

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

VICTOR SAMMARCO DIAS

Modelagem dos sistemas mecânicos de tração e de esterçamento das rodas,
com implementação dos parâmetros nos controladores embarcados (nós
CAN) na Plataforma Robótica RAM

São Carlos

2020

VICTOR SAMMARCO DIAS

Modelagem dos sistemas mecânicos de tração e de esterçamento das rodas, com
implementação dos parâmetros nos controladores embarcados (nós CAN) na
Plataforma Robótica RAM

Monografia apresentada ao Curso de
Engenharia Mecânica, da Escola de
Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo, como parte dos requisitos para
obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Mário Luiz Tronco

São Carlos

2020

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

D541m Dias, Victor Sammarco
 Modelagem dos sistemas mecânicos de tração e de
 esterçamento das rodas, com implementação dos
 parâmetros nos controladores embarcados (nós CAN) na
 Plataforma Robótica RAM / Victor Sammarco Dias;
 orientador Mário Luiz Tronco. São Carlos, 2020.

 Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) --
 Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de
 São Paulo, 2020.

 1. Robô Agrícola Móvel. 2. Modelagem. 3.
 Sistemas de tração e esterçamento. 4. Ackermann. 5.
 Controle no espaço de estados. 6. Controle
 multivariável. 7. CAN. I. Título.

FOLHA DE AVALIAÇÃO

Candidato: Victor Sammarco Dias

Título:

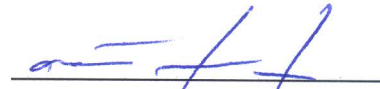
Modelagem dos sistemas mecânicos de tração e de esterçamento das rodas, com implementação dos parâmetros nos controladores embarcados (nós CAN) na Plataforma Robótica RAM

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Escola de Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo
Curso de Engenharia Mecatrônica.

BANCA EXAMINADORA


Professor Mário Luiz Tronco
(Orientador)

Nota atribuída: 10 (Dez)


(assinatura)

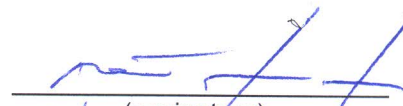
Professora Maira Martins Silva

Nota atribuída: 10 (Dez)


P/ (assinatura)

Prof. Dr. Clayton Torres

Nota atribuída: 10 (Dez)


P/ (assinatura)

Média: 10 (Dez)

Resultado: Aprovado

Data: 08/12/2020.

Este trabalho tem condições de ser hospedado no Portal Digital da Biblioteca da EESC

SIM NÃO Visto do orientador 

DEDICATÓRIA

*A minha família e professores que
sempre incentivaram toda a minha
trajetória de aprendizado. O
conhecimento liberta...*

AGRADECIMENTOS

Ao meu Pai, Celso Dias, pelo incentivo durante a minha infância para o conhecimento e sobre como o estudo transforma vidas e pessoas.

A minha mãe, Sueli Sammarco Dias, por estar sempre forte comigo e demonstrar que estará ao meu lado nos momentos mais incertos da minha vida.

Ao meu irmão, Gustavo Sammarco Dias, por demonstrar que podemos ir sempre mais adiante e sermos fortes unidos como família.

A minha namorada, Juliana Oliveira, por mostrar confiança no meu potencial e orgulho no que realizei com o seu apoio.

A minha família, Sammarco e Dias, por estarem ao meu lado para me apoiar e a quem eu possa me orgulhar de ter nessa caminhada.

Aos meus amigos, por passarem comigo muitos dias com alegria em meio ao caos de estudos e vida social.

Ao meu orientador e professor, Dr. Mário Luiz Tronco, que desde a graduação me confiou responsabilidades e forneceu toda a ajuda necessária para este projeto.

A todos os meus professores do fundamental a Universidade de São Paulo, por serem base de conhecimento, educação e seriedade em um país que pouco se valorizam nossos verdadeiros educadores.

A Alguém lá em cima, a quem eu possa chamar de amigo.

RESUMO

DIAS, V. S. Modelagem dos sistemas mecânicos de tração e de esterçamento das rodas, com implementação dos parâmetros nos controladores embarcados (nós CAN) na Plataforma Robótica RAM. 2020. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020.

Este trabalho trata da modelagem do sistema eletromecânico de tração e de esterçamento das rodas de uma plataforma robótica móvel para uso agrícola - RAM. Com base nas equações referentes à modelagem do sistema foram geradas as funções de transferência de cada sistema e analisada de forma experimental, levando-se em conta a formulação da geometria Ackermann para o esterçamento controlado. Em um segundo momento, gerou-se o modelo computacional a fim de se simular e validar o modelo proposto. A análise de estabilidade do sistema completo foi realizada para se otimizar o funcionamento da tração e esterçamento da Plataforma Robótica RAM. Portanto, em função de dois modelos de controle no espaço de estados e dos resultados obtidos, os sistemas foram otimizados com o controle multivariável para um maior desempenho e estabilização, tornando-os compatíveis às especificações de projeto. Por fim, desenvolveu-se a relação no esterçamento e movimentação entre as quatro rodas do veículo por meio do modelo de Ackermann e, assim, tornou-se possível à correlação de movimentos em conjunto ao modelo de controle ótimo para a implementação aos controladores embarcados (nós CAN) da Plataforma Robótica.

Palavras-chave: Robô Agrícola Móvel, Modelagem, Sistemas de tração e esterçamento, Ackermann, Controle no espaço de estados, Controle multivariável, CAN.

ABSTRACT

Dias, V. S. **Modeling and design of the traction and steering control system of the mobile agricultural Robotic Platform RAM.** 2020. Thesis (Undergraduate Thesis) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020.

This article approaches the modeling of the electromechanical system of traction and steering of a mobile robotic platform for agricultural purpose - RAM. Based on the system modeling equations, the transfer functions of each system were generated and analyzed experimentally, considering the Ackermann geometry for controlled steering. In a second stage, the computational model was generated in order to simulate and validate the proposed model. The stability analysis of the complete system was performed to optimize the process of traction and steering of the RAM Robotic Platform. Therefore, based on two control models in the state-space and the results obtained, the systems were optimized with the multivariable control and stabilized, making them compatible with the design specifications. Finally, the relation of steering and movements between the four wheels of the vehicle was developed using the Ackermann model and it correlated movements with the optimal control model to the implementation in the embedded controllers (CAN nodes) of the Robotic Platform.

Keywords: Mobile agricultural robot, Modelling, Traction and steering systems, Ackermann, State-space control, Multivariable control, CAN.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Trator autônomo.....	21
Figura 2 - Savage, veículo autônomo de apoio para agricultura.....	22
Figura 3 - BoniRob	23
Figura 4 - Robô Agrícola Móvel	24
Figura 5 - Robô Agrícola Móvel (RAM), detalhe do módulo da roda dianteira e sistema de propulsão e guiagem.....	25
Figura 6 - Arquitetura do Robô Agrícola Móvel	26
Figura 7 - Diagrama esquemático e vista frontal do ECU CAN.....	26
Figura 8 - Fluxograma do sistema de controle do Robô Agrícola Móvel	27
Figura 9 - (a) Modelo físico para circuito RC; (b) Aplicação das leis físicas ao circuito RC.....	29
Figura 10 - (a) Diagrama de blocos do circuito RC; (b) Função de transferência do circuito RC.....	29
Figura 11 - Diagrama de blocos para o sistema de controle PID	31
Figura 12 - Análise do ganho proporcional no domínio do tempo	31
Figura 13 - Transformação geral função transferência para forma canônica controlável.....	32
Figura 14 - Obtenção matriz de controlabilidade	33
Figura 15 - Controle de sistema no espaço de estados.....	34
Figura 16 - Fórmula de Ackermann para matriz de ganho K.....	34
Figura 17 - Análise estabilidade pelo Lugar das Raízes	35
Figura 18 - Geometria de Ackermann adaptado de (RAJAMANI, 2006)	36
Figura 19 - Veículo autônomo RAM	38
Figura 20 - Modelo em 3D do Veículo autônomo RAM, desenvolvido no ambiente Solid Edge.....	39
Figura 21 - Sistemas de tração e esterçamento do RAM	40
Figura 22 - Sistema de esterçamento do RAM.....	41
Figura 23 - Sistema esterçamento do RAM (no ambiente Solid Edge)	41
Figura 24 - Motor Maxon DC.....	42
Figura 25 - Motor Maxon plotado no Solid Edge	42
Figura 26 - Diagrama de blocos motor Maxon.....	43
Figura 27 - Redutor Maxon montado no chassi do RAM	44
Figura 28 - Representação 3D do Redutor Maxon, em ambiente Solid Edge.....	45
Figura 29 - Diagrama de blocos conjunto motor-redutor esterçamento	45
Figura 30 - Modelo físico redutor Maxon	46
Figura 31 - Diagrama de blocos sistema esterçamento RAM	47
Figura 32 - Sistema de tração do RAM.....	47
Figura 33 - Motor Bosch.....	48
Figura 34 - Diagrama de blocos para o motor Bosch	48
Figura 35 - Redutor Macopema	49
Figura 36 - Modelo 3D do Redutor Macopema, no ambiente Solid Edge	50
Figura 37 - Diagrama de blocos do sistema motor-redutor da tração do RAM.....	50
Figura 38 - Modelo físico utilizado para o redutor Macopema	51
Figura 39 - Sistema coroa-corrente-pinhão do RAM	52
Figura 40 - Coroa e pinhão plotados no Solid Edge	52

Figura 41 - Diagrama de blocos da parte motor-redutor em conjunto a coroa-corrente-pinhão da tração	53
Figura 42 - Modelo físico adotado para o sistema coroa-corrente-pinhão	53
Figura 43 - Diagrama de blocos de todo o sistema de tração do veículo RAM.....	54
Figura 44 - Diagrama de blocos de todo o sistema de tração do veículo RAM.....	54
Figura 45 - Modelo da geometria de Ackermann aplicada ao RAM, adaptado (RAJAMANI, 2006)	56
Figura 46 - Montagem experimental da validação do modelo de esterço	59
Figura 47 - Conjunto encoder, motor e redutor na validação do modelo de esterço	60
Figura 48 - Vista ampla do experimento de validação do modelo de esterço.....	60
Figura 49 - Gráfico dos dados experimentais de esterço no Excel.....	61
Figura 50 - Montagem da simulação do modelo teórico no Simulink	62
Figura 51 - Resultado da experimentação real comparado à simulação do modelo no Simulink.....	62
Figura 52 - Gráfico fornecido pelo datasheet do motor Bosch.....	63
Figura 53 - Esquema do levantamento da constante de tempo do motor.....	64
Figura 54 - Montagem experimental para obtenção da constante de tempo do motor Bosch	65
Figura 55 - Medida do tempo em transitório para o motor	65
Figura 56 - Montagem experimental da validação do modelo de tração.....	68
Figura 57 - Vista ampla do experimento de validação do modelo de tração	69
Figura 58 - Gráfico dos dados experimentais da tração no Excel	69
Figura 59 - Montagem da simulação do modelo teórico da tração no Simulink	70
Figura 60 - Comparação da experimentação real com a simulação do modelo no Simulink	70
Figura 61 - Gráfico do lugar das raízes da função Ester2(s)	73
Figura 62 - Alocação de polos J1 no sistema dado por Ester2(s)	74
Figura 63 - Alocação de polos J2 no sistema dado por Ester2(s)	75
Figura 64 - Alocação de polos J3 no sistema dado por Ester2(s)	76
Figura 65 - Gráfico do lugar das raízes de Tracao2(s) no Matlab.....	79
Figura 66 - Alocação de polos J4 no sistema dado por Ester2(s)	80
Figura 67 - Alocação de polos J5 no sistema dado por Ester2(s)	80
Figura 68 - Alocação de polos J6 no sistema dado por Ester2(s)	81
Figura 69 - Gráfico dos ângulos de esterçamento e rotação do RAM em função do raio de curvatura R da trajetória.....	82
Figura 70 - Gráfico da velocidade angular de cada roda do RAM em função do raio de curvatura R da trajetória	84
Figura 71 - Estrutura de Controle do RAM	85
Figura 72 - Configuração dos Controladores.....	87
Figura 73 - Estrutura de atuação do controlador.....	88

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1. Considerações iniciais	17
1.2. Objetivos	18
1.3. Estrutura do trabalho	19
2. REVISÃO DA LITERATURA	20
2.1. Robótica móvel na agricultura de precisão	20
2.2. Modelagem e sistemas de controle	27
2.3. Estudo de estabilidade do sistema modelado	30
2.4. Sistema de controle no espaço de estados com o controle multivariável	33
2.5. Geometria de Ackermann	36
3. METODOLOGIA.....	38
3.1. Modelagem dos sistemas de tração e esterçamento	38
3.1.1. Modelo de Esterçamento	40
3.1.2. Modelo de Tração	47
3.2. Validação dos modelos de tração e esterçamento	55
3.3. Método para a geometria de Ackermann.....	55
4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS	57
4.1. Modelagem do esterçamento.....	57
4.1.1. Modelagem do motor de esterçamento.....	57
4.1.2. Modelagem do redutor de esterçamento.....	58
4.2. Validação da modelagem de esterçamento.....	58
4.3. Modelagem da tração	63
4.3.1. Modelagem do motor de tração	63
4.3.2. Modelagem do redutor de tração.....	66
4.3.3. Modelagem da corrente, pinhão e coroa de tração	67
4.4. Validação da modelagem da tração	67
4.5. Projeto do controlador dos sistemas de tração e esterçamento.....	71
4.5.1. Controlador do esterçamento.....	71
4.5.2. Controlador da tração	77
4.6. Implementação da geometria de Ackermann.....	82
4.7. Implementação dos controladores do RAM	85
5. CONCLUSÕES.....	90
REFERÊNCIAS.....	91

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações iniciais

A Plataforma RAM, desenvolvida no NEPAS como um protótipo de veículo agrícola para uso em aplicações de sensoriamento de algumas culturas, demonstrou, após alguns anos de experimentos, deficiências no que diz respeito ao controle de esterçamento e de velocidade de deslocamento.

