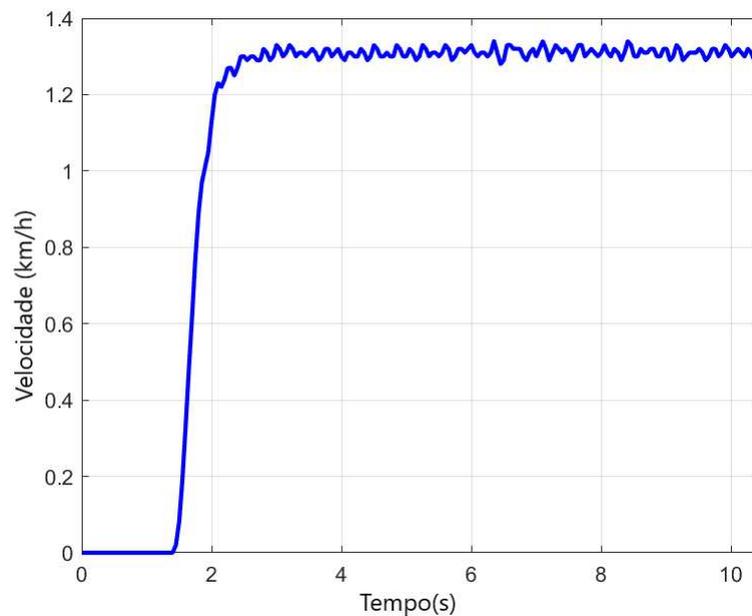


Figura 19 – Dados do ensaio da Figura 17 após a aplicação do filtro passa-baixas.

2.2 Alteração da placa de potência da esteira

Para implementar o controle de malha fechada, foi necessário substituir o painel de controle original das esteiras por um microcontrolador disponível no laboratório. Em particular, adotou-se um Arduino UNO devido ao baixo custo de aquisição e capacidade de processamento adequada ao projeto em questão. O Arduino UNO utilizado é mostrado na Figura 20.



Figura 20 – Controlador Arduino UNO utilizado para controlar a velocidade das esteiras.

Ao avaliar a amplitude de velocidades que eram permitidas pelas esteiras (entre 1 km/h e 9 km/h), também foi necessário substituir a placa de potência original de cada esteira por placas novas projetadas durante o trabalho visando permitir velocidades em torno de 1 km/h.

O modelo de placa de potência desenvolvido é mostrado na Figura 21. Nessa placa, o MOSFET “FDP18N50” é empregado para chavear a tensão aplicada ao motor de acordo com o *duty cycle* (ou ciclo ativo) de uma onda do tipo PWM (*Pulse Width Modulation*) gerada no Arduino UNO (BOGLIETTI et al., 1993). Como resultado, com o chaveamento em frequência suficientemente elevada, manipula-se a tensão média aplicada ao motor.

Esse modelo de MOSFET foi escolhido devido à sua ampla disponibilidade no mercado, a capacidade de chaveamento em alta frequência e de suportar tensões de 220 V. A fonte de energia utilizada no projeto fornece uma tensão contínua de 30 V, o que é suficiente para induzir a amplitude de velocidades necessárias nos motores das esteiras com o chaveamento, porém a alta capacidade do FDP18N50 de suportar tensão é interessante caso futuramente seja necessário aumentar as velocidades máximas que as esteiras devem alcançar.

Cabe salientar que o sinal PWM gerado no Arduino tem amplitude 5 V, não sendo suficiente para controlar o “FDP18N50”. Por isso, o MOSFET “TC4427” foi utilizado para gerar um sinal PWM de 12 V a partir do sinal do Arduino em uma operação em cascata.

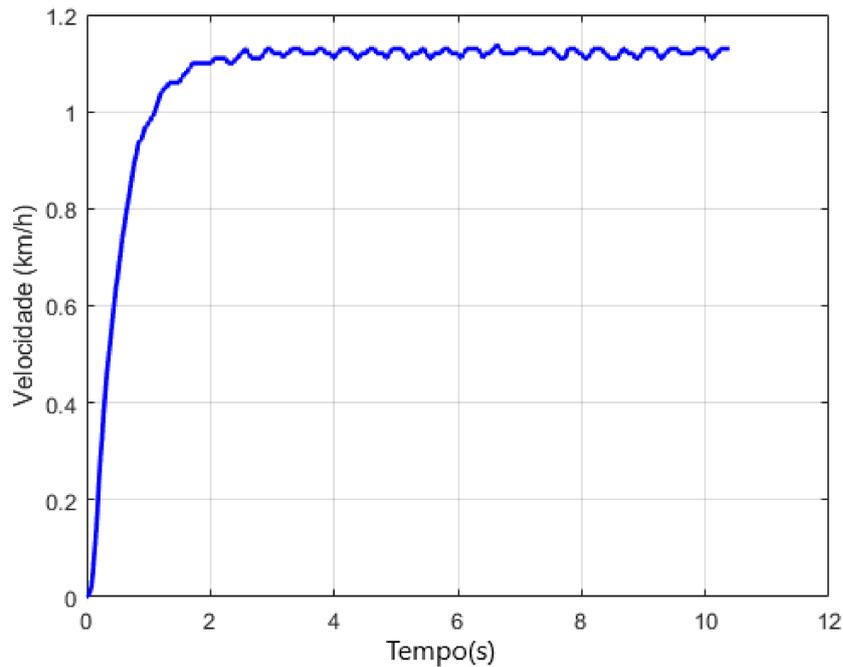


Figura 22 – Evolução temporal da velocidade da esteira direita para um degrau de 50% de ciclo ativo.

Como pode ser observado, a dinâmica da esteira direita pode ser explicada por um sistema de primeira ordem da forma (OGATA, 1994):

$$G_d(s) = \frac{V_d(s)}{U_d(s)} = \frac{K_d}{s + a_d} \quad (2.11)$$

em que $V_d(s)$ e $U_d(s)$ denotam, na esteira direita, as transformadas de Laplace da velocidade da esteira direita e do ciclo ativo da esteira direita, respectivamente.

Para identificação dos parâmetros K_d e a_d , foram aplicados degraus de diferentes amplitudes na entrada (para u entre 30% e 75%). Os parâmetros K_d e a_d identificados em cada um dos ensaios realizados são mostrados na Tabela 2.

A identificação foi realizada utilizando a teoria básica de resposta ao degrau de sistemas de primeira ordem, que pode ser encontrada em OGATA (1994).

Tabela 2 – Parâmetros K_d e a_d obtidos

Amplitude do Degrau (%)	K_d	a_d
30	0,032	1,818
35	0,036	1,902
40	0,036	1,818
45	0,039	1,902
50	0,043	2,000
55	0,042	1,902
60	0,042	1,860
65	0,044	1,902
70	0,047	2,000
75	0,046	1,951

Observando a tabela, nota-se que os parâmetros do modelo variam conforme a amplitude do degrau. Isso indica que há efeitos não lineares no sistema. Por exemplo, tal variação paramétrica pode estar associada com a presença de atrito seco ou não linearidades associadas à placa de potência. Por simplicidade, optou-se por negligenciar tais efeitos e adotar um modelo médio. Isto é, os parâmetros K_d e a_d foram adotados como as médias dos valores apresentados na Tabela 2. Como resultado, obteve-se o seguinte modelo:

$$G_d(s) = \frac{0,041}{s + 1,904} \quad (2.12)$$

2.3.2 Modelagem do sistema da esteira esquerda

Para a esteira esquerda, novamente foi aplicado um sinal de entrada do tipo degrau, para verificar a maneira como a esteira esquerda responde a esse tipo de excitação. A resposta obtida a um degrau de 30% de ciclo ativo é mostrada na Figura 23. Vale comentar que essa amplitude de degrau equivale a uma tensão média de 9 V, pois a fonte de alimentação foi ajustada em 30V.

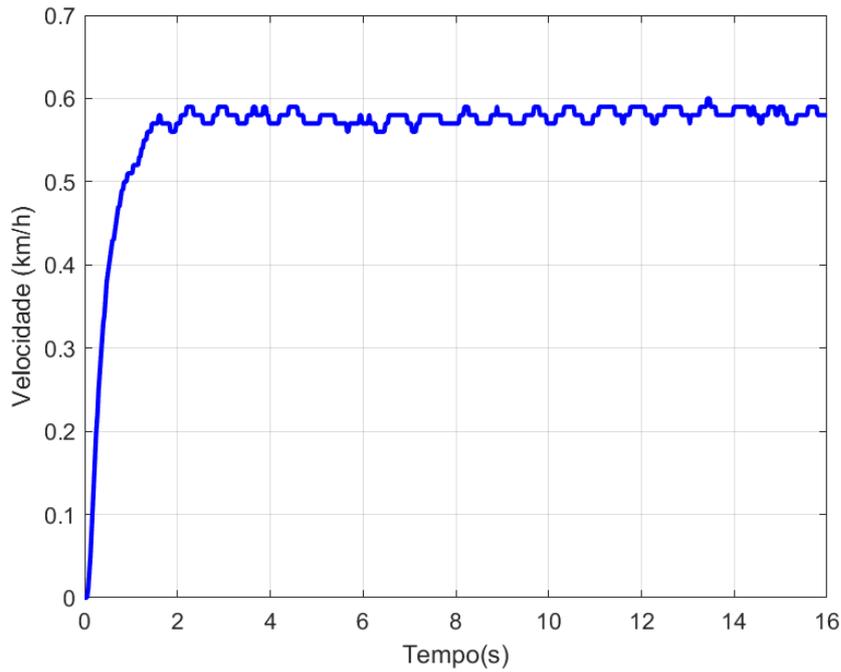


Figura 23 – Evolução temporal da velocidade da esteira esquerda para um degrau de 30% de ciclo ativo.

Como pode ser observado, a dinâmica da esteira esquerda também pode ser explicada por um sistema de primeira ordem da forma (OGATA, 1994):

$$G_e(s) = \frac{V_e(s)}{U_e(s)} = \frac{K_e}{s + a_e} \quad (2.13)$$

em que $V_e(s)$ e $U_e(s)$ denotam, na esteira esquerda, as transformadas de Laplace da velocidade da esteira esquerda e do ciclo ativo da esteira esquerda, respectivamente.

Para identificação dos parâmetros K_e e a_e , foram aplicados degraus de diferentes amplitudes na entrada (para u entre 20% e 65%). Os parâmetros K_e e a_e identificados em cada um dos ensaios realizados são mostrados na Tabela 2.

A identificação foi realizada utilizando a teoria básica de resposta ao degrau de sistemas de primeira ordem, que pode ser encontrada em OGATA (1994).