A principal causa destas deficiências está relacionada com a relativa simplicidade de seu sistema de controle, o qual foi implementado, inicialmente, para conduzir o veículo em baixíssimas velocidades e com capacidade limitada de realização de curvas. Recentemente, sua estrutura de controle passou por uma completa remodelagem e atualização, conduzida pelo Prof. Mário Luiz Tronco, com o objetivo de dotá-la com um sistema capaz de desenvolver maiores velocidades de deslocamento, sem prejuízo de sua estabilidade, com capacidades melhoradas de controle de esterçamento, de aceleração e de estabilidade. Nesta nova estrutura, que vem sendo implementada com os conceitos de sistema distribuído, baseado em nós de Rede CAN (Controller Area Network), faz-se necessário o levantamento de parâmetros do sistema mecânico para, posteriormente, inseri-los nos controladores que vem sendo implementados.

Esta tarefa envolve um procedimento empírico, experimental, de levantamento dos parâmetros mecânicos e elétricos do sistema de tração e do sistema de esterçamento da plataforma (para definição das funções de transferência dos diversos sistemas motor/redutor/roda). Com os parâmetros obtidos experimentalmente, será possível refinar o algoritmo de controle presente nos controladores individuais (um para cada roda, baseado em nós CAN) e, finalmente, implementar o controle de tração e de esterçamento segundo modelos clássicos (geometria Ackermann para esterçamento e controlador PID para o deslocamento da plataforma).

Para que a Plataforma RAM possa ser devidamente controlada, dentro da nova filosofia de controle, de acordo com a Geometria Ackermann, experimentos devem ser realizados para levantamento dos parâmetros do sistema mecânico associado a cada roda (levantamento da função de transferência de cada sistema motor/redutor/roda) e, conseqüentemente, para definição dos ganhos a serem inseridos nos controladores PID (para o

controle dos motores relacionados com o controle de velocidade de tração e dos motores relacionados com o controle de posição - ângulo de esterçamento - para os motores de guiagem) do robô móvel, visto que este ainda apresenta um esterçamento não eficaz e um sistema ineficiente para lidar com variações externas relativas ao terreno onde deve se deslocar. Os tempos de amostragem dos controladores PID também devem ser definidos empiricamente.

A definição dos ganhos adequados e dos tempos de amostragem permite uma partida suave dos motores, resultando em deslocamento e esterçamento controlado, de acordo com as instruções de controle recebidas via rede CAN.

O problema principal relacionado com a definição dos ganhos e tempos de amostragem dos controladores PID da Plataforma RAM está relacionado com a modelagem do sistema mecânico de transmissão e do sistema mecânico de esterçamento das rodas, objetos do presente projeto.

Desta forma, o presente projeto envolve, além do levantamento experimental dos parâmetros citados, a implementação dos algoritmos de controle em cada nó CAN individual responsável pelo acionamento das rodas.

1.2. Objetivos

Os objetivos do presente projeto contemplam a modelagem do sistema mecânico de tração e do sistema mecânico de esterçamento das rodas da Plataforma RAM, utilizando conceitos da Teoria de Sistemas de Controle, para adequação dos parâmetros que serão implementados nos algoritmos de controle presentes nos nós CAN responsáveis pelo controle de cada roda individual da Plataforma, assim para uso no algoritmo responsável pela implementação da geometria Ackermann de seu deslocamento.

Com a definição dos modelos, o procedimento de alocação de polos, posteriores simulações serão realizadas e, após isso, no software Simulink, de modo comparativo para aquisição de conhecimento e definição dos valores ideais para os ganhos e tempos de amostragem dos controladores PID de cada roda da plataforma.

De posse destes dados ótimos para o controle em conjunto às relações desenvolvidas na metodologia de Ackermann, os modelos são aplicados aos controladores embarcado da Plataforma Robótica RAM.

1.3. Estrutura do trabalho

O presente documento foi estruturado em capítulos, descritos a seguir.

No capítulo 2 é mostrada uma revisão da literatura pertinente, mostrando os principais trabalhos relacionados com o tema tratado no projeto.

No capítulo 3 define-se o desenvolvimento da modelagem dos sistemas de controle e sua estruturação é segmentada em esterçamento e tração. Além disso, apresenta-se a proposta para validação dos modelos. Por fim, o modelo de Ackermann é aplicado e especificado para o Robô Autônomo do trabalho.

No capítulo 4 os métodos desenvolvidos no capítulo 3 são aplicados para os valores experimentais e dados obtidos a partir de documentações dos equipamentos dos sistemas. A partir da modelagem aplicada para o RAM, o estudo do controlador multivariável no espaço de estados é realizado. Ademais, os valores da plataforma Robótica são aplicados ao modelo de Ackermann e seus valores analisados.

No capítulo 5 as considerações finais são realizadas e as conclusões sobre o estudo são determinadas.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Robótica móvel na agricultura de precisão

Com a necessidade crescente de aumento da produção agrícola mundial, e tendo como condição a mínima degradação do planeta, uma das alternativas que vem se tornando viável é a implementação da Agricultura de Precisão (AP) a qual visa obter uma produtividade maior na mesma área de plantio, com redução do impacto ambiental (SORENSEN et al., 2011).

A Agricultura de Precisão pode ser definida como um conjunto de tecnologias e procedimentos empregados para otimizar o sistema de produção agrícola, considerando-se como elemento principal o gerenciamento da variabilidade espacial da produção e de fatores relacionados (MOLIN, 2001). Neste contexto, o emprego da tecnologia, um bom planejamento e ferramentas de gerenciamento acabam sendo fatores fundamentais. Dentre eles, a automação de máquinas e equipamentos, de sistemas e o uso da tecnologia de informação que se faz presente em outros segmentos como, por exemplo, na indústria, na aviação comercial, entre outros, encontram-se cada vez mais presentes no setor agrícola, motivando as pesquisas relacionadas à Agricultura de Precisão nacional.

Neste contexto, uma área de grande interesse é aquela voltada para o desenvolvimento de robôs autônomos e semi-autônomos que atuem de forma programada e com características de sensoriamento e atuação no solo.

Na literatura científica existem diversas definições sobre a robótica móvel, porém, o presente trabalho destaca uma em especial, a qual define um robô móvel como:

“... um dispositivo mecânico montado sobre uma base instável, controlado por um sistema computacional e que possui sensores e atuadores, os quais consentem a sua interatividade com o ambiente...” (MARCHI, 2001; BEKEY, 2005).

Os Robôs móveis, em grande parte, possuem características particulares que os habilitam para execução de determinadas tarefas, sendo que a princípio, é a própria tarefa que determina o tipo de estrutura construtiva do robô. Esse é um fator importante a ser considerado para sua concepção, determinando as suas características construtivas, os tipos de controle e suas funcionalidades, as quais estão diretamente relacionadas com a robótica agrícola móvel.

Na literatura técnica da área, diversos protótipos vêm sendo apresentados, cobrindo diversas aplicações relacionadas à Agricultura de Precisão.

O robô baseado em trator de pequeno porte (GRIEPENTROG et al., 2009) desenvolvido pelo Centre for Precision Farming da University of Copenhagen Orsted – Dinamarca, é uma plataforma equipada com uma ECU (Unidade de Controle Eletrônico), que interage com a maioria dos seus subsistemas, de modo a controlar suas funções básicas, incluindo o controle do esterçamento das rodas dianteiras, através de sistema hidráulico, controle da aceleração e da velocidade de deslocamento e controle da transmissão (marchas). O veículo conta também com um sistema de controle com acesso remoto, possibilitando a operação do trator à distância. O trator conta com um barramento CAN (Controler Area Network) integrando as unidades de controle (deslocamento e esterçamento de rodas) e de sensoriamento (GPS, laser, visão computacional).

A plataforma descrita pode ser vista na Figura 1.

Figura 1 - Trator autônomo



Fonte: Griepentrog et al. (2009).

A plataforma Savage (SAVAGE, 2013) é um veículo autônomo de suporte para a agricultura. Seu projeto teve início em 2006, na Universidade de Thessaly, Grécia.

O veículo é baseado em uma plataforma mecânica robusta e uma unidade de controle inteligente e eficiente. O objetivo do projeto foi o desenvolvimento de uma plataforma para uso geral, baseada em uma arquitetura aberta, capaz de hospedar diferentes subsistemas a fim de desempenhar diversas tarefas em campo durante um período equivalente a 60% do crescimento da planta. Uma plataforma flexível e de baixo custo, desenvolvida para realizar uma variedade de tarefas e cuidados agrícolas. O Savage oferece a ação do cuidado agrícola

dentro dos limites de cada planta de forma independente, trabalhando em conjunto com as tendências atuais de Agricultura de Precisão.

Possui quatro módulos independentes de locomoção. Cada módulo possui dois motores de corrente contínua, um utilizado na locomoção e outro na guiagem. Além disso, cada módulo hospeda seus módulos eletromecânicos e eletrônicos, necessários para o controle das unidades de propulsão e de guiagem. Toda inteligência de alto nível e as unidades de fornecimento de energia estão alojados na parte principal da construção. A plataforma é capaz de transportar uma carga adicional máxima de 40 kg, sem graves consequências no desempenho, garantindo o acondicionamento de equipamento adicional necessário para execução de diversas tarefas agrícolas. O módulo de inteligência do robô é a sua unidade principal de controle é baseada em um computador industrial (PC/104) e nos módulos de sensoriamento crítico, os quais proporcionam capacidades básicas de navegação, sendo realizados, por exemplo, por GPS, Bússola, entre outros. Na Figura 2 é mostrada a plataforma robótica Savage.

Figura 2 - Savage, veículo autônomo de apoio para agricultura



Fonte: Savage (2013).

Outra plataforma agrícola, o robô BoniRob (KLOSE et al., 2010), é composta por sensores de telemetria a laser, câmeras 3D, um sistema de imagem espectral e um sistema de GPS-RTK. Os dados provenientes da integração desses sensores são armazenados e comparados com a localização e o tempo decorrido entre as leituras. Desta forma, eles podem ser atribuídos às plantas individualmente e em diferentes momentos.

O BoniRob está equipado com um chassis complexo, sendo a largura de faixa e a altura do robô ajustáveis, o que lhe permite adaptar-se às diferentes situações encontradas no campo, tais como o espaçamento de linha ou a altura da planta. Esses ajustes permitem ao robô acompanhar larguras de 0,75 m a 2 m e uma altura do solo que pode variar de 0,4 m a 0,8 m. O BoniRob também possui um sistema de guiagem independente, onde cada roda pode ser movimentada individualmente, permitindo boa mobilidade nas manobras de campo. Também, possui uma série de equipamentos e sensores embarcados. Entre eles, um computador industrial, redes de comunicação Ethernet / CAN e Wireless, telemetria laser 2D e 3D, sensores de aceleração e de ultrassom, Giroscópio, RTK-DGPS, entre outros. O BoniRob pode ser visto na Figura 3 e os detalhes de construção, assim como toda parte de comando e sensoriamento do BoniRob tem como base os artigos de Klose (KLOSE et al., 2010), Ruckelsahusen (RUCKELSHAUSEN et al., 2009) e Weiss (WEISS; BIBER, 2009).

Figura 3 - BoniRob



Fonte: Klose et al. (2010).

2.1 Plataforma robótica RAM

No âmbito do NEPAS (Núcleo de Ensino e Pesquisa em Automação e Simulação do Departamento de Engenharia Mecânica - EESC – USP) vem sendo desenvolvida uma Plataforma de Robô Agrícola Móvel (RAM), a qual tem por objetivo apoiar atividades de desenvolvimento de uma competência nacional e interdisciplinar em robótica agrícola, baseado no desenvolvimento de um robô agrícola móvel, promovendo e fomentando o

desenvolvimento da tecnologia no país no tema amplo que é o de automação e mecanização agrícola.

A Plataforma RAM, em sua primeira versão, pode ser vista na Figura 4.