Tabela 3 – Parâmetros K_e e a_e obtidos

Amplitude do Degrau (%)	K_e	a_e
20	0,031	2,000
25	0,033	1,902
30	0,043	2,222
35	0,044	2,162
40	0,046	2,162
45	0,044	2,000
50	0,046	2,051
55	0,048	2,051
60	0,047	2,000
65	0,049	2,051

Observando a tabela, nota-se que, assim como na esteira direita, os parâmetros do modelo variam conforme a amplitude do degrau. Isso indica que há efeitos não lineares no sistema, como por exemplo, a presença de atrito seco ou não linearidades associadas à placa de potência. Por simplicidade, novamente optou-se por negligenciar tais efeitos e adotar um modelo médio. Isto é, os parâmetros K_e e a_e foram adotados como as médias dos valores apresentados na Tabela 3. Como resultado, obteve-se o seguinte modelo:

$$G_e(s) = \frac{0,043}{s + 2,060} \quad (2.14)$$

3 Estratégia de controle

O principal objetivo do presente trabalho é o desenvolvimento de sistemas de controle para rastrear referências de velocidades para as esteiras. Para evitar a queda do usuário da esteira bipartida, deseja-se que a transição entre diferentes velocidades de referência seja suave, ou seja, que a resposta seja bem amortecida, e também que o erro de regime estacionário seja nulo para referências contantes. Desse modo, os requisitos de projeto estabelecidos para atender a esses requerimentos foram até 10% de sobressinal (MS) e um tempo de estabelecimento (t_s) de até 3 segundos. Dessa forma, a velocidade da esteira irá variar minimamente ao atingir a nova velocidade desejada e terá uma transição suave entre as referências devido ao t_s elevado.

Para garantir o rastreamento correto da velocidade de referência das esteiras, foi utilizada a estratégia de controle em malha fechada (MF) para ambos os sistemas.

No controle em malha fechada, informações da saída (provenientes de um sensor) são utilizadas para determinar o sinal de entrada do processo. Em geral, o sinal de saída ($V(s)$) é comparado com um sinal de referência ($R(s)$) e o erro de rastreamento ($E(s)$), que é o desvio entre estes dois sinais, é utilizado para determinar o sinal de controle que deve efetivamente ser aplicado ao processo. Assim, o sinal de controle é determinado de forma a corrigir este desvio entre a saída e o sinal de referência (OGATA, 1994). Um diagrama representativo dessa estratégia de controle é mostrado na Figura 24.

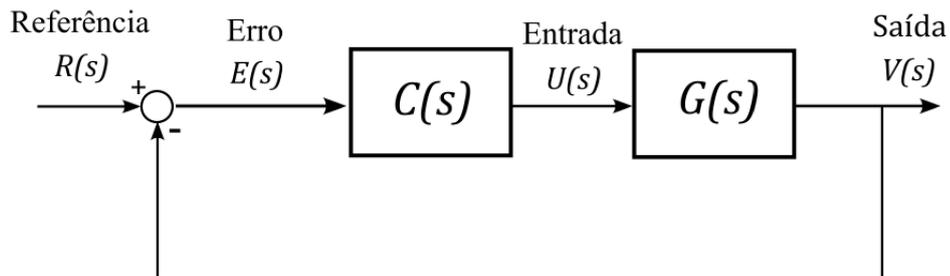


Figura 24 – Diagrama de blocos do controle em malha fechada.

3.1 Localização desejada para os polos de malha fechada

O desempenho de um sistema está diretamente relacionado com a localização dos polos em malha fechada no plano complexo. Considerando um sistema de segunda ordem na forma padrão dado por

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3.1)$$

em que ξ é o fator de amortecimento e ω_n é a frequência natural. Os polos no caso subamortecido ($0 < \xi < 1$) são definidos pela equação 3.2(OGATA, 1994).

$$P_{MF} = -\xi\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1-\xi^2} \quad (3.2)$$

O coeficiente de amortecimento ξ e a frequência natural não amortecida ω_n são relacionadas com as características da resposta transitória da seguinte forma:

$$MS = 100e^{\frac{-\xi\pi}{\sqrt{1-\xi^2}}} \quad (3.3)$$

$$t_s = \frac{4}{\xi\omega_n} \quad (3.4)$$

em que MS e t_s denotam respectivamente o sobressinal e o tempo de estabelecimento da resposta ao degrau de um sistema de segunda ordem na forma (3.1).

Sendo assim, para o sobressinal de 10 % e 3 s de tempo de estabelecimento, foram determinados os valores de $\xi = 0,59$ e $\omega_n = 2,25$ rad/s, resultando nos seguintes polos desejados de MF:

$$P_{MF} = -1,33 \pm j1,82 \quad (3.5)$$

O método escolhido para projetar os controladores para as esteiras de acordo com essa localização desejada para os polos de MF foi o LGR (Lugar Geométrico das Raízes) (OGATA, 1994). Esse método foi escolhido por ser de fácil implementação em sistemas de 1^a ordem e seu desenvolvimento ser baseado na posição dos polos de malha fechada desejados. A descrição do desenvolvimento dos controladores por meio desse método está disposta nas seções a seguir.

3.2 Controle em malha fechada - Esteira direita

Primeiramente, foi averiguado o LGR da função de transferência (2.12) no plano complexo (Figura 25), para determinar se o *root locus* passa na localização dos polos desejados. Como pode ser observado na Figura 25, o *root-locus* de $G(s)$ não passa pelos

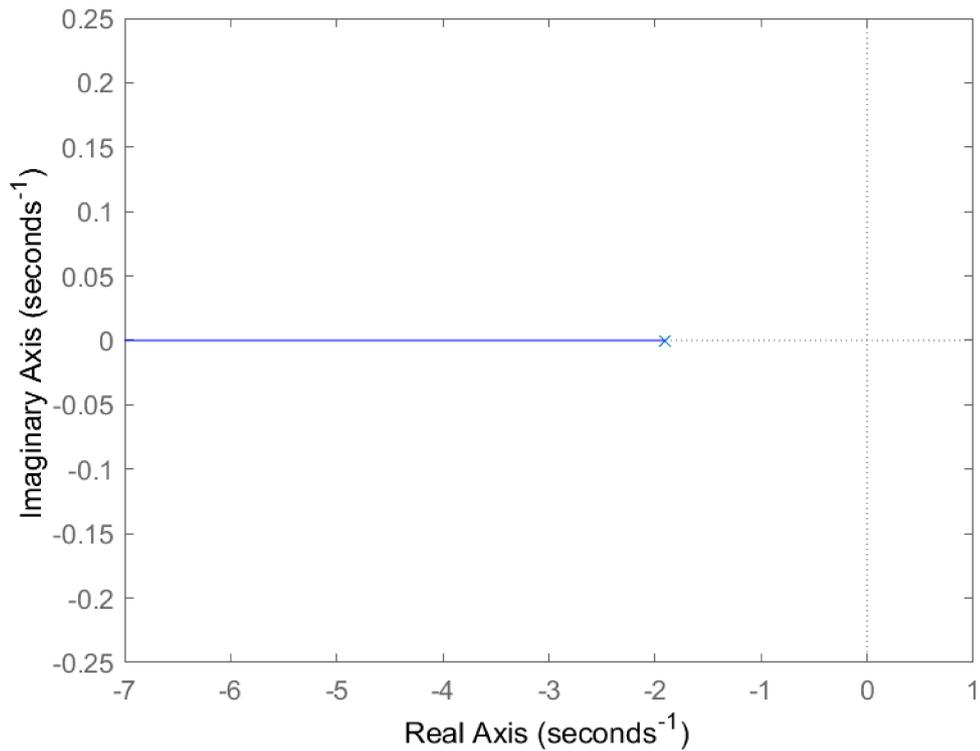


Figura 25 – LGR da função de transferência da esteira direita.

polos de malha fechada. Logo, deve ser projetado um compensador para fazer com que isso ocorra.

Em particular, foi inserido um zero em $-1,90$ para anular a influência do polo da função de transferência no LGR e facilitar a alteração do trajeto. Para garantir que o erro em regime estacionário de MF seja nulo, foi adicionado um polo em zero. Por fim, para que o LGR passe pelos polos desejados, foi adicionado um polo em $-2,66$. Logo, os zeros e polos do controlador projetado para a esteira direita são:

$$C_d(s) = \frac{K_{Cd}(s + 1,90)}{s(s + 2,66)} \quad (3.6)$$

em que K_{Cd} é o ganho do controlador que faz com que os polos de MF sejam, de fato, iguais aos desejados. Como mostrado na Figura 26, neste caso, tem-se que $K_{Cd} = 124$.

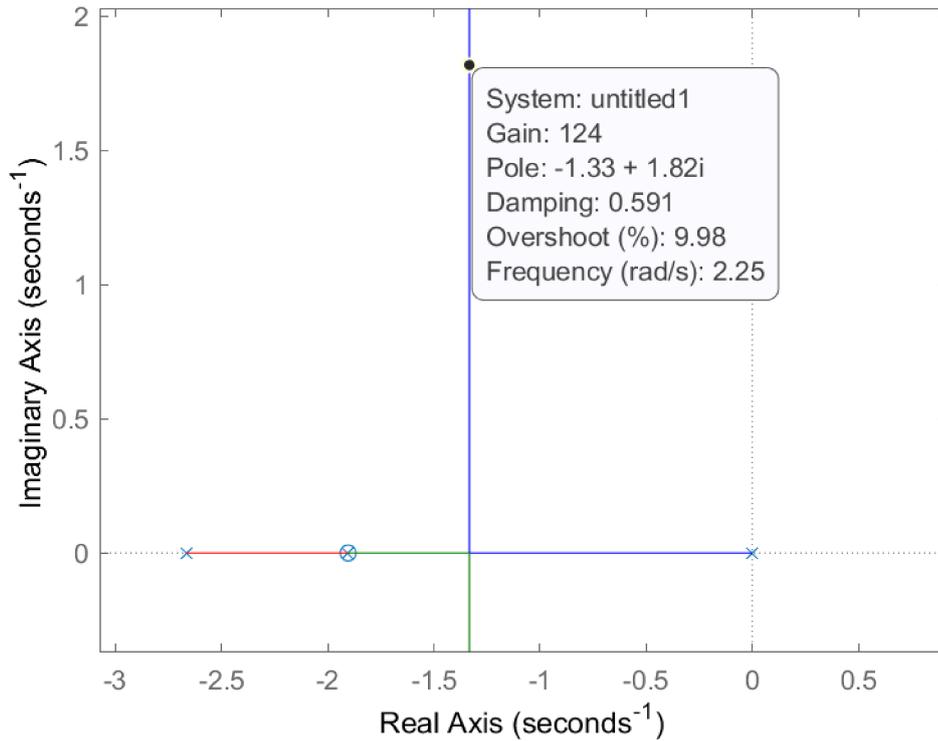


Figura 26 – LGR do sistema sob influência do controlador.

Sendo assim, a forma final do controlador da esteira direita é:

$$C_d(s) = \frac{124(s + 1,90)}{s(s + 2,66)} \quad (3.7)$$

3.3 Controle em malha fechada - Esteira esquerda

De maneira semelhante ao procedimento da esteira direita, para o sistema da esteira esquerda primeiro foi verificado o LGR da função de transferência (2.14) no plano complexo (Figura 27), para determinar se o *root locus* passa na localização dos polos desejados. Na Figura 27, pode ser observado que o *root-locus* de $G(s)$ não atravessa os polos de malha fechada desejados. Sendo assim, deve ser projetado um compensador para induzir o trajeto desejado que passe pelos polos.

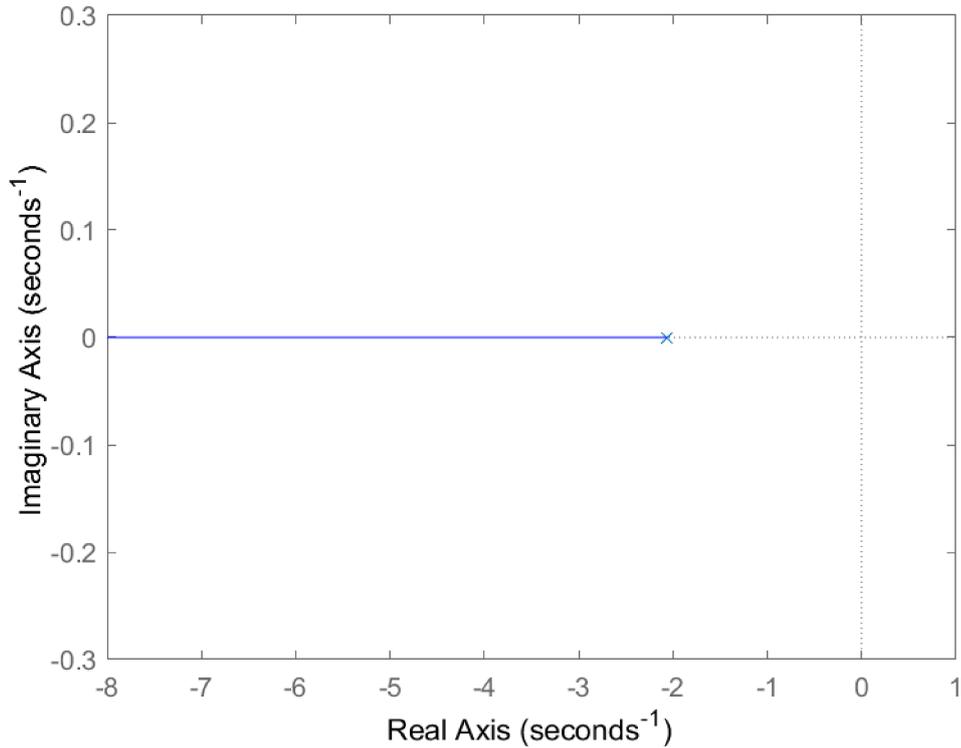


Figura 27 – LGR da função de transferência da esteira esquerda.

No caso do controlador da esteira esquerda, foi posicionado um zero em -2,06 para anular a influência do polo da função de transferência no LGR e facilitar a modificação do trajeto. De forma a assegurar que o erro em regime estacionário de MF seja nulo, foi adicionado um polo em zero. Por fim, para que o LGR passe pelos polos desejados, foi adicionado um polo em -2,66. Logo, os zeros e polos do controlador projetado para a esteira direita são:

$$C_e(s) = \frac{K_{Ce}(s + 2,06)}{s(s + 2,66)} \quad (3.8)$$

em que K_{Ce} é o ganho do controlador que faz com que os polos de MF sejam, de fato, iguais aos desejados. Como mostrado na Figura 28, neste caso, tem-se que $K_{Ce} = 117$.

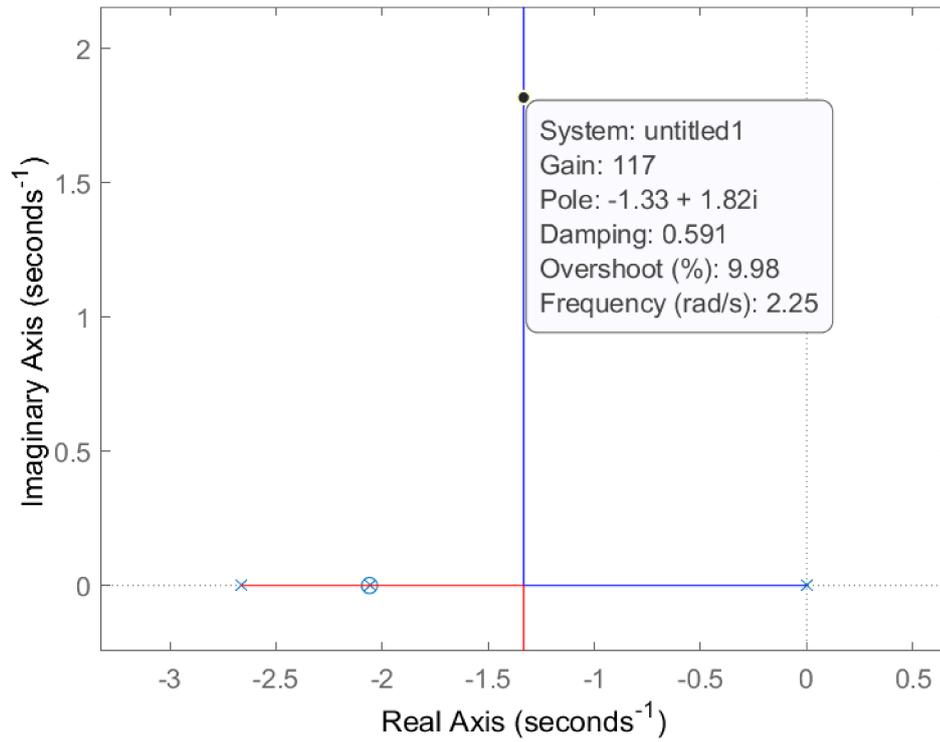


Figura 28 – LGR do sistema sob influência do controlador.

Sendo assim, a forma final do controlador da esteira esquerda é:

$$C_e(s) = \frac{117(s + 2,06)}{s(s + 2,66)} \quad (3.9)$$

4 Resultados

Neste capítulo, serão apresentados os resultados de testes de simulação e de testes experimentais realizados, com o objetivo de verificar o funcionamento dos controladores de velocidade desenvolvidos.

As simulações foram desenvolvidas utilizando o software *MatLab* e o *Simulink*. Esse software permite a simulação das variáveis que compõem os sistemas reais das esteiras, como o sinal de referência, as funções de transferência e os controladores desenvolvidos, além dos possíveis efeitos práticos. O método de integração numérica utilizado na simulação é o de Runge-Kutta, com um passo de integração de 1 ms, e um intervalo de amostragem de 25 ms para os dados.

Para os testes experimentais, foi criado um código no próprio Ambiente de Desenvolvimento Integrado (IDE - *Integrated Development Environment*) do Arduino, a fim de implementar o sistema de controle desenvolvido para as esteiras através do Arduino UNO. O intervalo de amostragem para a implementação do controlador foi de 25 ms, assim como nas simulações. O código utilizado nesses testes está disposto no Apêndice A.

4.1 Resultados de simulação

Os testes realizados em simulação foram utilizados para verificar o comportamento dos controladores desenvolvidos antes de aplicá-los nos sistemas reais.

Para obter simulações mais representativas, foram implementados efeitos práticos no modelo de simulação de ambas as esteiras. Foram inseridos a saturação na entrada do sistema entre 0 % e 100 % de ciclo ativo, além de um ruído no sinal de saída, de forma a simular a leitura do sensor real e perturbações externas. O modelo utilizado para simular as esteiras direita e esquerda é mostrado na Figura 29.

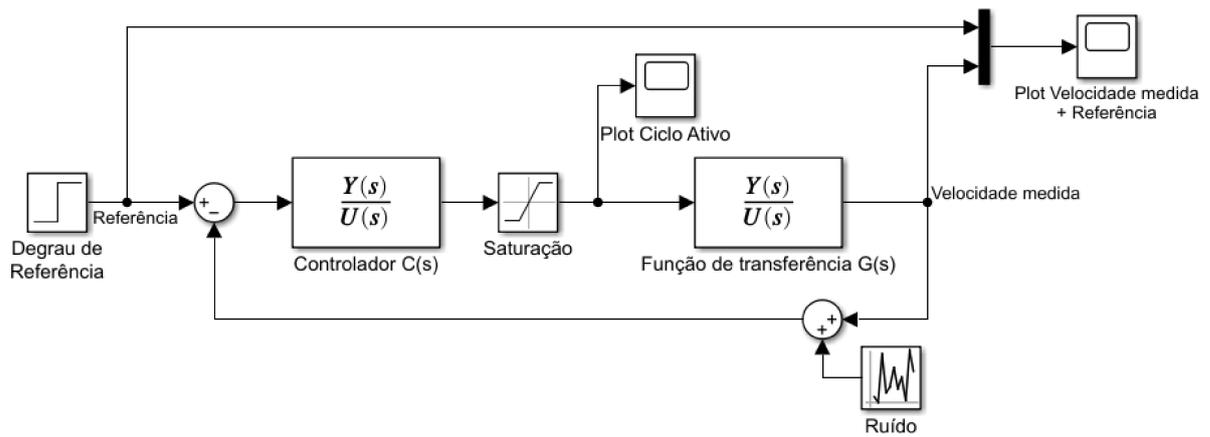


Figura 29 – Modelo de simulação das esteiras direita e esquerda com inclusão de efeitos práticos.

4.1.1 Simulação do sistema de controle em malha fechada para a esteira direita

Na simulação da esteira direita em malha fechada, foi estabelecida uma referência do tipo degrau com amplitude 1,5 km/h. Com os parâmetros do controlador estabelecidos em (3.7) e com a introdução dos efeitos de saturação e atraso. Os resultados dessa simulação estão dispostos nas Figuras 30 e 31.