Figura 4 - Robô Agrícola Móvel



Fonte: Freitas (2008).

A plataforma possui robustez mecânica, associada à flexibilidade de ajuste da largura entre-rodas, permitindo seu deslocamento em diversas culturas agrícolas. É equipada com motores de corrente contínua para tração (nas quatro rodas) e direção (nas duas rodas dianteiras). Seu deslocamento é baseado no modelo cinemático da geometria de Ackermann (TORRES et al., 2012). O modelo, em conjunto com o sistema de esterçamento das rodas garante um bom desempenho durante a aquisição de dados em campo. Os modelos em CAD da estrutura do RAM e da configuração dos motores de guiagem e propulsão podem ser vistos na Figura 5.

Figura 5 - Robô Agrícola Móvel (RAM), detalhe do módulo da roda dianteira e sistema de propulsão e guiagem

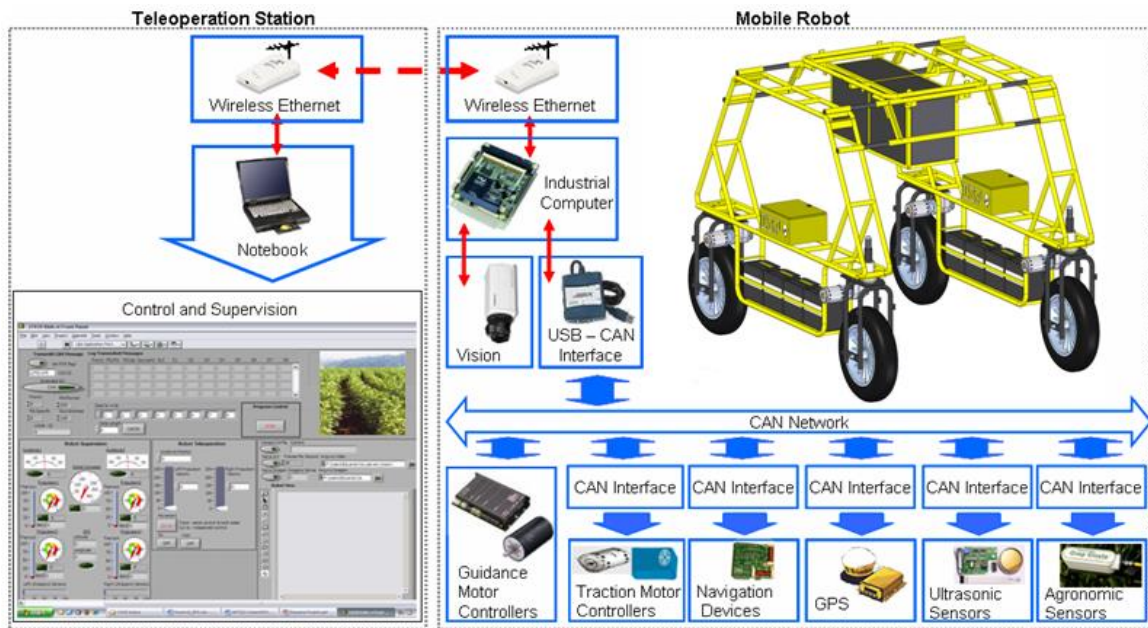


Fonte: Tabile et al. (2011).

Para integração (comunicação em rede, troca de informações e controle) entre os dispositivos eletrônicos presentes na Plataforma RAM, foi implementada uma rede CAN baseada no protocolo ISO11783. A rede desenvolvida não apenas permite a integração dos sensores, atuadores e sistemas computacionais relativos às tarefas de navegação e esterçamento, mas também de dispositivos relacionados à aquisição de dados de variáveis agrícolas, o que eventualmente irá compor o sistema. As controladoras do sistema de direção têm uma interface CAN embutida e estão diretamente ligados à rede. As controladoras do sistema de propulsão usam uma interface CAN, para se comunicar com o resto da rede. Para viabilizar a operação do robô no campo, foi necessário desenvolver uma estação base que tem a função de gerenciar as operações realizadas pelos robôs e receber dados de análises, permitir o planejamento além de controlar e monitorar as tarefas em tempo real via link de comunicação de dados.

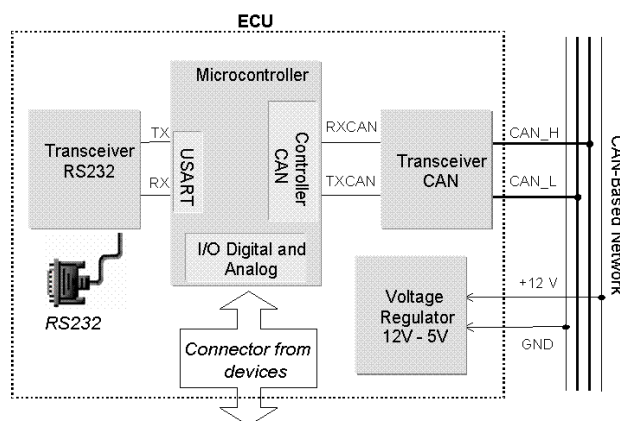
A arquitetura do CAN no robô foi projetada simetricamente entre os lados esquerdo e direito da estrutura (Figura 6), o que permite uma distribuição homogênea do peso, simplifica a construção, reduz o tempo de projeto e custos assim como a quantidade de cabos, e realiza a manutenção dos equipamentos instalados no sistema.

Figura 6 - Arquitetura do Robô Agrícola Móvel



Uma Unidade Eletrônica de Controle (ECU), ou interface CAN, foi usada para integrar estes dispositivos. A Figura 7 apresenta um diagrama esquemático de um ECU padrão com capacidades de comunicação CAN.

Figura 7 - Diagrama esquemático e vista frontal do ECU CAN



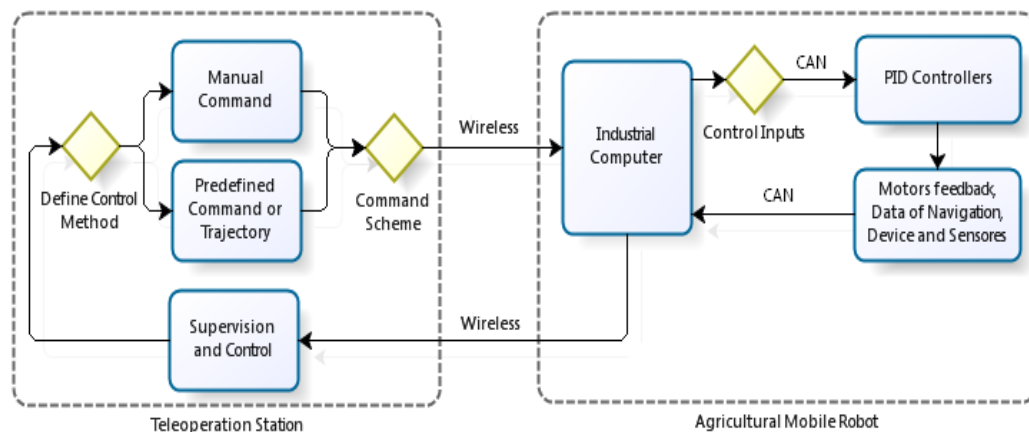
Fonte: Sousa (2002).

A rede CAN desenvolvida não só permite a integração dos sensores, atuadores e sistemas computacionais relacionados com as tarefas de navegação (controladores do motor, GPS, bússola digital, etc.), mas também permite a integração dos dispositivos relacionados à

aquisição de dados das variáveis agrícolas, o que eventualmente irá compor a arquitetura do robô. As informações agrícolas adquiridas com a georreferência (coordenadas de latitude e longitude do GPS) permitem construir mapas de variabilidade espacial.

Na arquitetura desenvolvida, o robô móvel é teleoperado. Uma estação de teleoperação, mostrada na Figura 7 tem a função de administrar as operações realizadas pelo robô, permitindo que operações de planejamento, controle e monitoração aconteçam em tempo real por meio de uma rede ethernet sem fio. Uma antena omnidirecional permite comunicação de dados e teleoperação da plataforma. A Figura 8, a seguir, mostra o esquema de controle da plataforma.

Figura 8 - Fluxograma do sistema de controle do Robô Agrícola Móvel



Fonte: Tabile et al. (2011).

2.2. Modelagem e sistemas de controle

Segundo as teorias de controle clássicas (OGATA, 2011) um sistema de controle pode ser definido como um sistema que relacione e compare uma saída e uma entrada de referência. Se este sistema utilizar a diferença entre os sinais esperados (de referência) e os sinais reais (amostrados na saída do sistema) como um meio para controlar seu comportamento global, poderá ser denominado sistema de controle com realimentação.

Os sistemas de controle também podem ser divididos em dois grandes grupos: os sistemas em malha aberta, nos quais o sinal de saída não influencia a nova entrada que será fornecida ao sistema; e os sistemas em malha fechada, nos quais a diferença entre o sinal de

entrada e o sinal realimentado pelo sistema gerarão um erro que atuará ativamente no controle do sistema e, assim, são denominados, na prática, como sistemas com realimentação.

Portanto, em sistemas que se necessite de uma alta precisão, opta-se, normalmente, por sistemas em malha fechada, pois se controla de modo apurado mesmo em situações sujeitas a distúrbios. Por outro lado, estes sistemas necessitam de um estudo mais detalhado de sua estabilidade, visto que estes podem corrigir sinais errôneos de modo demasiado e, por consequência, gerar prejuízos ao sistema.

Para se estudar estes sistemas de um modo mais aprofundado, recorre-se à análise de suas funções de transferência que relacionam a entrada e saída do sistema por meio do uso das transformadas de Laplace.

A fim de se reconhecer esta função de transferência, pode-se, inicialmente, ter um modelo do sistema a ser estudado, ou conforme aplicado aos modelos dos motores apresentados nesse estudo pode-se recorrer a modelar o sistema a partir dos parâmetros e dados que se encontram já desenvolvidos e de fácil acesso. Este modelo dever-se-á ser validado em uma análise final da modelagem e, portanto, realizar os ajustes necessários nas hipóteses assumidas. Este modelo é definido (FELICIO, 2010) como uma simplificação, baseada em hipóteses estudadas, do sistema natural para que sua análise ocorra, posteriormente, de modo facilitado.

Após se estabelecer este modelo físico, utiliza-se das leis fundamentais da física aplicadas ao modelo para a obtenção de um conjunto de equações diferenciais ordinárias que representem satisfatoriamente a dinâmica do sistema real.

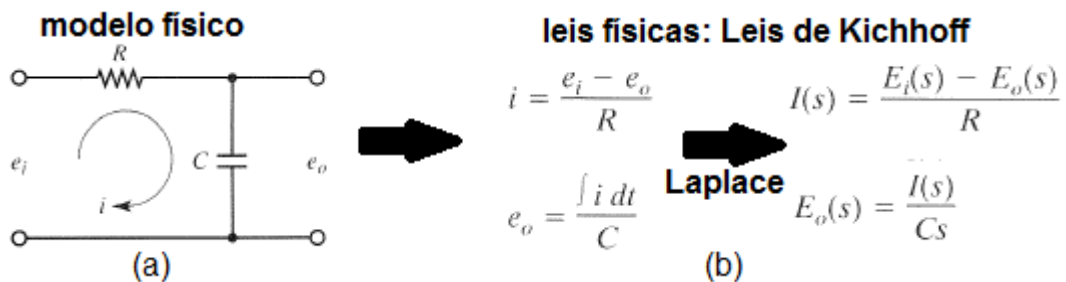
Todo esse processo de obtenção de um modelo físico baseado em hipóteses simplificadoras e, posterior obtenção de equações diferenciais ordinárias a partir das leis da física e que representem a dinâmica do sistema satisfatoriamente, pode ser nomeado como modelagem. Nesta modelagem, normalmente, faz-se necessário ajustes nas hipóteses iniciais e, assim, uma nova modelagem matemática para que esta represente o sistema de um modo real.

Após se realizar a modelagem, utiliza-se de diagramas de blocos para se obter as funções de transferência do sistema de uma forma mais clara e que, assim, reduza-se a probabilidade de interpretações errôneas. Esses diagramas de blocos consistem (OGATA, 2011) em uma representação das atividades desempenhadas por cada elemento do sistema na forma gráfica. Nos diagramas, observa-se que entre os blocos funcionais há flechas que indicam um fluxo unidimensional de sinais representativos das relações que eles exercem.

Para de se obter a função de transferência do sistema modelado e possuindo-se o diagrama de blocos, utiliza-se de um conjunto de operações denominadas como álgebra de blocos, as quais consistem em operações específicas realizadas entre os blocos construídos e que possuem como finalidade, a simplificação e obtenção de relações em todo o diagrama.