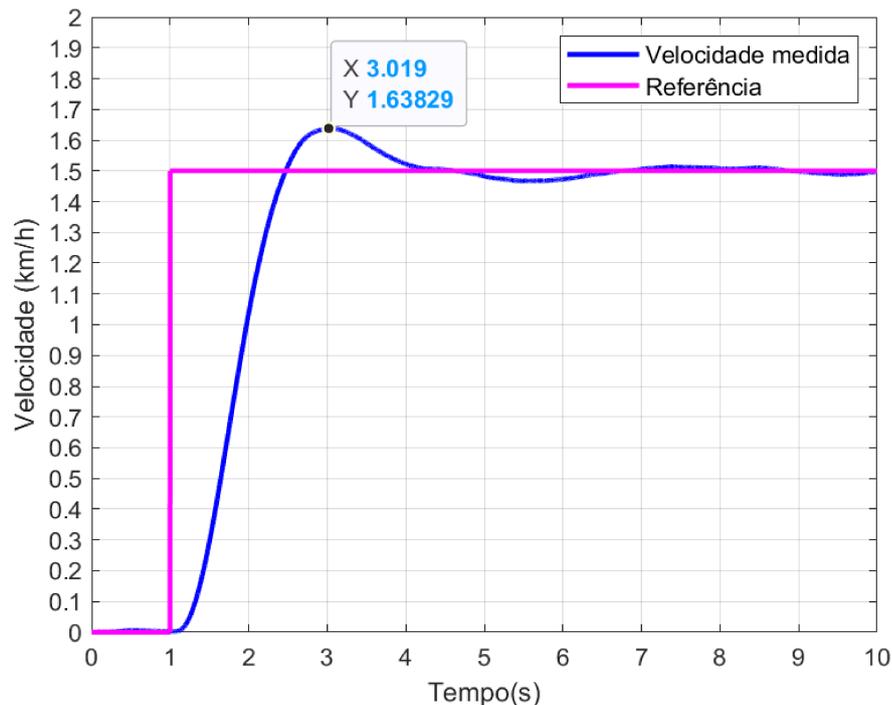


Figura 30 – Simulação do sistema da esteira direita - Velocidade linear.

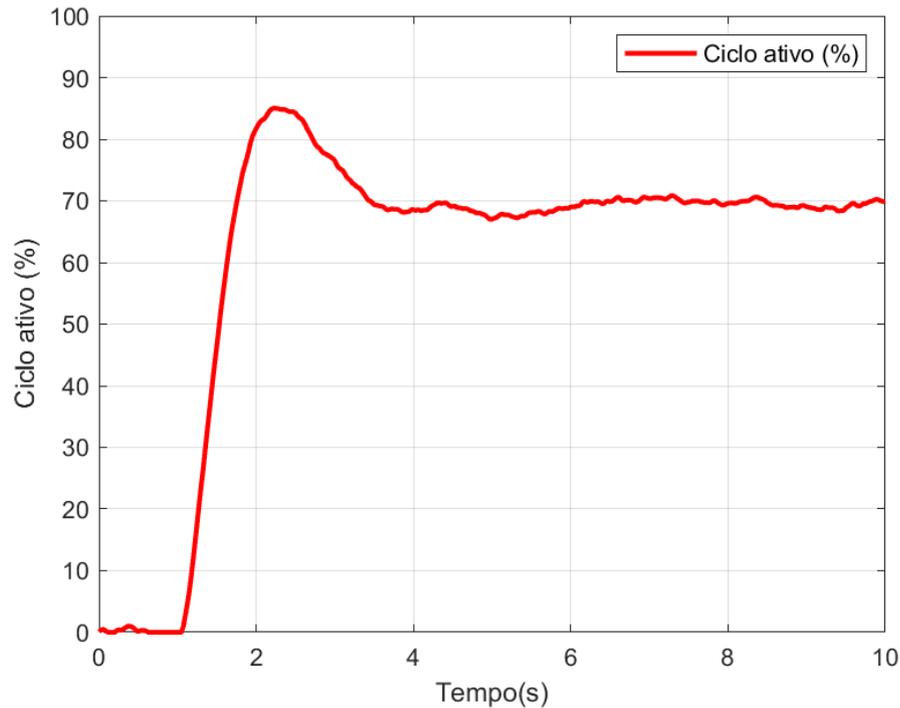


Figura 31 – Simulação do sistema da esteira direita - Ciclo ativo.

Como pode ser observado, o controle em malha fechada atendeu aos requisitos do projeto ao convergir para a referência de maneira suave, com um máximo sobressinal inferior a 10 % e com um tempo de estabelecimento inferior à 3 s.

Sendo assim, com o controlador projetado e os testes em simulação satisfatórios, foram realizados testes práticos com o controlador no sistema real da esteira direita, como será disposto na Seção 4.2.

4.1.2 Simulação do sistema de controle em malha fechada para a esteira esquerda

Para a simulação da esteira esquerda em malha fechada, novamente foi estabelecida uma referência de 1,5 km/h. Os parâmetros do controlador da esteira esquerda são os mesmos da esteira direita, estabelecidos em (3.9), com a adição dos efeitos práticos de saturação e atraso. Os gráficos que ilustram os resultados da simulação estão dispostos nas Figuras 32 e 33.

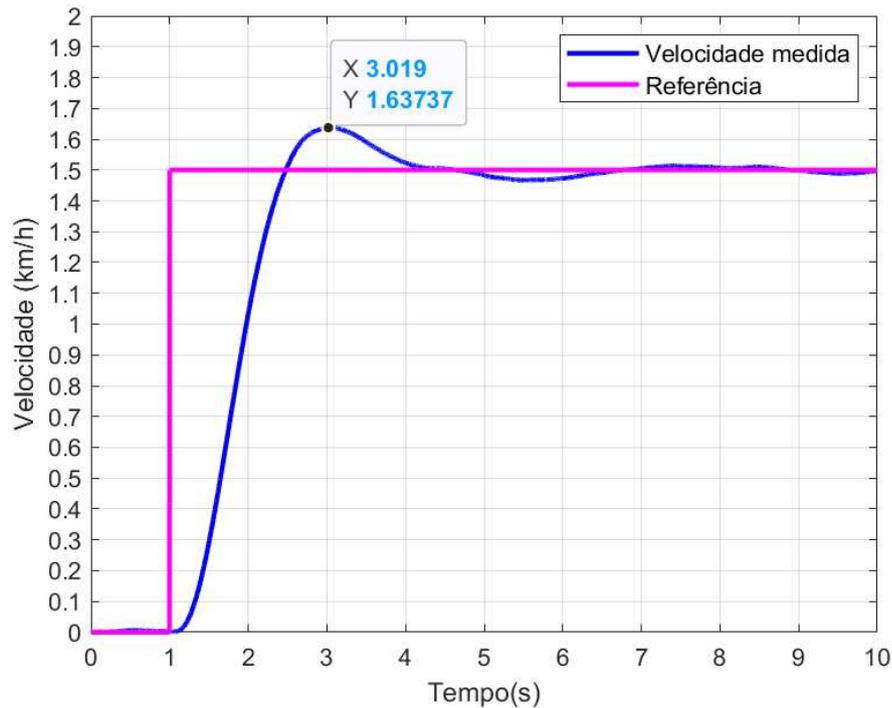


Figura 32 – Simulação do sistema da esteira esquerda - Velocidade linear.

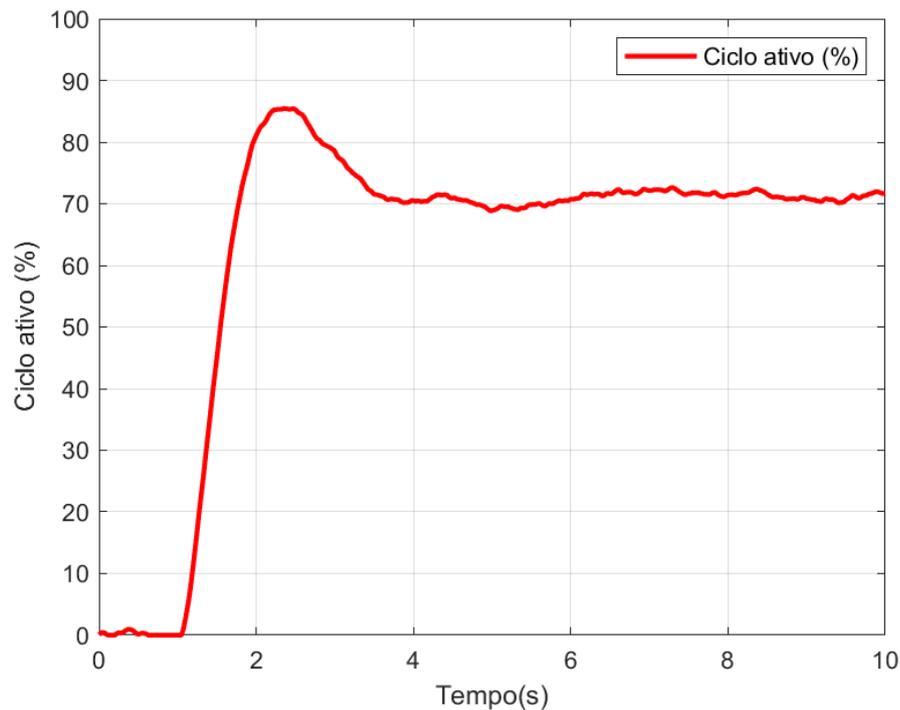


Figura 33 – Simulação do sistema da esteira esquerda - Ciclo ativo.

De maneira similar à simulação da outra esteira, o controle em malha fechada desse sistema também atendeu aos requisitos do projeto ao convergir para a referência de maneira suave, com MS inferior a 10% e com t_s inferior à 3 s.

Com isso, com as variáveis do controlador definidas e testadas em simulação de forma satisfatória, foram feitos testes com o controlador no sistema real, como será disposto na Seção 4.2.

4.2 Resultados experimentais

Os testes experimentais foram realizados para avaliar como fatores que não puderam ser incluídos nas simulações afetam os desempenhos das esteiras. Fatores práticos como atrito, atrasos por indutância dos motores e a montagem do circuito eletrônico afetam o desempenho dos controladores.

4.2.1 Esteira direita

Para os testes no sistema da esteira direita, foi definida uma referência inicial de 1 km/h e, após 8 s, uma referência de 1,5 km/h, para assim ser analisada a performance do controlador na troca de referência em diferentes estados do sistema. Os resultados podem ser observados nas Figuras 34 e 35.