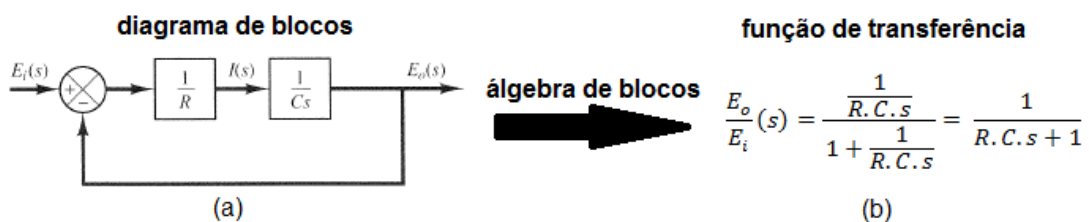
Como exemplo, demonstra-se nas Figuras 9 e 10, a sequência necessária para se obter a função de transferência de um sistema físico. O modelo de um circuito RC é mostrado na Figura 9 (a). Aplicam-se as leis físicas que descrevem o comportamento dinâmico de cada componente do circuito e, posteriormente, a transformada de Laplace, os quais são mostrados na Figura 10 (b). Posteriormente, aplicando-se a Lei de Kirchhoff no circuito RC, obtêm-se o diagrama de blocos mostrado na Figura 10 (a), o qual a partir da álgebra de blocos adequada fornecerá a função de transferência da Figura 10 (b), demonstradas a seguir (OGATA, 2011).

Figura 9 - (a) Modelo físico para circuito RC; (b) Aplicação das leis físicas ao circuito RC



Fonte: Ogata (2011).

Figura 10 - (a) Diagrama de blocos do circuito RC; (b) Função de transferência do circuito RC



Fonte: Ogata (2011).

2.3. Estudo de estabilidade do sistema modelado

Assim, de posse das funções de transferência de interesse no projeto, inicia-se um estudo da estabilidade e desempenho do sistema de controle a fim de se obter um sistema estável em todo o seu funcionamento.

Esta análise é feita em dois domínios: o domínio do tempo, o qual se caracteriza pela análise de funções em tempos contínuos ou discretos; e o domínio da frequência, que se identifica como uma análise da frequência e da defasagem da fase da saída em relação à entrada. Então, nesses dois domínios, existem métodos específicos que são utilizados nos problemas de controle e estão presentes nas principais literaturas da área.

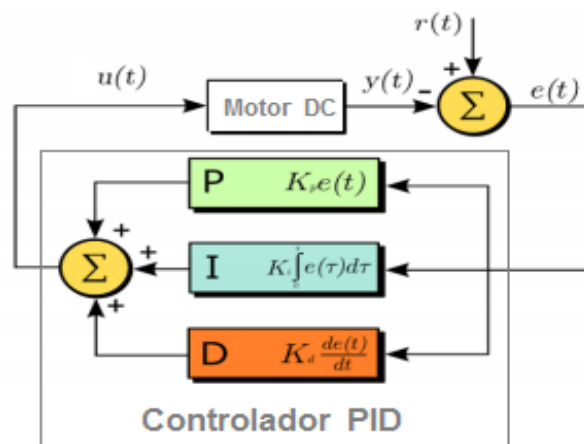
Além disso, para se realizar estas análises, comumente, utiliza-se de entradas padrões, sobre as quais se possui um conhecimento amplo de como se comportam e, também, do modo como o sistema deverá se comportar. As três principais entradas padrão utilizadas nestas análises de desempenho são as entradas degrau, rampa e impulso. Outros métodos presentes na literatura também podem ser utilizados para se analisar o desempenho de um sistema, mesmo que estes sejam utilizados majoritariamente no estudo da estabilidade.

Após esta análise minuciosa, obtêm-se ganhos e tempos ótimos, os quais são implementados no controlador do sistema em malha fechada. Observa-se, assim, que com o uso desses ganhos e tempos, o sistema controlado deva funcionar com o desempenho esperado nos parâmetros de projeto e, portanto, seu projeto atuará tal qual planejado.

Para uma análise da estabilidade do sistema, pode-se recorrer a demais métodos como a alocação de polos no espaço de estados, a Nyquist e diversos outros métodos estudados na literatura para que o sistema funcione sem danos causados por um distúrbio e, conseqüente, sem instabilidade.

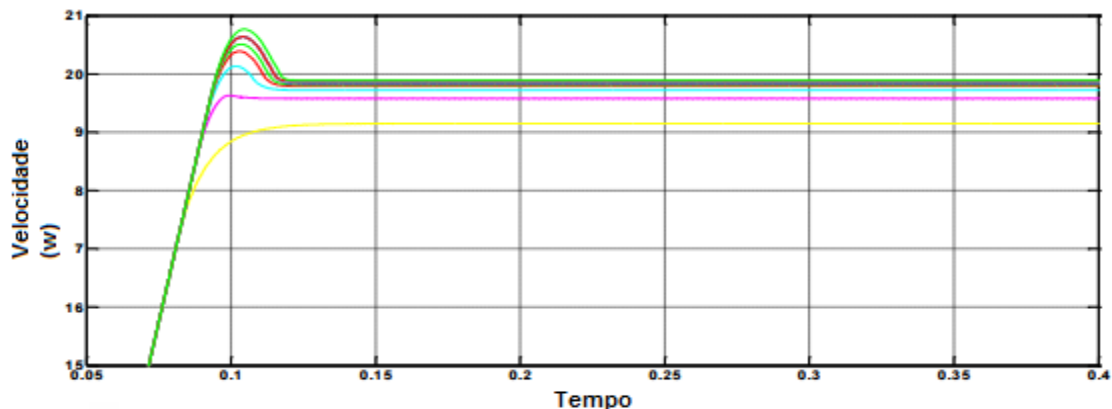
Na Figura 11, a seguir, observa-se um diagrama de blocos para um controlador PID atuando em uma planta composta por um motor de corrente contínua. Através de uma análise no domínio do tempo, consegue-se estimar os ganhos ótimos para o controlador. A análise do ganho proporcional é mostrada na Figura 12, onde se comparam os gráficos de diversos ganhos para o sistema e, calcula-se, aquele que melhor satisfaz o requerido pelo projeto (SINGH et al, 2013).

Figura 11 - Diagrama de blocos para o sistema de controle PID



Fonte: Singh et al. (2013).

Figura 12 - Análise do ganho proporcional no domínio do tempo



Fonte: Singh et al. (2013).

No gráfico acima, observa-se que o ganho proporcional é variado para o sistema de controle e, por consequência, as curvas da velocidade em função do tempo também variam. Então, ao comparar-se a curva verde com a rosa, por exemplo, observa-se que para que a rosa atinja sua estabilidade, ela não sofrerá grandes variações. Já na curva verde, nota-se um pico de velocidade para depois se estabilizar. Então, percebe-se que a escolha do ganho proporcional implícito na curva rosa seria mais satisfatória para o projeto obter seu êxito. Esta metodologia, normalmente é empírica, já que envolve a sintonia do controlador, em conjunto com a planta. De posse da função de transferência da planta, é possível realizar a simulação do comportamento do sistema em relação ao tempo, como mostrado anteriormente, assim como prever sua estabilidade, em função da análise em frequência (polos e zeros).

A partir do cálculo da função transferência da planta requisitada para ser controlada, deve-se projetar o controlador que manterá o sistema estável e com ótimo desempenho em seu funcionamento.

Portanto, para se realizar o controle multivariável do sistema, propõe-se a análise do sistema de controle no espaço de estados, isto é, utiliza-se da função de transferência modelada para se determinar o comportamento do sistema em cada ponto do tempo. Para isso, representa-se a função de transferência por meio de vetores que são denominados vetores de estado, nos quais cada elemento é dito uma variável de estado. Sendo assim, o espaço de dimensão em que esses vetores podem variar são os espaços de estados, que para cada função pode ser exemplificado de maneiras diferentes.

Na imagem abaixo, têm-se a representação de uma função de transferência representada na forma canônica controlável, a qual é a forma que será abordada para o projeto do sistema de controle.

Figura 13 - Transformação geral função transferência para forma canônica controlável

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_0 s^n + b_1 s^{n-1} + \dots + b_{n-1} s + b_n}{s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_{n-1} s + a_n} \rightarrow \begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \vdots \\ \dot{x}_{n-1} \\ \dot{x}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ -a_n & -a_{n-1} & -a_{n-2} & \dots & -a_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{n-1} \\ x_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u \\ y = [b_n - a_n b_0 \quad b_{n-1} - a_{n-1} b_0 \quad \dots \quad b_1 - a_1 b_0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} + b_0 u \end{cases}$$

Fonte: Ogata (2011).

Assim, para se representar a função de transferência que representa um sistema a ser controlado no espaço de estados na forma canônica controlável, o sistema tem que ser dito controlável, ou seja, dado em um tempo t_0 , deverá existir um vetor que seja capaz de transferir o sistema de um estado inicial $x(t_0)$ para outro estado em um tempo finito (OGATA, 2011). De modo análogo, se todo o estado estudado for controlável, então o denomina completamente controlável.

Então, em termos quantitativos, estabelece-se que o sistema no espaço de estados tem como condição de controlabilidade que dado seus vetores tal qual na imagem abaixo, estes devem ser linearmente independentes, e, assim, o estado é completamente controlável.

Figura 14 - Obtenção matriz de controlabilidade

$$\dot{x} = Ax + Bu \Rightarrow [B \mid AB \mid \dots \mid A^{n-1}B]$$

vetores linearmente independentes

Fonte: Ogata (2011).

2.4. Sistema de controle no espaço de estados com o controle multivariável

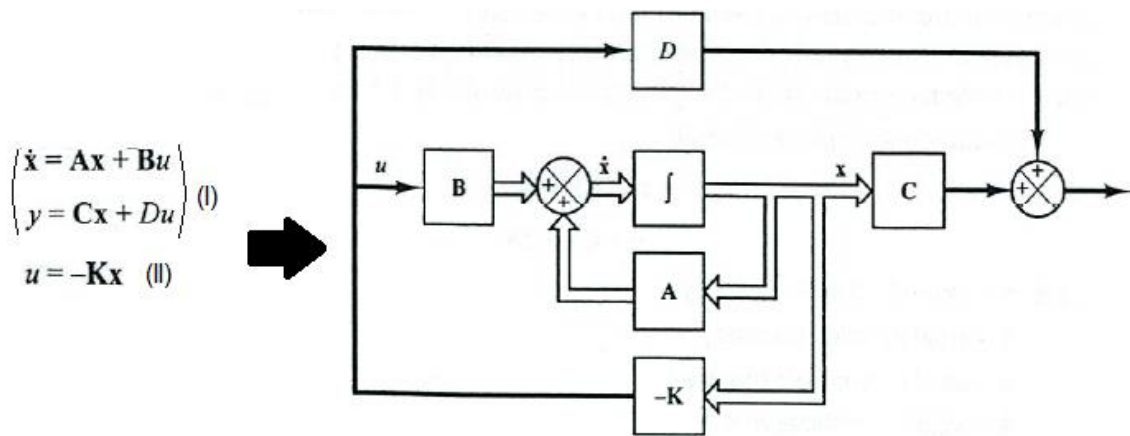
Seguindo-se no espaço de estados, deseja-se projetar o sistema de controle que responda com determinada velocidade, sobressinal, coeficiente de amortecimento ou frequência natural estabelecida pelo projetista. Então, como método de análise estuda-se a alocação de polos.

O método da alocação de polos consiste na ideia de em primeiramente determinar os polos dominantes da malha fechada do sistema de controle e, a partir destes, alocar outros polos no sistema por meio de uma matriz de ganho K que faça o sistema responder do modo requerido. Além disso, para se realizar este procedimento o sistema deve ser completamente controlável, tal qual já estudado anteriormente.

Para se escolher os polos a serem alocados no sistema, leva-se em consideração o lugar das raízes, de modo que se aloque um par de polos dominante de malha fechada e os outros bem distantes à esquerda. Porém, tem-se o cuidado de não alocar o par de polos dominantes muito distantes do eixo imaginário, visto que a resposta pode-se tornar muito rápida, e, assim, tornar o sistema não linear ou instável, o qual é prejudicial.

Na imagem abaixo, observa-se o sistema de controle de malha fechada em que foi introduzida uma matriz de ganho K ou sistema regulador. Nesse sistema, tem-se por objetivo conservar a saída nula. Porém, ao sofrer com distúrbios, a saída não será nula e, por consequência, tenderá ao valor zero referenciado pela entrada do sistema nulo.

Figura 15 - Controle de sistema no espaço de estados



Fonte: Ogata (2011).

Ainda, ao se substituir o item (II) no (I) da imagem acima, resulta-se na equação matricial $\dot{x}(t) = (A - BK)x(t)$, na qual a estabilidade e características do sistema pode-se ser estudado a partir dos autovalores de $(A - BK)$, ou como são ditos, os polos reguladores. Portanto, deve-se escolher a matriz K a fim de que o sistema seja assintoticamente estável e que seja possível $x(t)$ tender a 0 para qualquer tempo “ t ” tendendo ao infinito.