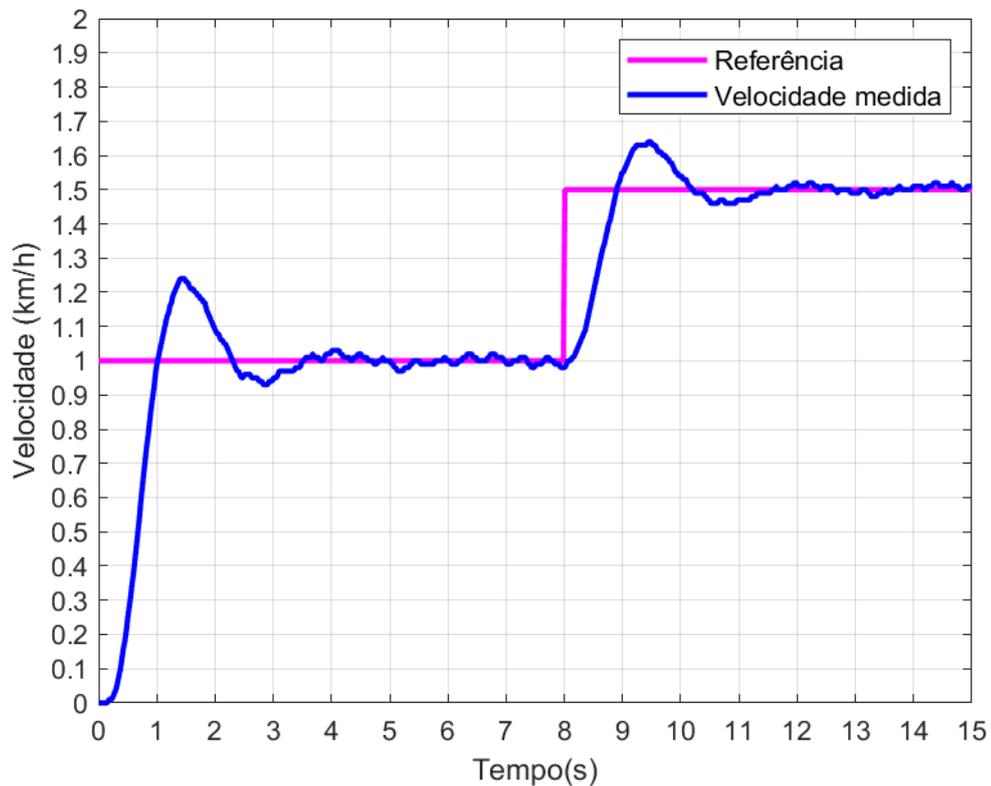


Figura 34 – Resultados dos testes experimentais na esteira direita - Velocidade linear.

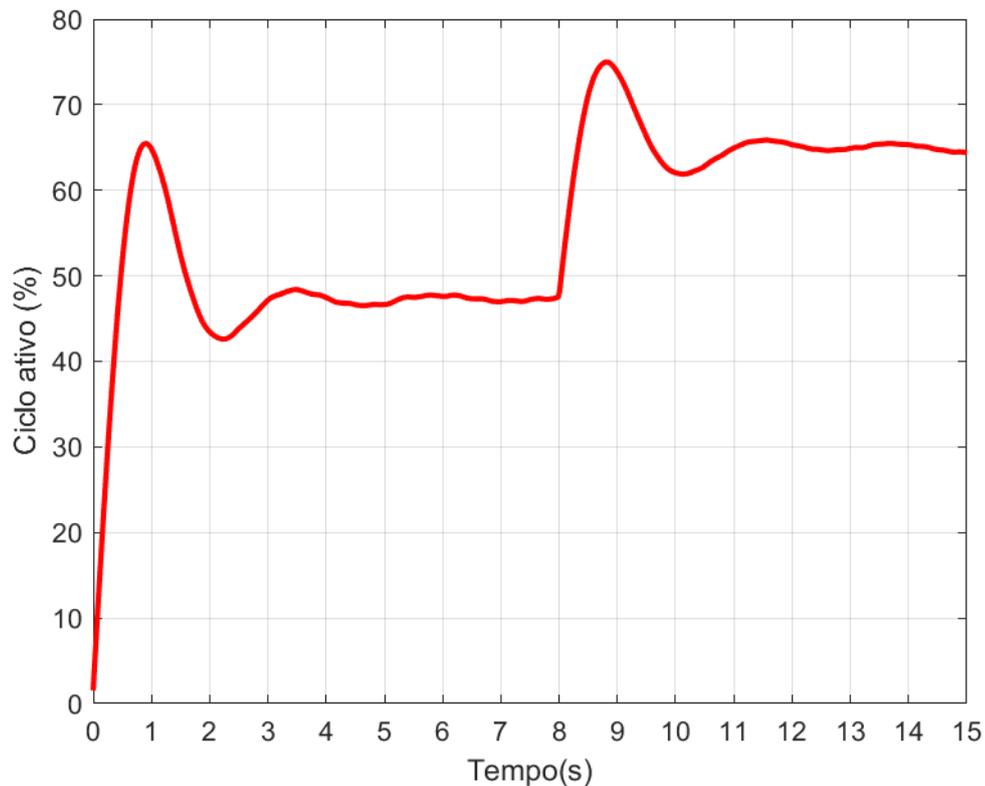


Figura 35 – Resultados dos testes experimentais na esteira direita - Ciclo ativo.

Vale destacar que, inicialmente, há um atraso para o sistema responder conforme o ciclo ativo aumenta. Isso se deve ao atrito seco da esteira que cria uma zona de morta de resposta, o que causa que o controlador imponha um ciclo ativo maior sobre o sistema para compensar a resistência e gere uma resposta de velocidade com um pico mais elevado até a estabilização. Ainda sim, pode ser observado que na primeira troca de referência o sistema demonstra características de resposta próximas às de projeto ($MS < 10\%$ e $t_s < 3\text{ s}$). Já na segunda troca de referência, é possível observar que o sistema atende aos parâmetros desejados para o sistema.

4.2.2 Esteira esquerda

Nos testes no sistema da esteira esquerda, novamente foi definida uma referência inicial de 1 km/h e em segunda, após 8 segundos, uma referência de 1,5 km/h, para avaliar a performance do controlador no caso da troca de referência. Os resultados podem ser observados nas Figuras 36 e 37.

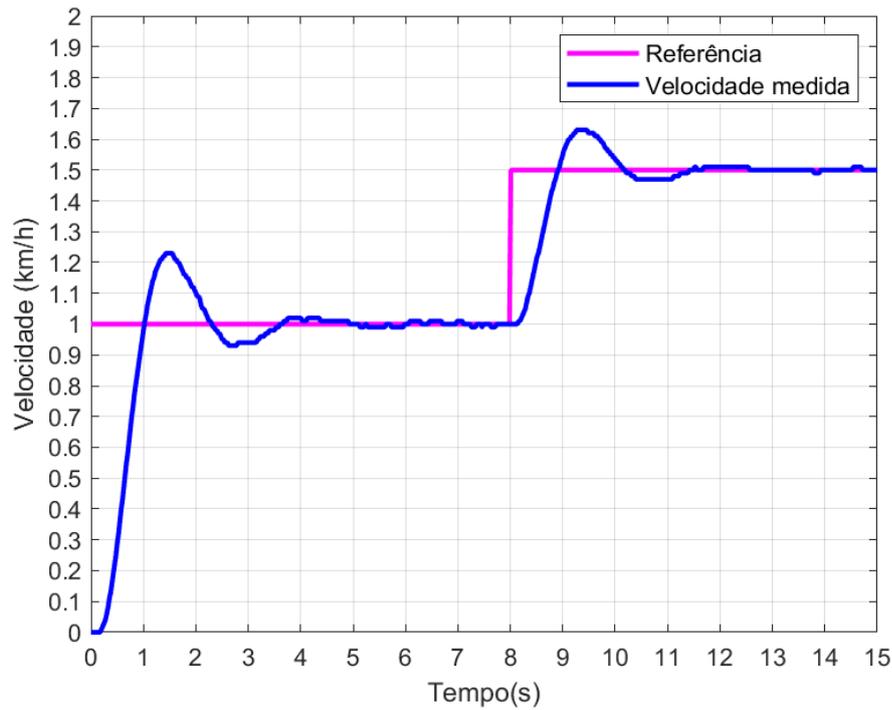


Figura 36 – Resultados dos testes experimentais na esteira esquerda - Velocidade linear.

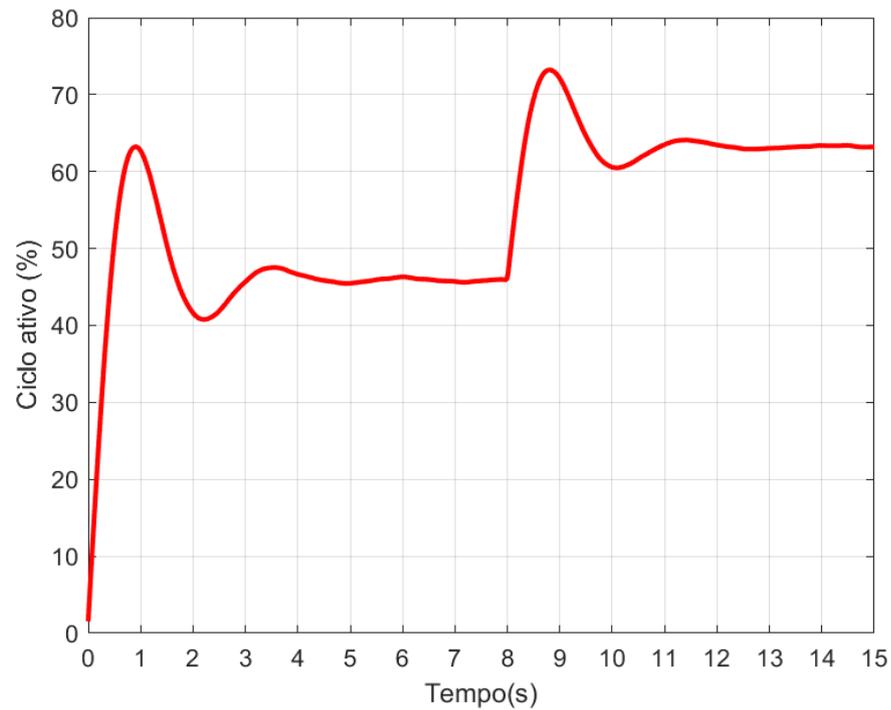


Figura 37 – Resultados dos testes experimentais na esteira esquerda - Ciclo ativo.

Novamente, vale denotar o atraso inicial gerado pela zona morta do sistema, de forma similar ao que ocorre no sistema da esteira direita. Apesar do atraso de resposta inicial, na primeira troca de referência o sistema também demonstra parâmetros próximos aos estabelecidos para o projeto ($MS < 10\%$ e $t_s < 3\text{ s}$). Na segunda troca de referência, novamente observa-se que o sistema atende aos parâmetros desejados para o sistema.

4.2.3 Suavização do pico de velocidade com filtro na referência

Apesar dos desempenhos dos sistemas de ambas as esteiras serem adequados, devido à proximidade dos resultados com os parâmetros desejados de projeto, em aplicações reais a presença do sobressinal pode ser desconfortável para o paciente que esteja caminhando sobre a esteira. Para suavizar a resposta do sistema após a troca de referência sem modificar o controlador projetado, foi adicionado um filtro de primeira ordem entre o sinal de referência e o somador utilizado para calcular o erro de rastreamento. Em particular, o seguinte filtro foi adicionado:

$$F(s) = \frac{1}{0,6s + 1} \quad (4.1)$$

Com isso, o degrau de referência é filtrado dando origem a uma resposta de primeira ordem, como a mostrada na Figura 38 para uma referência degrau de amplitude 1,5 km/h.

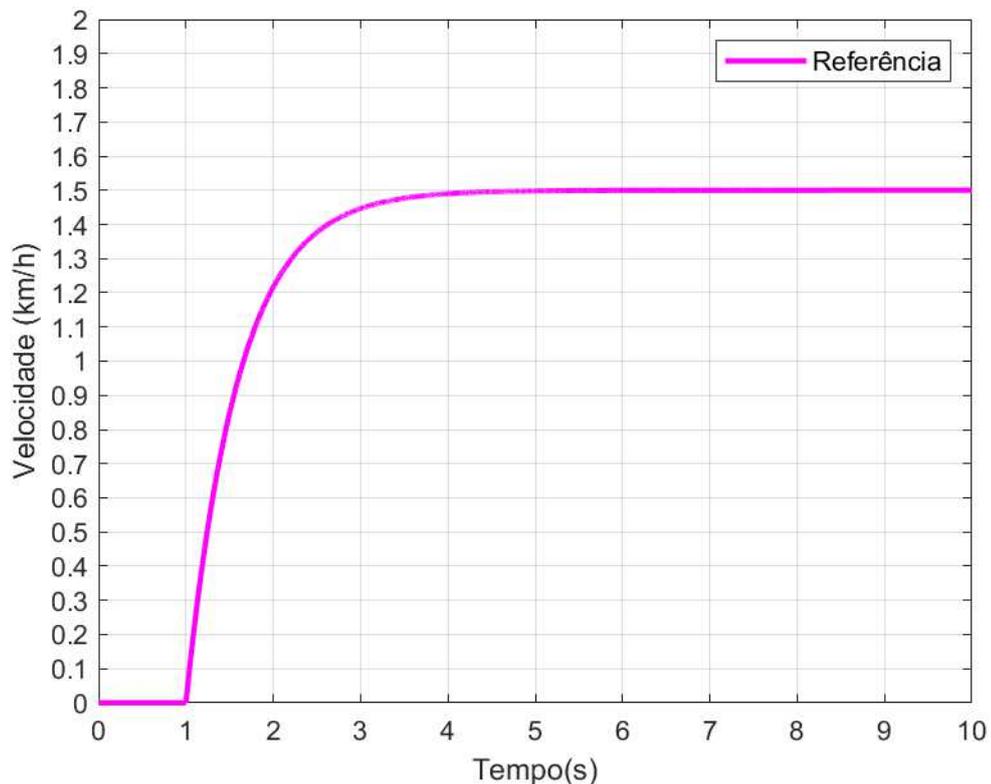


Figura 38 – Sinal de referência com comportamento de sistema de primeira ordem.

Em seguida, foram coletados os resultados das esteiras direita (Figuras 39 e 40) e esquerda (Figuras 41 e 42) após a implementação do filtro de referência dado por (4.1). Como pode ser verificado, a introdução desse filtro suavizou a resposta do sistema às mudanças de referência. Em ambos os casos, a saída foi guiada para a referência.

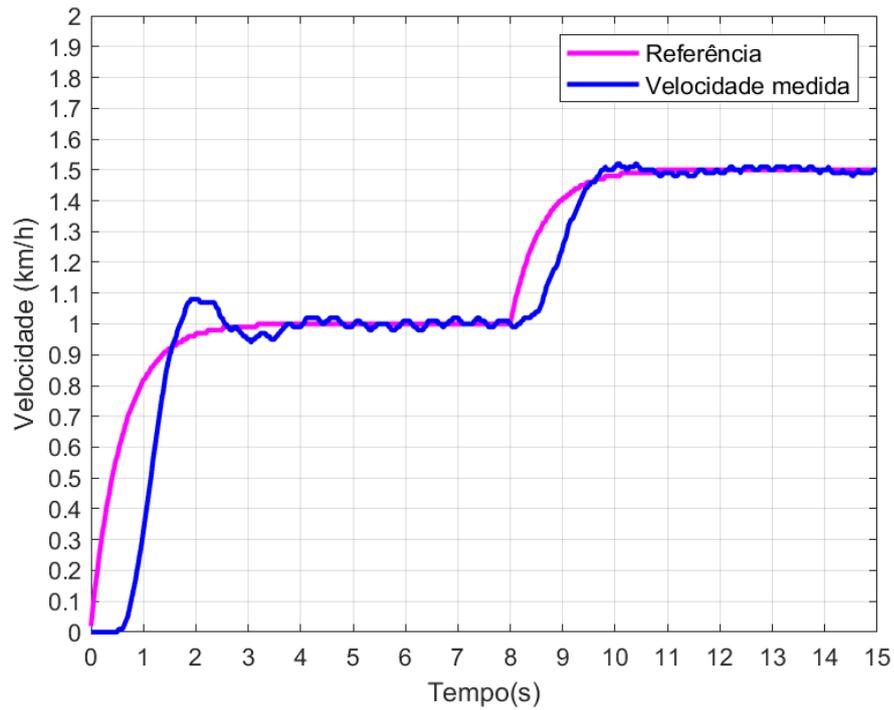


Figura 39 – Resultados dos testes experimentais na esteira direita com a mudança no sinal de referência - Velocidade linear.

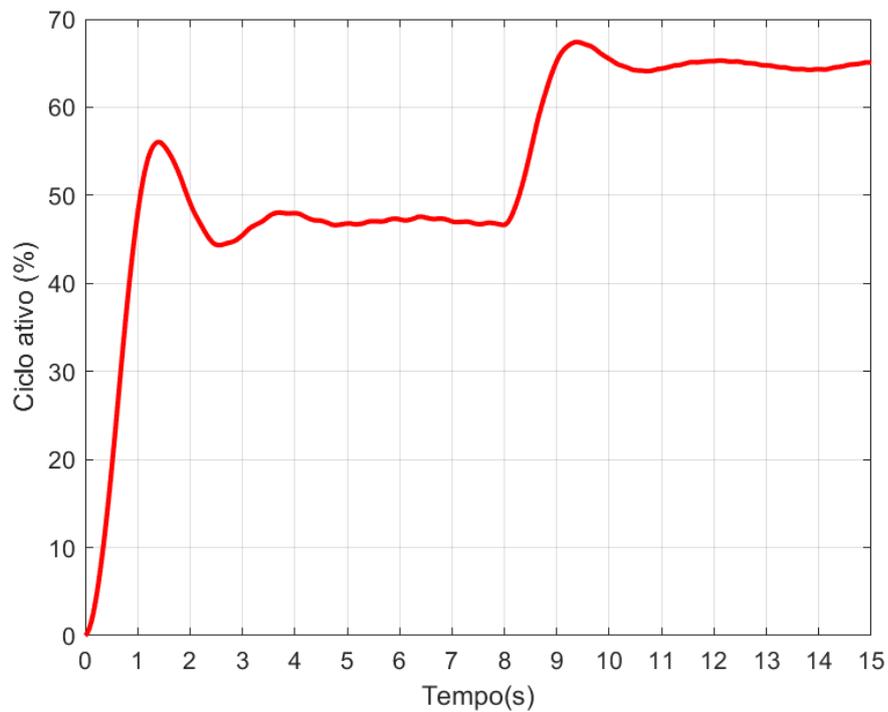


Figura 40 – Resultados dos testes experimentais na esteira direita com a mudança no sinal de referência - Ciclo ativo.

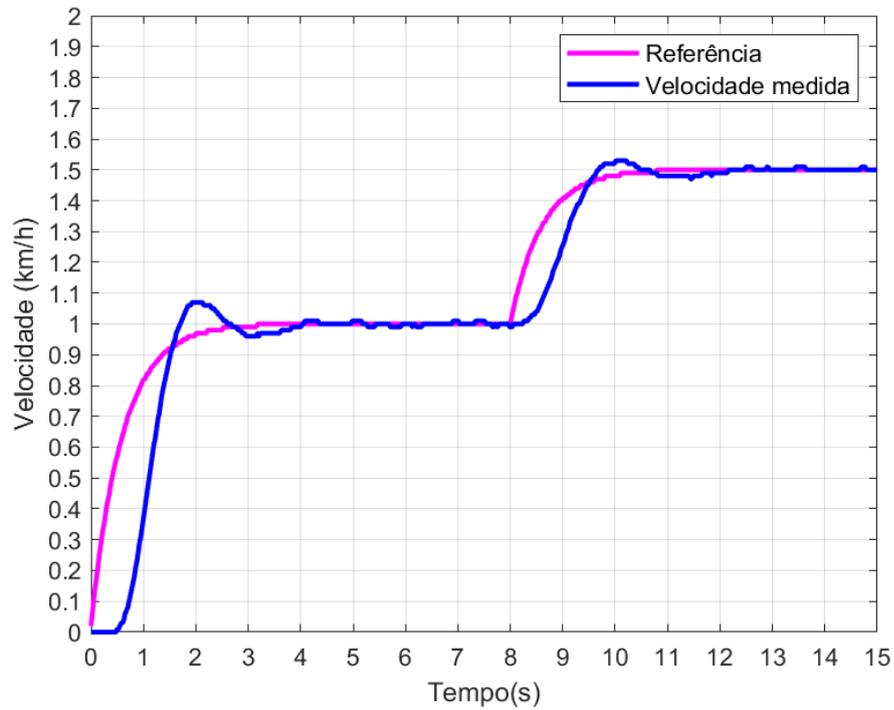


Figura 41 – Resultados experimentais da esteira esquerda com a mudança no sinal de referência - Velocidade linear.