Existem diversos métodos utilizados para o cálculo da matriz K . Para sistemas que possuam apenas uma entrada, pode-se utilizar a fórmula de Ackermann, a qual é vista na imagem a seguir:

Figura 16 - Fórmula de Ackermann para matriz de ganho K

$$K = [0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 1] [B \ | \ AB \ | \ \dots \ | \ A^{n-1}B]^{-1} \phi(A), \text{ onde } \phi(A) = A^n + \alpha_{n-1}A^{n-1} + \dots + \alpha_1 A + \alpha_n I = 0$$

Fonte: Ogata (2011).

A partir da fórmula, deduz-se que o número de valores para a matriz K será igual a “ $nx1$ ” para um sistema de controle que possua uma matriz A “ nxn ”.

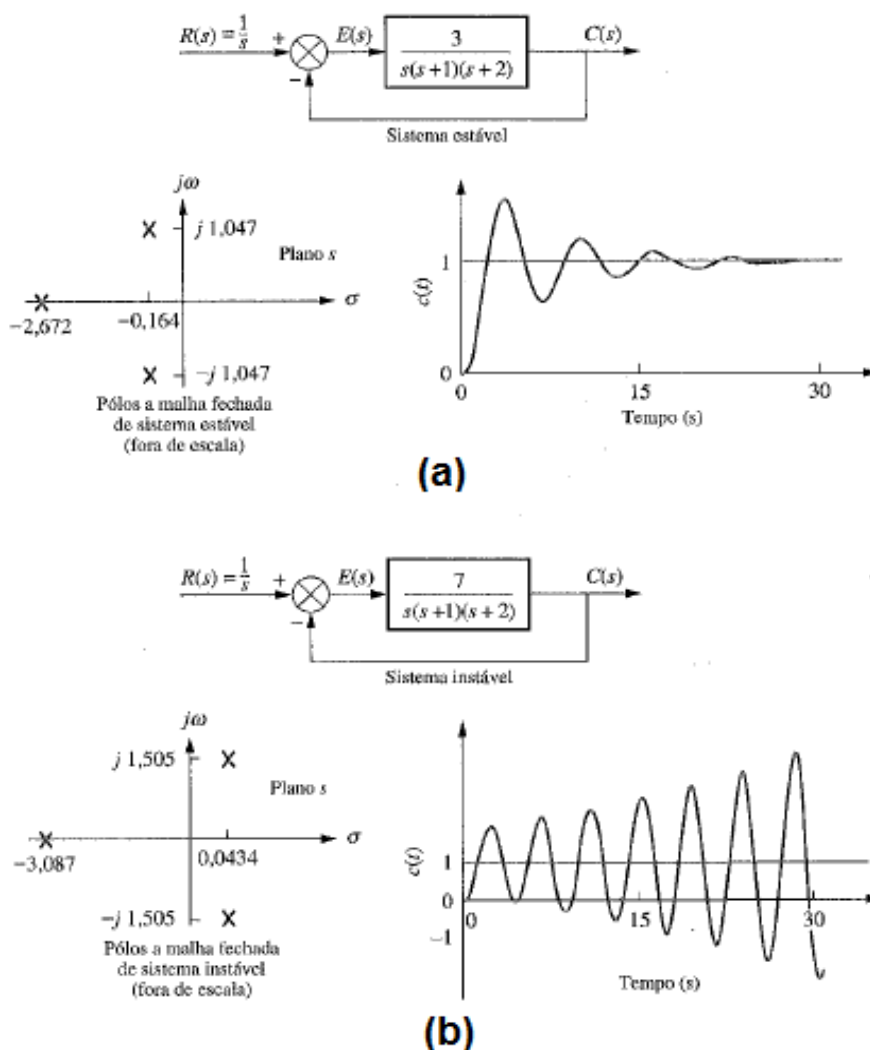
Junto ao projeto do sistema de controle, deve-se analisar sua estabilidade em conjunto a sua resposta transitória, visto que se instável, o sistema em funcionamento poderá sofrer com imprecisões e danos. Então, observa-se que para a análise, deve-se entender que a resposta do sistema consiste na soma de duas respostas, isto é, a soma entre a resposta forçada e sua resposta natural. Conseqüentemente, um sistema será definido como estável se sua

resposta natural tender a zero quando o tempo tender ao infinito. Portanto, devem-se realizar teste para se verificar se o sistema se apresenta instável ou estável.

Pode-se citar o método do Lugar das Raízes, em que se verifica quando que o sistema em malha fechada terá suas raízes no lado esquerdo do plano complexo, ou seja, quando a resposta real do sistema for negativa e, conseqüentemente, sua exponencial tender-se-á a zero com o tempo no infinito.

Na figura a seguir, pode-se verificar o método do Lugar das Raízes sendo aplicado a dois sistemas em malha fechada, sendo (a) estável e o (b) instável. Observa-se também que os gráficos de resposta no tempo a uma entrada degrau unitária exemplificam a diferença entre um sistema estável (amplitude tende a 1) e um sistema instável (amplitude tende ao infinito).

Figura 17 - Análise estabilidade pelo Lugar das Raízes

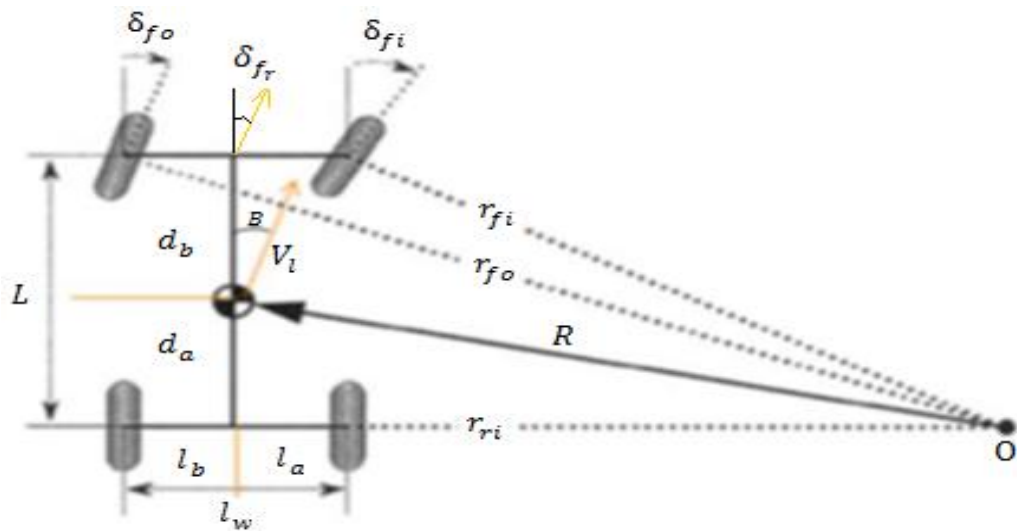


Fonte: Nise (2002).

2.5. Geometria de Ackermann

O modelo da geometria Ackermann clássico é apresentado a seguir, através da Figura 18. Essas equações são utilizadas para definir o modelo de deslocamento da Plataforma RAM.

Figura 18 - Geometria de Ackermann adaptado de (RAJAMANI, 2006)



Fonte: Rajamani (2006).

Considerando R o raio de curvatura, δ_{fi} e δ_{fo} os ângulos de esterçamento das rodas, L o comprimento, l_w ($l_w = l_b + l_a$) a largura e V_l a velocidade de translação do robô, tem-se (TORRES et al., 2012):

$$(l_a + r_{ri})^2 = R^2 - d_a^2 \quad (1)$$

$$r_{ri} = \sqrt{R^2 + d_a^2 - l_a} \quad (2)$$

$$B = \frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \left(\frac{l_a + r_{ri}}{d_a} \right) \quad (3)$$

$$B = \cot^{-1} \left(\frac{l_a + r_{ri}}{d_a} \right) \quad (4)$$

$$B = \cos^{-1} \left(\frac{d_a}{R} \right) \quad (5)$$

$$r_{ro} = r_{ri} + l_a + l_b \quad (6)$$

$$r_{fi} = \sqrt{r_{ri}^2 + (d_a + d_b)^2} \quad (7)$$

$$r_{fo} = \sqrt{(r_{ri} + l_a + l_b)^2 + (d_a + d_b)^2} \quad (8)$$

$$\delta_{fi} = 90^\circ - \tan^{-1} \left(\frac{r_{ri}}{d_a + d_b} \right) \quad (9)$$

$$\delta_{fo} = 90^\circ - \tan^{-1} \left(\frac{r_{ri} + l_a + l_b}{d_a + d_b} \right) \quad (10)$$

$$\delta_{fr} = 90^\circ - \tan^{-1} \left(\frac{r_{ri} + l_a}{d_a + d_b} \right) \quad (11)$$

$$L = d_b + d_a \quad (12)$$

Devido à trajetória percorrida pelo robô em uma curva e o ângulo formado entre linhas passantes pelo centro das rodas de modo paralelas ao movimento destas e a linha que corta verticalmente o veículo da Figura 18 e transpassa o centro de rotação deste, faz-se necessária a existência de um diferencial de velocidade entre cada uma das rodas, evitando dessa forma a ocorrência de um fenômeno conhecido como deslizamento de roda. Esse diferencial é determinado pelas Equações de 11 a 14, onde as variáveis das rodas são respectivamente:

- (w_{fo}) dianteira esquerda; (w_{fi}) dianteira direita; (w_{ro}) traseira esquerda; (w_{ri}) traseira direita.

Equações das velocidades angulares:

$$w_{fo} = \frac{r_{fo}}{r_w} - \frac{V_L}{R} \quad (13)$$

$$w_{fi} = \frac{r_{fi}}{r_w} - \frac{V_L}{R} \quad (14)$$

$$w_{ro} = \frac{r_{ro}}{r_w} - \frac{V_L}{R} \quad (15)$$

$$w_{ri} = \frac{r_{ri}}{r_w} - \frac{V_L}{R} \quad (16)$$

3. METODOLOGIA

Com base na teoria de controle clássica apresentada, o estudo do presente projeto é realizado nas etapas seguintes.

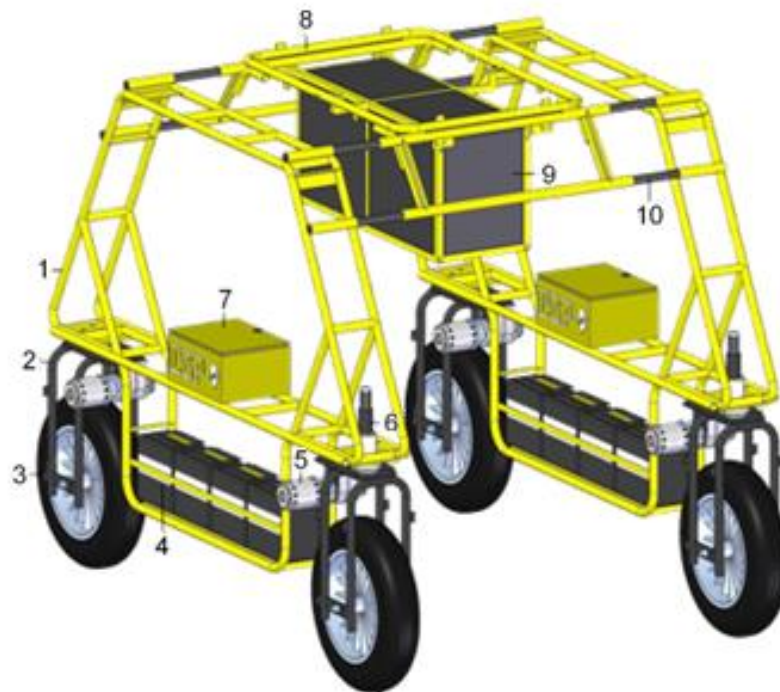
3.1. Modelagem dos sistemas de tração e esterçamento

Como proposto inicialmente, a modelagem deve ser realizada levando-se em conta os sistemas presentes no Robô Agrícola Móvel (RAM), plataforma de desenvolvimento presente no NEPAS (Núcleo de Ensino e Pesquisa em Automação e Simulação – EESC - USP). Nas Figuras 19 e 20, a seguir, é mostrada a plataforma.

Figura 19 - Veículo autônomo RAM



Figura 20 - Modelo em 3D do Veículo autônomo RAM, desenvolvido no ambiente Solid Edge



O foco do trabalho está na modelagem de dois sistemas: sistema de esterçamento e sistema de tração do veículo. Ambos são mostrados na Figura 21, que mostra estes sistemas integrados ao RAM. O sistema de tração está presente nas quatro rodas e o de esterçamento nas duas rodas dianteiras.

Figura 21 - Sistemas de tração e esterçamento do RAM



As modelagens dos sistemas de tração e esterçamento foram realizadas em duas etapas: primeiro, realizou-se a modelagem do sistema de esterçamento do veículo RAM; a seguir, modelou-se todo o sistema de tração do robô. Desta forma, a análise de cada etapa ocorreu de forma distinta. A seguir, os resultados são apresentados e discutidos.