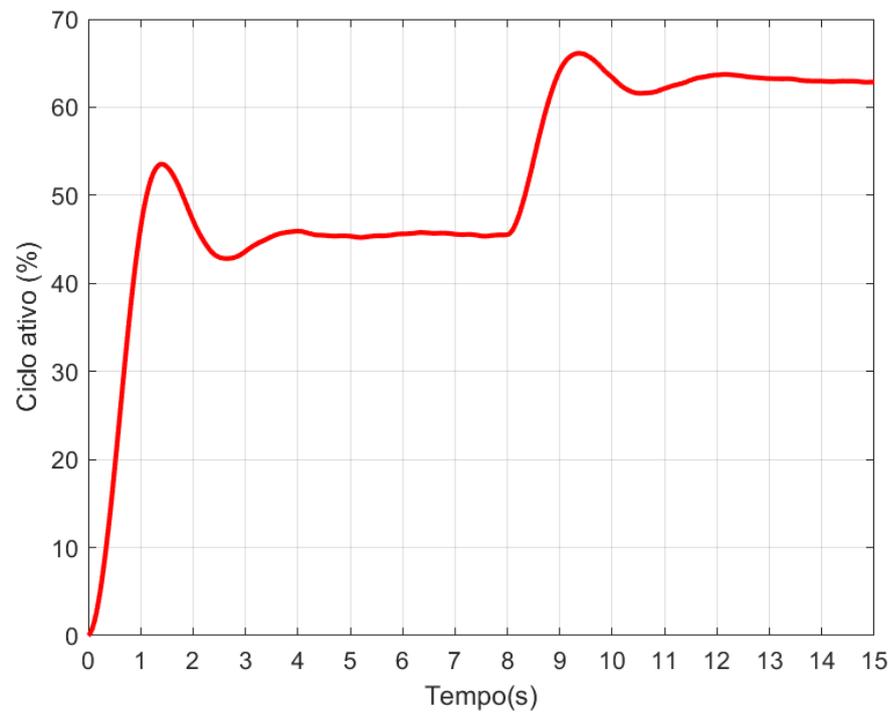


Figura 42 – Resultados experimentais da esteira esquerda com a mudança no sinal de referência - Ciclo ativo.

4.2.4 Resultados experimentais com a marcha humana

Como um teste final, foram verificados os desempenhos das esteiras com uma pessoa andando sobre elas. Os testes foram feitos com um indivíduo apoiado com uma perna sobre cada esteira, assim como é na proposta do projeto, com as esteiras inicialmente paradas. Em ambas as esteiras foram estabelecidas referências de 1 km/h. As evoluções temporais das velocidades das esteiras direita e esquerda estão dispostas nas Figuras 43 e 44, respectivamente.

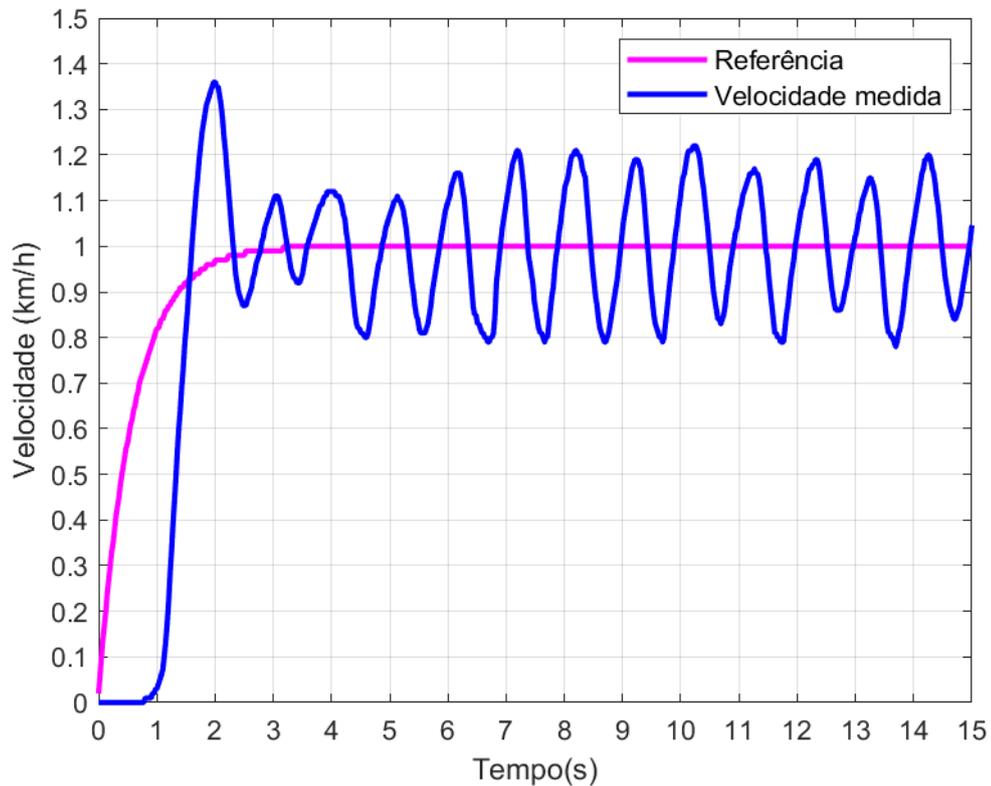


Figura 43 – Resultados experimentais da esteira direita com a marcha humana.

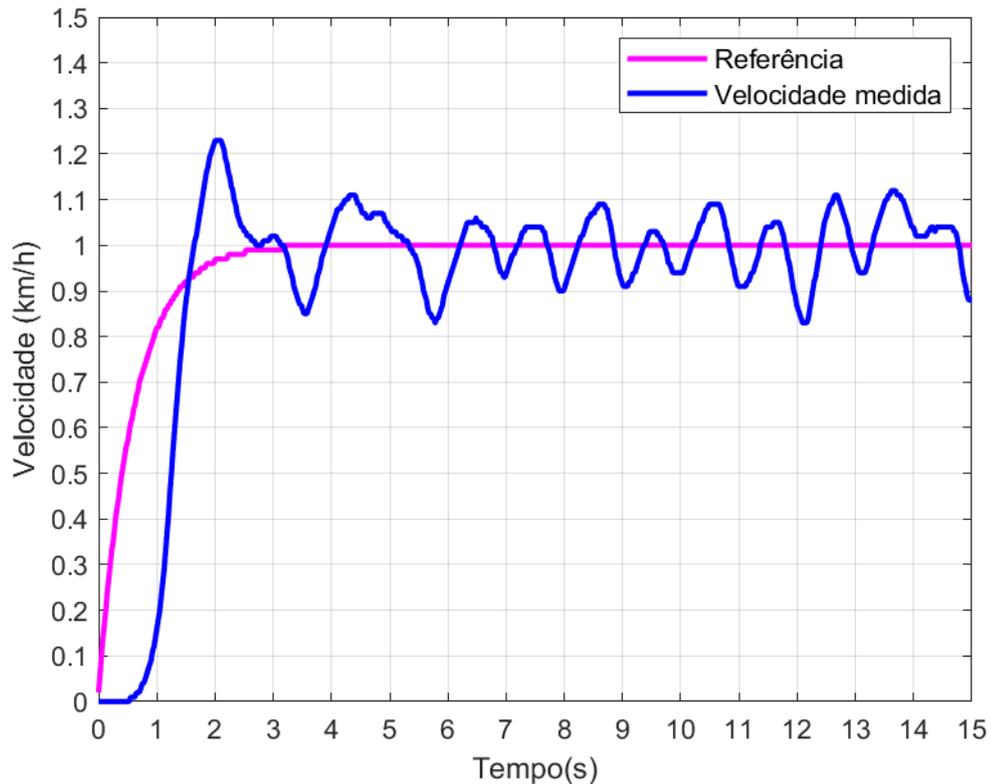


Figura 44 – Resultados experimentais da esteira esquerda com a marcha humana.

Nota-se que as perturbações causadas pela marcha humana sobre as esteiras afetam o rastreamento da velocidade. Ao partir do repouso, a presença do indivíduo causa um aumento do sobressinal de velocidade. Além disso, a passada do indivíduo, que atua de forma inconstante, fundamentalmente altera a dinâmica do sistema a todo momento, dificultando a tarefa de controle.

Curiosamente, notou-se que a resposta da esteira direita é mais oscilatória que o da esteira esquerda. Isso pode estar associado com o fato da pessoa andou sobre as esteiras colocando mais peso apoiado na perna direita. Então, constata-se que os desempenhos dos controladores podem variar de acordo com a maneira que o indivíduo caminha.

Apesar das adversidades no controle dos sistemas impostas pela marcha humana, os desempenhos foram considerados satisfatórios, com as velocidades em um padrão de oscilação constante e que em nenhum momento se diferenciaram mais de 20% das velocidades de referência estabelecidas.

5 Conclusão

Este projeto está envolvido no desenvolvimento de uma estrutura robótica que possa ser empregada na reabilitação da marcha humana e auxiliar na recuperação de indivíduos. Especificamente, a estrutura HOPE-G está sendo construída no LAR, sendo seu principal componente uma esteira bipartida capaz de estabelecer ritmos distintos de passo em cada perna do indivíduo, o que pode auxiliar na recuperação do paciente. O desenvolvimento dessa estrutura robótica é de suma importância para aplicações em que a recuperação de um paciente precisa ser minimamente invasiva, permitindo a movimentação mais natural dos membros inferiores, ao mesmo tempo em que há um estímulo do exercício de reabilitação em ambas as pernas. Para que esse sistema funcione adequadamente, foram desenvolvidos sistemas de controle em malha fechada que fazem com que as esteiras sigam referências de velocidade estabelecidas por um profissional de saúde ou sistema externo.

No primeiro período do projeto, foram realizadas modificações estruturais nas esteiras necessárias para dar início ao projeto dos controladores. Mais especificamente, instalaram-se encoders para a leitura das velocidades lineares da esteiras com o auxílio de peças impressas em uma impressora 3D. Mais ainda, projetou-se um filtro Butterworth passa-baixas para filtrar as informações provenientes dos sensores. Outra modificação feita foi a substituição das placas de potência originais das esteiras por placas projetadas no laboratório, a fim de eliminar o atraso de resposta dos sistemas e possibilitar o controle das velocidades por meio de um Arduino UNO. Como resultado, pôde-se controlar a velocidade da esteira utilizando o Arduino e medir a velocidade real com o auxílio do encoder.

Após essas modificações, foram realizados uma série de ensaios experimentais nas duas esteiras para fins de modelagem. Conseqüentemente foram obtidos modelos de primeira ordem para cada esteira. A partir desses modelos, desenvolveram-se dois controladores capazes de rastrear referências de velocidade para as esteiras dentro de requisitos estabelecidos para o projeto.

Resultados de simulação e experimentais mostraram que ambos os controladores foram capazes de fazer com que as velocidades das esteiras fossem guiadas para valores de referência de acordo com os requisitos de projeto. Posteriormente foi introduzido um filtro de referências para atenuação do sobressinal causado por referências do tipo degrau. Com a presença de um indivíduo sobre as esteiras, os desempenhos dos controladores foram afetados devido à inconsistência da marcha humana. Entretanto, considerou-se que as performances foram satisfatórias com as velocidades medidas se mantendo em torno

de 20 % das referências estabelecidas, cumprindo assim com a proposta do projeto de desenvolver um controlador capaz de auxiliar os profissionais da área da saúde coma reabilitação dos membros inferiores de pacientes.