3.1.1. Modelo de Esterçamento

O sistema de esterçamento do veículo autônomo RAM é composto basicamente por motor DC, redutor, encoder, mancal e rolamento, os quais são acoplados aos garfos que ligam este sistema às rodas. Este sistema mecânico pode ser visto na Figura 22, a qual foca a montagem do sistema com seus componentes e, também, na Figura 23, na qual pode ser visto este sistema acoplado ao chassi do robô.

Figura 22 - Sistema de esterçamento do RAM

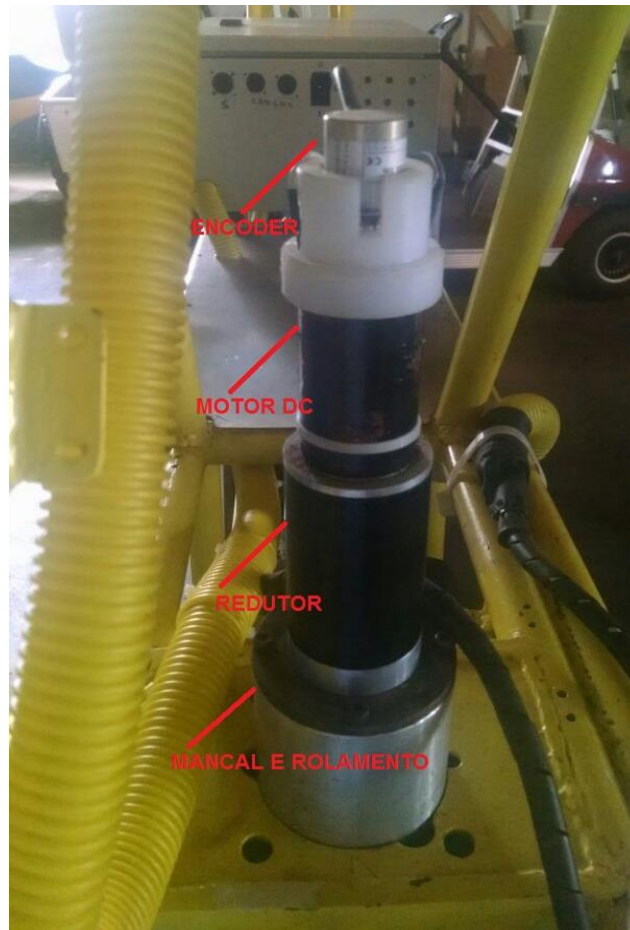
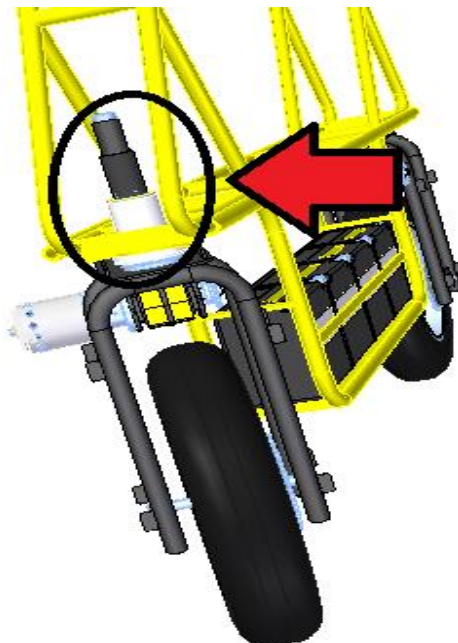


Figura 23 - Sistema esterçamento do RAM (no ambiente Solid Edge)



Para uma análise inicial, assume-se que apenas o motor e o redutor interfiram de modo relevante na função de transferência de todo o sistema de esterçamento do veículo RAM. Estes componentes são modelados a seguir.

Motor

O motor utilizado no sistema de esterçamento do robô é da marca Maxon, de corrente contínua, com escovas, com 150W de potência e tensão nominal de 48V. Tal motor, que será modelado nesta etapa do projeto, pode ser visualizado na Figura 24, acoplado ao RAM e, também, na Figura 25, onde é representado em 3D, desmontado do sistema.

Figura 24 - Motor Maxon DC

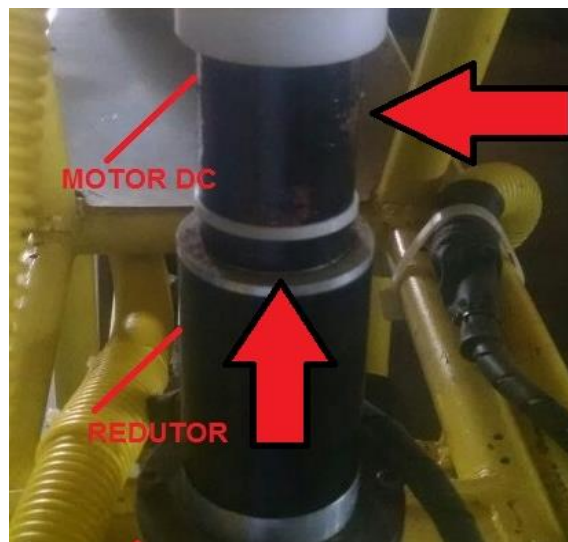
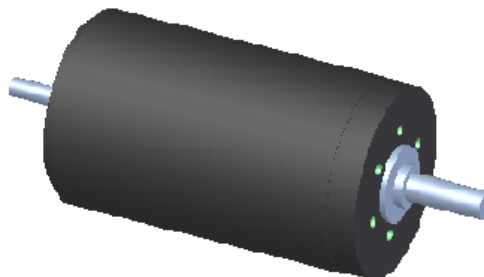
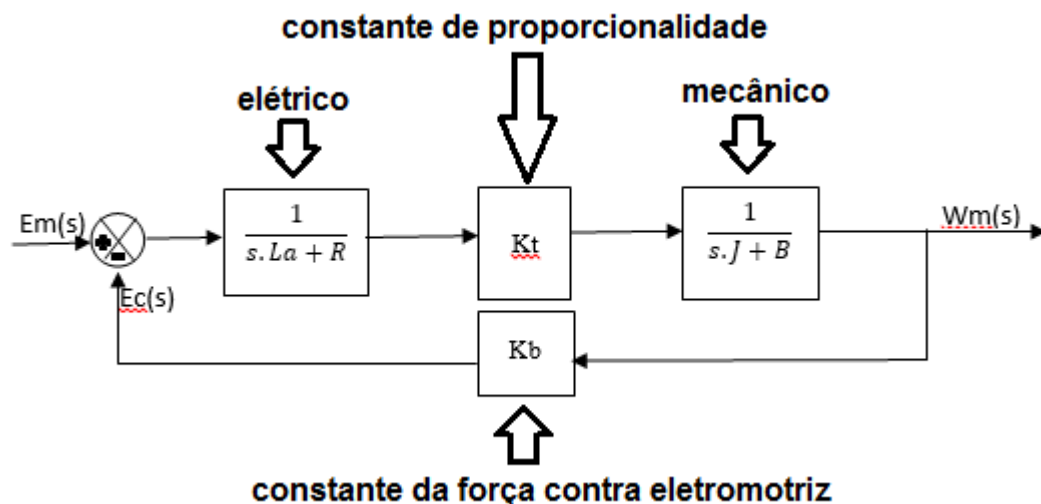


Figura 25 - Motor Maxon plotado no Solid Edge



Seu diagrama de blocos (ROSA; MOMBACH; BREGALDA, 2013) em termos de função de transferência é mostrado na figura seguinte. Neste diagrama propõe-se, primeiramente, um modelo referente à parte elétrica do motor, no qual a resistência e a indutância são fundamentais no motor. Depois, inclui-se uma constante de proporcionalidade entre corrente e torque, a fim de que se possa introduzir uma subsequente parte mecânica do motor a ser modelada. Então, modela-se a parte mecânica do motor e assume-se como influente a inércia e a viscosidade. Por fim, deve-se incluir no diagrama do motor uma constante referente à força contra eletromotriz, isto é, uma tensão que é gerada nos enrolamentos da armadura do motor de corrente contínua e, que, acarreta em uma perda na tensão aplicada ao sistema.

Figura 26 - Diagrama de blocos motor Maxon



Os parâmetros desta função de transferência podem ser descritos como segue:

E_m : tensão fornecida à armadura

E_c : força contra eletromotriz

B : coeficiente de atrito viscoso

J : momento de inércia

L_a : indutância da armadura

R : resistência da armadura

K_t : constante de torque

K_b : constante de força contra eletromotriz

ω_m : velocidade angular de saída

O coeficiente de atrito viscoso, B , pode ser definido como:

$$B = \frac{J}{\tau_1} \quad (17)$$

sendo τ_1 a constante de tempo do motor.

Redutor Maxon

O redutor utilizado para o esterçamento do robô é o Maxon Planetary Gearhead GP 52 C com fator de redução de 1:230. Na Figura 27 pode-se observar seu posicionamento no chassi do RAM e, na Figura 28, sua representação isolada, em modelo 3D.

Figura 27 - Redutor Maxon montado no chassi do RAM

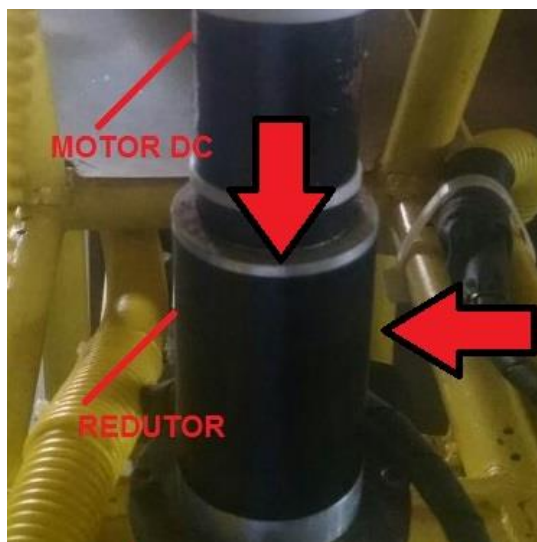
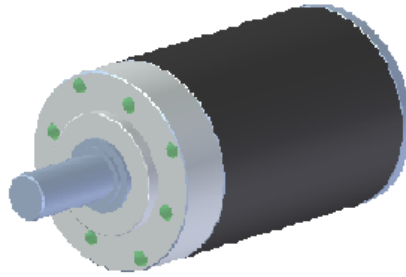
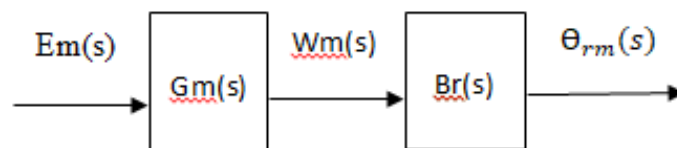


Figura 28 - Representação 3D do Redutor Maxon, em ambiente Solid Edge



O diagrama de blocos, em malha aberta, para o conjunto motor-reductor do sistema de esterçamento, é apresentado na Figura 29.

Figura 29 - Diagrama de blocos conjunto motor-reductor esterçamento



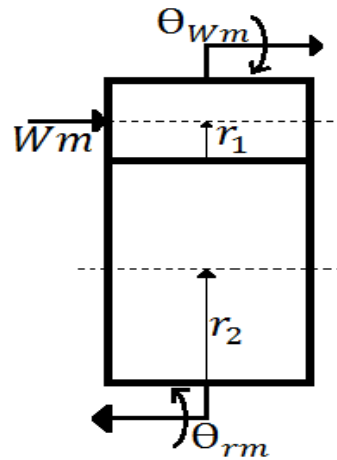
Os parâmetros deste modelo podem ser descritos como segue:

$\Theta_{rm}(s)$: ângulo de saída do reductor

$Br(s)$: função de transferência do reductor

O modelo utilizado para o reductor é apresentado na Figura 30.

Figura 30 - Modelo físico redutor Maxon



Θ_{W_m} : ângulo de saída do motor Maxon referente a sua W_m

r_1 = raio do disco menor

r_2 = raio do disco maior r_2

Portanto, modelou-se o redutor como dois discos em contato, no qual o menor (r_1) recebe a velocidade angular do motor e sofrerá, assim, uma variação angular. Assim, esse disco menor (r_1) transmitirá esse movimento a um disco maior (r_2), o qual terá uma variação angular Θ_{r_m} .

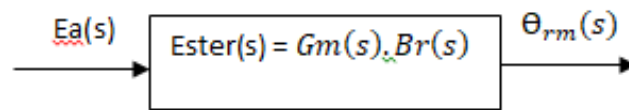
Dessa forma, utiliza-se apenas a relação clássica de rotação entre dois discos para equacionar o problema (VU; ESFANDIARI, 2003), dada por:

$$\frac{\Theta_{r_m}}{\Theta_{W_m}}(s) = \frac{r_1}{r_2} \quad (18)$$

$$B_r(s) = \frac{\Theta_{r_m}}{W_m}(s) = \frac{r_1}{s \cdot r_2} \quad (19)$$

Então, o diagrama de blocos para malha aberta do sistema motor-redutor do sistema de esterçamento será como mostrado na Figura 31.

Figura 31 - Diagrama de blocos sistema esterçamento RAM



Ester(s): função de transferência de todo sistema de esterçamento do veículo RAM

3.1.2. Modelo de Tração

No sistema de tração do veículo autônomo RAM, pode-se considerar como partes principais: encoder, motor DC, mancal, rolamento, redutor, pinhão, corrente, coroa e roda. Estes componentes, montados como sistema de tração, são mostrados na Figura 32.

Figura 32 - Sistema de tração do RAM

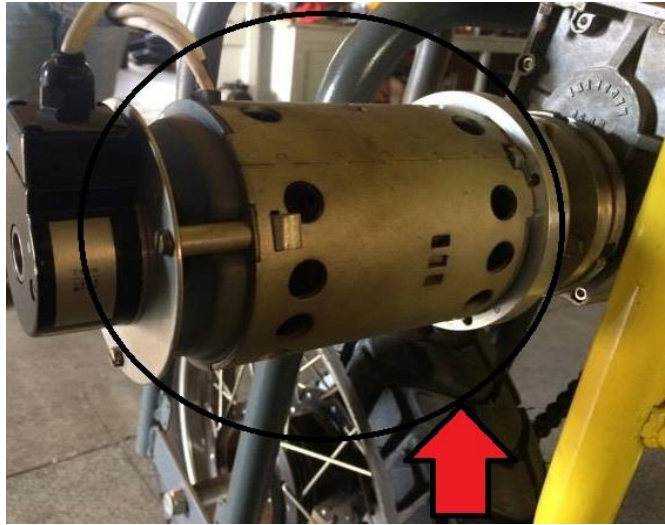


Assume-se, por simplificação, que a tração do robô é descrita por motor, redutor, pinhão, corrente, coroa e roda, pois estes, a princípio, terão uma maior relevância no funcionamento mecânico do sistema.

Motor

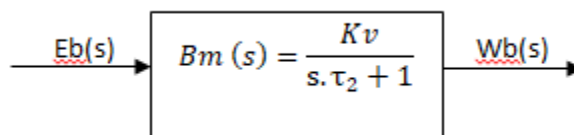
O motor utilizado para a tração na plataforma RAM é da marca Bosch, de corrente contínua, com 750W de potência e 24V de tensão nominal. Na Figura 33 ele é mostrado acoplado ao chassi do RAM.

Figura 33 - Motor Bosch



O motor Bosch, por ser um motor robusto, será modelado como uma função de primeira ordem, no qual sua constante de tempo pode ser calculada a partir do tempo de seu regime transitório e seu ganho determinado por uma constante, a qual é calculada a partir da razão entre a rotação do motor em vazio e sua tensão necessária. Este ganho é calculado considerando-se seus parâmetros em carga aplicada nula, pois neste estado de funcionamento o motor não terá nenhum distúrbio e, assim, o ganho do sistema poderá ser calculado de forma simplificada (ZANATTA; GODOY; PORTO, 2010).

Figura 34 - Diagrama de blocos para o motor Bosch



$E_b(s)$: tensão fornecida à armadura

W_b : velocidade angular de saída

τ_2 : constante de tempo

K_v : constante de velocidade angular

$B_m(s)$: função de transferência

A constante de velocidade angular é dada por:

$$Kv = \frac{No.(\pi/30)}{V} \quad (20)$$

Onde:

n_0 : rotação do motor com carga aplicada nula

Volt: tensão aplicada na obtenção da rotação do motor com carga nula

Redutor

O redutor utilizado no sistema de tração é da marca Macopema, modelo MC 50 Series C105-4, com fator de redução de 1:25. Este redutor é mostrado junto ao chassi do robô na Figura 35 e seu modelo em 3D na Figura 36.

Figura 35 - Redutor Macopema

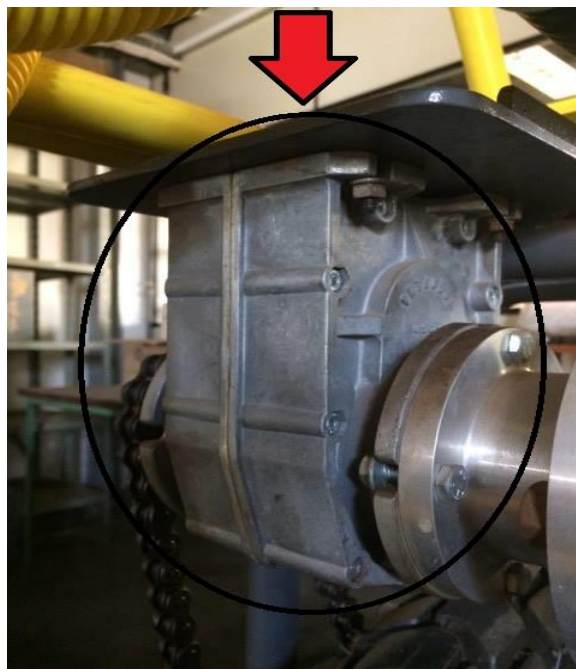
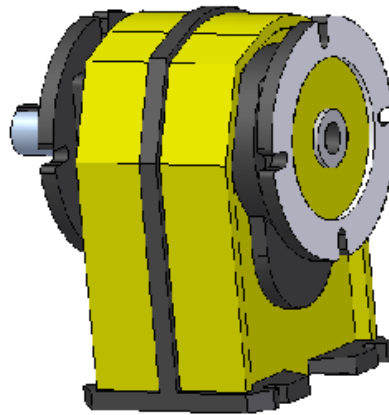
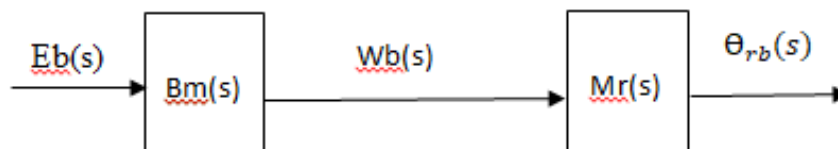


Figura 36 - Modelo 3D do Redutor Macopema, no ambiente Solid Edge



O diagrama de blocos para o conjunto motor-redutor do sistema de tração em malha aberta:

Figura 37 - Diagrama de blocos do sistema motor-redutor da tração do RAM

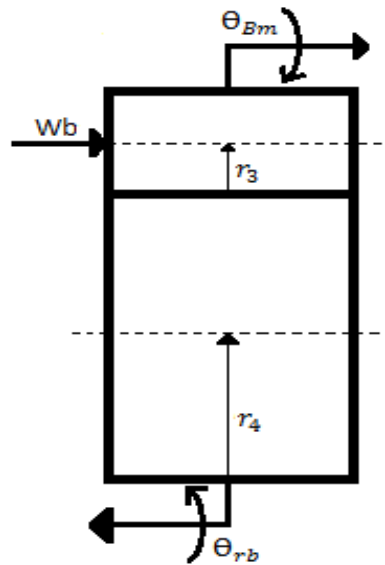


$\Theta_{rb}(s)$: ângulo de saída do redutor Macopem

$M_r(s)$: função de transferência do redutor Macopema

De forma semelhante ao modelo utilizado no conjunto redutor Maxon, o modelo físico do redutor Macopema:

Figura 38 - Modelo físico utilizado para o redutor Macopema



θ_{Bm} : ângulo de saída do motor Bosch referente a sua Wb

r_3 = raio do disco menor

r_4 = raio do disco maior

Portanto, tal qual o redutor Maxon, o Macopema foi modelado como dois discos, um menor possuindo raio r_3 e outro maior com raio r_4 . Além disso, foi proposto que o motor Bosch entre com sua velocidade angular de saída no disco menor, gerando assim uma angulação θ_{Bm} . A rotação do disco menor é transmitida ao maior por meio de um contato perfeito entre ambos e, por consequência, o disco maior passará a ter um ângulo de saída θ_{rb} .

Ademais, utilizando-se do equacionamento matemático proposto no redutor Maxon, o cálculo da função de transferência $Mr(s)$ será dada por:

$$\frac{\theta_{rb}}{\theta_{Bm}}(s) = \frac{r_3}{r_4} \quad (21)$$

$$Mr(s) = \frac{\theta_{rb}}{Wb}(s) = \frac{r_3}{s.r_4} \quad (22)$$

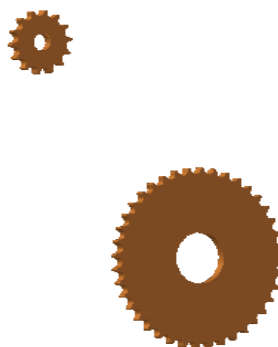
Corrente, pinhão e coroa

O sistema consiste na iteração entre a coroa e o pinhão por meio de uma corrente, a qual será considerada ideal e transmitindo perfeitamente o movimento de redução entre pinhão e coroa. O sistema da coroa, corrente e pinhão junto ao RAM é mostrado na Figura 39. Na Figura 40 apresenta-se o conjunto coroa e pinhão modelados no ambiente Solid Edge.

Figura 39 - Sistema coroa-corrente-pinhão do RAM

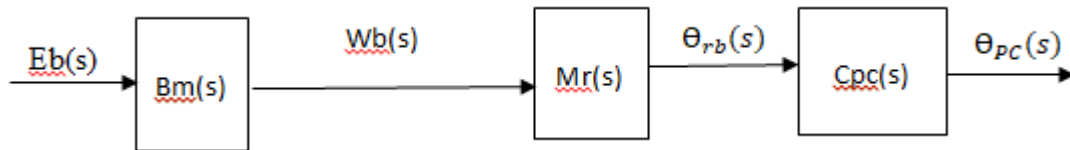


Figura 40 - Coroa e pinhão plotados no Solid Edge



O diagrama do sistema de tração, agora com a participação do sistema pinhão-corrente-coroa, é mostrado a seguir:

Figura 41 - Diagrama de blocos da parte motor-reductor em conjunto a coroa-corrente-pinhão da tração

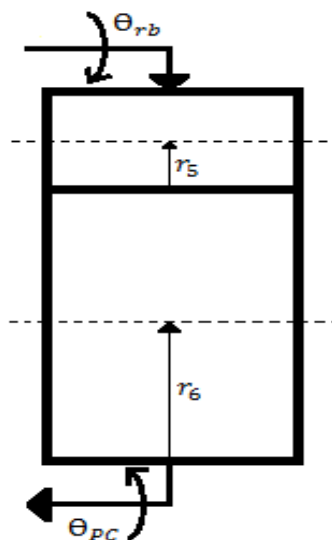


θ_{PC} : ângulo que é transmitido à roda pela corrente

$Cpc(s)$: função transferência do conjunto coroa-corrente-pinhão

O sistema corrente-pinhão-coroa, o qual é visto como não possuindo folgas, faz a ligação entre a saída do reductor e a roda do veículo para proporcionar uma tração eficiente. Além disso, possui uma redução de 1:3 no seu curso. Portanto, modela-se este conjunto de forma semelhante aos redutores anteriores, ou seja, como dois discos em contato perfeito e sem perdas. Este modelo é apresentado abaixo:

Figura 42 - Modelo físico adotado para o sistema coroa-corrente-pinhão



r_5 = raio do disco menor

r_6 = raio do disco maior

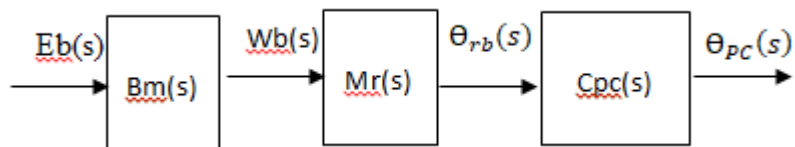
Assim, observa-se que, agora, entra-se com a variação angular de saída do redutor Θ_{rm} no disco menor r_5 e, este, por sua vez, transmite seu movimento a outro disco maior r_6 , o qual passará a girar com Θ_{PC} .

Equaciona-se a função de transferência $Cpc(s)$ do sistema corrente-pinhão-coroa tal qual nos redutores:

$$Cpc(s) = \frac{\Theta_{PC}(s)}{\Theta_{rb}(s)} = \frac{r_5}{r_6} \quad (23)$$

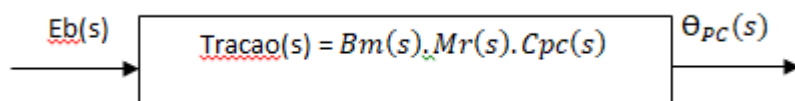
Portanto, a mesma velocidade de saída da coroa, será a da roda e, por consequência, a velocidade que se deseja controlar no sistema:

Figura 43 - Diagrama de blocos de todo o sistema de tração do veículo RAM



A função de transferência total do sistema de tração, será dada por $Tracao(s) = \frac{\Theta_{PC}}{Eb}(s)$, e é apresentada:

Figura 44 - Diagrama de blocos de todo o sistema de tração do veículo RAM



3.2. Validação dos modelos de tração e esterçamento

Para esta análise, montou-se um experimento em que se valida a função de transferência calculada pelo motor, visto que é esta parte do modelo que poderá precisar de algum ajuste e, assim, validando-se ela, pode-se validar o modelo proposto para o esterço.