Referências

- BARBOSA, A. M. *Desenvolvimento de uma estrutura robótica atuada por cabos para reabilitação do membro inferior humano*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil, 2013.
- BARBOSA, A. M.; CARVALHO, J. C. M.; GONÇALVES, R. S. Cable-driven lower limb rehabilitation robot. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 40, n. 245, 2018.
- BOGLIETTI, A. et al. Different PWM modulation techniques indexes performance evaluation. In: IEEE. *ISIE'93-Budapest: IEEE International Symposium on Industrial Electronics Conference Proceedings*. Budapeste, 1993. p. 193–199.
- CLAFLIN, E. S.; KRISHNAN, C.; KHOT, S. P. Emerging treatments for motor rehabilitation after stroke. *The Neurohospitalist*, SAGE Publications, v. 5, n. 2, p. 77–88, 2015.
- DÍAZ, I.; GIL, J. J.; SÁNCHEZ, E. Lower-limb robotic rehabilitation: literature review and challenges. *Journal of Robotics*, Hindawi, 2011.
- DOBKIN, B. H.; DUNCAN, P. W. Should body weight–supported treadmill training and robotic-assistive steppers for locomotor training trot back to the starting gate? *Neurorehabilitation and neural repair*, Sage Publications Sage CA: Los Angeles, CA, v. 26, n. 4, p. 308–317, 2012.
- DUNCAN, P. W. et al. Body-weight–supported treadmill rehabilitation after stroke. *The New England Journal of Medicine*, v. 1, n. 364, p. 2026–2036, 2011.
- LEWEK, M. D. et al. The role of movement errors in modifying spatiotemporal gait asymmetry post stroke: a randomized controlled trial. *Clinical rehabilitation*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 32, n. 2, p. 161–172, 2017.
- OGATA, K. *Discrete-time Control Systems*. 2. ed. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 1994.
- PERTENCE, A. *Amplificadores Operacionais e Filtros Ativos*. 8. ed. Porto Alegre: Bookman Editora, 2015.
- SILVA, E. V. Automação de uma esteira ergométrica para aplicação em realidade virtual. Dissertação (TCC) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Lume UFRGS, 2013.
- SUSKO, T.; SWAMINATHAN, K.; KREBS, H. I. MIT-Skywalker: a novel gait neurorehabilitation robot for stroke and cerebral palsy. *IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering*, IEEE, v. 24, n. 10, p. 1089–1099, 2016.
- SUSKO, T. G. *MIT Skywalker: a novel robot for gait rehabilitation of stroke and cerebral palsy patients*. Tese (Doutorado) — Departamento de Engenharia Mecânica — Instituto de Tecnologia de Massachusetts, Cambridge, Massachusetts, USA, 2015.

Apêndices

APÊNDICE A – Código de controle implementado na IDE do Arduino

```

#include <Encoder.h>
#include <PWM.h>

int pwm_d = 9;
int pwm_e = 7;
Encoder meuEncoder_d(2,3) ;
Encoder meuEncoder_e(4,5) ;

// Definindo variaveis

//DIREITA
double velAng_d , theta_d = 0.0 , thetaAnt_d = 0.0 , tempoRef_d = 0.0 ,
    tempo_total_d=0.0, tempo_inicio=0.0, tempo_d = 0.0 , dt_d, ds_d, teste_d =
    0, voltas_d, distancia_d, erro_d = 0.0, erro_m1_d = 0.0, erro_m2_d = 0.0,
    u_d = 0.0, u_m1_d = 0.0, u_m2_d = 0.0;

long contEnc_d = 0.0, contRef_d = 0.0, mediavel_d;

//ESQUERDA
double velAng_e , theta_e = 0.0 , thetaAnt_e = 0.0 , tempoRef_e = 0.0 ,
    tempo_total_e=0.0, tempo_inicio=0.0, tempo_e = 0.0 , dt_e, ds_e, teste_e =
    0, voltas_e, distancia_e, erro_e = 0.0, erro_m1_e = 0.0, erro_m2_e = 0.0,
    u_e = 0.0, u_m1_e = 0.0, u_m2_e = 0.0;

long contEnc_e = 0.0, contRef_e = 0.0, mediavel_e;

// Variaveis dos filtros

//DIREITA
double velFiltrada_d = 0.0 , velFiltrada_m1_d = 0.0 , velFiltrada_m2_d = 0.0,
    velEsteira_d = 0.0, velEsteira_m1_d = 0.0, velEsteira_m2_d = 0.0;
double velRef_d = 0.0, velRef_m1_d = 0.0, velRefFiltrada_d = 0.0,
    velRefFiltrada_m1_d = 0.0;

```

```
//ESQUERDA
double velFiltrada_e = 0.0 , velFiltrada_m1_e = 0.0 , velFiltrada_m2_e = 0.0,
      velEsteira_e = 0.0, velEsteira_m1_e = 0.0, velEsteira_m2_e = 0.0;
double velRef_e = 0.0, velRef_m1_e = 0.0, velRefFiltrada_e = 0.0,
      velRefFiltrada_m1_e = 0.0;

void setup() {

  Serial.begin(9600) ;

  pinMode(pwm_d,OUTPUT);
  digitalWrite(pwm_d,HIGH);
  InitTimersSafe();
  SetPinFrequencySafe(pwm_d, 1000);

  pinMode(pwm_e,OUTPUT);
  digitalWrite(pwm_e,HIGH);
  SetPinFrequencySafe(pwm_e, 1000);

  tempo_inicio = micros();
}

void loop() {

  tempo = micros();

  // ESTEIRA DIREITA

  thetaAnt_d = theta_d ;

  // Determinando leitura atual do encoder
  contEnc_d = meuEncoder_d.read() ;

  // Determinando tempo atual, dt, ds e velAng
  dt_d = tempo - tempoRef_d;
  ds_d = contEnc_d - contRef_d;
  voltas_d = ds_d/2400.0; // Resolucao do encoder * 4

  distancia_d=2.0*3.1416*voltas; // rads

  velAng_d = distancia_d/dt_d *1000000.0;
```

```
tempoRef_d = tempo;
contRef_d = contEnc_d;

// Velocidade linear da esteira (Relacao com vel angular do encoder)
velEsteira_d = velAng_d*0.0084*3.6;

// Aplicacao do filtro passa-baixa de Butterworth na velocidade lida
velFiltrada_d = 1.324*velFiltrada_m1_d - 0.5006*velFiltrada_m2_d +
    0.04414*velEsteira_d + 0.08827*velEsteira_m1_d +
    0.04414*velEsteira_m2_d; //Para Ta = 25ms
velFiltrada_m2_d = velFiltrada_m1_d; velFiltrada_m1_d = velFiltrada_d;
velEsteira_m2_d = velEsteira_m1_d; velEsteira_m1_d = velEsteira_d;

// Degrau de Referencia
velRef_d = 1.0;

if ((tempo - tempo_inicio)> 8000000){
    velRef_d = 1.0;
}

// Aplicacao de filtro no degrau de referencia
velRefFiltrada_d = 0.959183673469388*velRefFiltrada_m1_d +
    0.0204081632653061*velRef_d + 0.0204081632653061*velRef_m1_d;

velRefFiltrada_m1_d = velRefFiltrada_d; velRef_m1_d = velRef_d;

// Erro de rastreamento
erro_d = velRefFiltrada_d - velFiltrada_d;

// Calculo da acao de controle
u_d = u_m1_d*1.93548402705516 - u_m2_d*0.935484027055164 +
    erro_d*1.53571324884784 + erro_m1_d*0.0714262557601822 -
    erro_m2_d*1.46428699308766; // Controlador em funcao das variaveis

u_m2_d = u_m1_d; u_m1_d = u_d; erro_m2_d = erro_m1_d; erro_m1_d = erro_d;

// Saturacao da acao de controle
u_d = min(u_d ,100.0) ;// limitando superiormente
u_d = max(u_d ,0.0) ;// limitando inferiormente

// Velocidade
pwmWrite(pwm_d,255*u_d/100);
```

```
// ESTEIRA ESQUERDA
```

```
thetaAnt_e = theta_e ;

// Determinando leitura atual do encoder
contEnc_e = meuEncoder_e.read() ;

// Determinando tempo atual, dt, ds e velAng

dt_e = tempo_e - tempoRef_e;
ds_e = contEnc_e - contRef_e;
voltas_e = ds_e/2400.0; // Resolucao do encoder * 4

distancia_e = 2.0*3.1416*voltas_e; // rads
velAng_e = distancia_e/dt_e *1000000.0;

tempoRef_e = tempo_e;
contRef_e = contEnc_e;

// Velocidade linear da esteira (Relacao com vel angular do encoder)
velEsteira_e = velAng_e*0.0084*3.6;

// Aplicacao do filtro passa-baixa de Butterworth na velocidade lida
velFiltrada_e = 1.324*velFiltrada_m1_e - 0.5006*velFiltrada_m2_e +
    0.04414*velEsteira_e + 0.08827*velEsteira_m1_e +
    0.04414*velEsteira_m2_e; //Para Ta = 25ms
velFiltrada_m2_e = velFiltrada_m1_e; velFiltrada_m1_e = velFiltrada_e;
velEsteira_m2_e = velEsteira_m1_e; velEsteira_m1_e = velEsteira_e;

// Degrau de Referencia
velRef_e = 1.0;

if ((tempo - tempo_inicio)> 8000000){
    velRef_e = 1.0;
}

// Aplicacao de filtro no degrau de referencia
velRefFiltrada_e = 0.959183673469388*velRefFiltrada_m1_e +
    0.0204081632653061*velRef_e + 0.0204081632653061*velRef_m1_e;

velRefFiltrada_m1_e = velRefFiltrada_e; velRef_m1_e = velRef_e;
```

```
// Erro de rastreamento
erro_e = velRefFiltrada_e - velFiltrada_e;

// Calculo da acao de controle
u_e = u_m1_e*1.93548402705516 - u_m2_e*0.935484027055164 +
      erro_e*1.45176194671467 + erro_m1_e*0.0728785038611698 -
      erro_m2_e*1.3788834428535;// Controlador em funcao das variaveis
u_m2_e = u_m1_e; u_m1_e = u_e; erro_m2_e = erro_m1_e; erro_m1_e = erro_e;

// Saturacao da acao de controle
u_e = min(u_e ,100.0) ;// limitando superiormente
u_e = max(u_e ,0.0) ;// limitando inferiormente

// Velocidade
pwmWrite(pwm_e,255*u_e/100);

while((micros()-tempo) < 25000.0){}
}
```