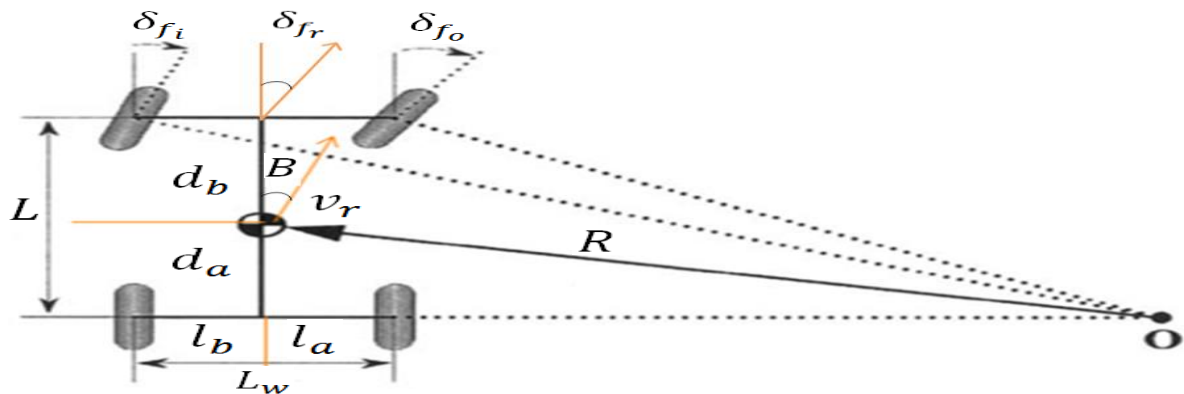
A ideia do experimento consistiu em enviar um sinal para o motor para que ele a partir de uma tensão aplicada constantemente, num sistema compreendido por motor e redutor (e no caso da tração de coroa, pinhão e corrente) acoplado ao motor para se aferir o que ocorre em seu pleno funcionamento, controlador com PWM, PIC e encoder. Por meio do encoder, adquirem-se os dados da velocidade do motor em cada instante de tempo pré-determinado e, assim, constrói-se um gráfico da velocidade pelo tempo que possa ser comparado com uma simulação proposta ao modelo teórico.

3.3. Método para a geometria de Ackermann

O uso da geometria de Ackermann torna-se necessária para se relacionar as velocidades angulares de cada roda e seu ângulo de rotação ao raio de curvatura desenvolvido na curva para se esterçar o veículo, a fim de que este não deslize e o veículo atinja a trajetória desejada, ou seja, que seu esterçamento ocorra da forma planejada, visto que o veículo não possui diferencial mecânico e por ser um robô autônomo.

Assim, considerando-se que o veículo autônomo RAM seja simétrico, seu peso esteja totalmente concentrado no seu centro e que o esterçamento seja realizado utilizando-se das rodas dianteiras, pode-se desenvolver um modelo da geometria de Ackermann aplicado ao RAM para esterçamento, o qual é mostrado na figura seguinte:

Figura 45 - Modelo da geometria de Ackermann aplicada ao RAM, adaptado (RAJAMANI, 2006)



l_a : distância entre o centro do RAM até as rodas do lado direito

l_b : distância entre o centro do RAM até as rodas do lado esquerdo

L_w : distância entre as rodas do RAM e, portanto, igual à soma $l_a + l_b$ pela simetria do veículo

R : raio de curvatura do esterçamento a ser realizado pelo RAM a partir da origem da curva no ponto "O"

d_a : distância entre o centro do RAM até as rodas traseiras

d_b : distância entre o centro do RAM até as rodas dianteiras

L : distância entre eixos do RAM e, portanto, igual à soma $d_a + d_b$ pela simetria do veículo

B : ângulo de rotação do centro de massa do RAM

v_r : velocidade de rotação do RAM

δ_{fo} : ângulo de esterçamento da roda dianteira direita do RAM

δ_{fi} : ângulo de esterçamento da roda dianteira esquerda do RAM

δ_{fr} : ângulo de esterçamento frontal do RAM em relação a uma reta perpendicular ao eixo dianteiro

Fonte: Rajamani (2006)

Observa-se como fundamental o desenvolvimento de equações cinemáticas que relacionem estes ângulos de esterçamento e rotação do RAM com o raio de curvatura R percorrido no decorrer do trajeto, a fim de que este possa ser executado o mais próximo do ideal.

Portanto, na sequência do desenvolvimento do projeto são adquiridos os dados reais do RAM para que o movimento completo de esterço e tração do RAM seja simulado e somado ao restante dos dados ótimos para controle, evitando-se assim efeitos não desejados como o *Wheel Slip* das rodas.

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4.1. Modelagem do esterçamento

4.1.1. Modelagem do motor de esterçamento

Através de consulta ao datasheet do motor, foram obtidos os seguintes dados:

$$R = 1,16 \, \Omega$$

$$L_a = 0,329 \cdot 10^{-3} \, \text{H}$$

$$K_t = 60,3 \cdot 10^{-3} \, \text{Nm/A}$$

$$J = 1,38 \cdot 10^{-5} \, \text{Kgm}^2$$

$$\tau_1 = 4,39 \cdot 10^{-3} \, \text{s}$$

$$K_b = 0,0604 \, \text{V/(rad/s)}$$

Portanto, pela Equação (17), tem-se:

$$B = 0,0031 \, \text{Kgm}^2/\text{s}$$

A partir dos dados calculados e do diagrama de blocos proposto, tem-se a seguinte função de transferência para o motor [$G_m(s) = \frac{W_m}{E_m}(s)$]:

$$G_m(s) = \frac{2.738 \cdot 10^{-10} \cdot s^2 + 1.028 \cdot 10^{-6} \cdot s + 0.0002199}{2.061 \cdot 10^{-17} \cdot s^4 + 1.548 \cdot 10^{-13} \cdot s^3 + 3.401 \cdot 10^{-10} \cdot s^2 + 1.864 \cdot 10^{-7} \cdot s + 2.659 \cdot 10^{-5}} \quad (24)$$

Esta função $G_m(s)$ relaciona a entrada de tensão E_m com a rotação de saída do motor W_m , ou seja, pode-se aferir, no domínio da frequência, como será dada a rotação de saída do motor a partir de certa tensão aplicada.

4.1.2. Modelagem do redutor de esterçamento

Para o redutor assumido na metodologia do esterçamento, e como $r_2 = 230.r_1$, pela Equação (19):

$$Br(s) = \frac{\theta_{rm}}{W_m}(s) = \frac{1}{s.230}$$

Utilizando o *software* Matlab, chegou-se à seguinte expressão para a função de transferência obtida da Figura 31:

$$Ester(s) = \frac{2.738.10^{-10}.s^2 + 1.028.10^{-6}.s + 0.0002199}{4.741.10^{-15}.s^5 + 3.559.10^{-11}.s^4 + 7.822.10^{-8}.s^3 + 4.287.10^{-5}.s^2 + 0.006115.s} \quad (25)$$

Esta função Ester(s) é obtida a partir da multiplicação entre a função de transferência do motor Gm(s) pela função Br(s), a qual torna-se possível pois nos modelos teóricos apresentados, propõe-se que a velocidade de saída do motor será a entrada do redutor. Além disso, observa-se que Ester (s) é igual à razão $\frac{\theta_{rm}}{E_a}(s)$, e, por isso, implicará em uma forma de se relacionar, no domínio da frequência, a rotação de esterçamento das rodas em função de uma tensão dada ao motor.

4.2. Validação da modelagem de esterçamento

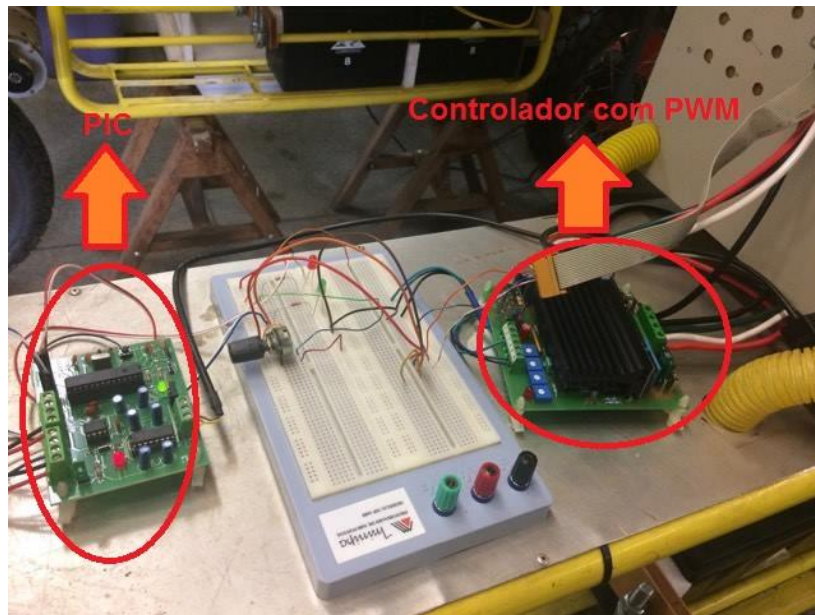
Na validação do modelo teórico de esterçamento e, posterior projeto de seu controlador, utilizou-se como saída de seu sistema a velocidade angular. Para isso, calculou-se a função de transferência Ester2(s) = $\frac{W_{rm}}{E_a}(s)$, a qual relaciona a velocidade da saída do redutor (rad/s) com uma tensão aplicada ao motor. Portanto, derivando-se o termo da posição para velocidade, obteve-se a função de transferência abaixo:

$$Ester2(s) = \frac{1.19.10^{-12}.s^2 + 4.468.10^{-9}.s + 9.56.10^{-7}}{2.061.10^{-17}.s^4 + 1.548.10^{-13}.s^3 + 3.401.10^{-10}.s^2 + 1.864.10^{-7}.s + 2.659.10^{-5}} \quad (26)$$

O experimento descrito na metodologia para validação da modelagem enviou um sinal ao motor até que ele atingisse 3200rpm.

Na imagem abaixo, pode-se ver a disposição do controlador com PWM da ELECTROMEN OY – EM 115 DC Motor Control Unit 12-36V, 25ª, 4 Squad; e do PIC produzido no próprio NepAS.

Figura 46 - Montagem experimental da validação do modelo de esterço



Já nas duas seguintes imagens, em que na primeira se vê o motor DC, o redutor e o encoder da Micronor – Miniature Type ENI 24, pode-se ter uma visão mais geral do experimento, em que os sistemas da imagem anterior são conectados ao motor e ao computador, que através da plataforma Labview enviou e captou os dados dos testes.

Figura 47 - Conjunto encoder, motor e redutor na validação do modelo de esterço



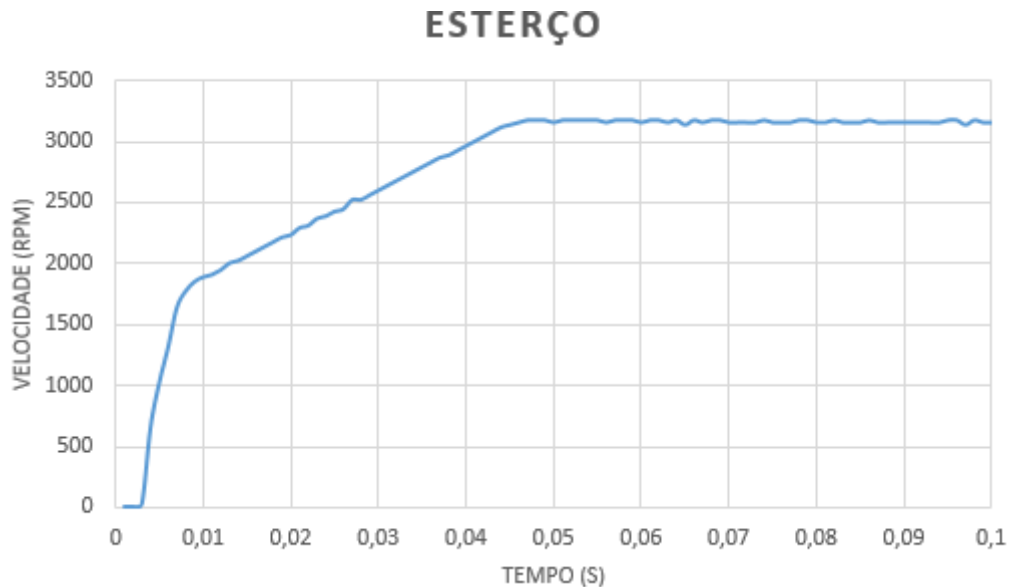
Figura 48 - Vista ampla do experimento de validação do modelo de esterço



Por meio do Labview, determinou-se para o motor atingir 3200rpm com 24V aplicados constantemente com uma aferição da velocidade no encoder de 1ms. Os dados de

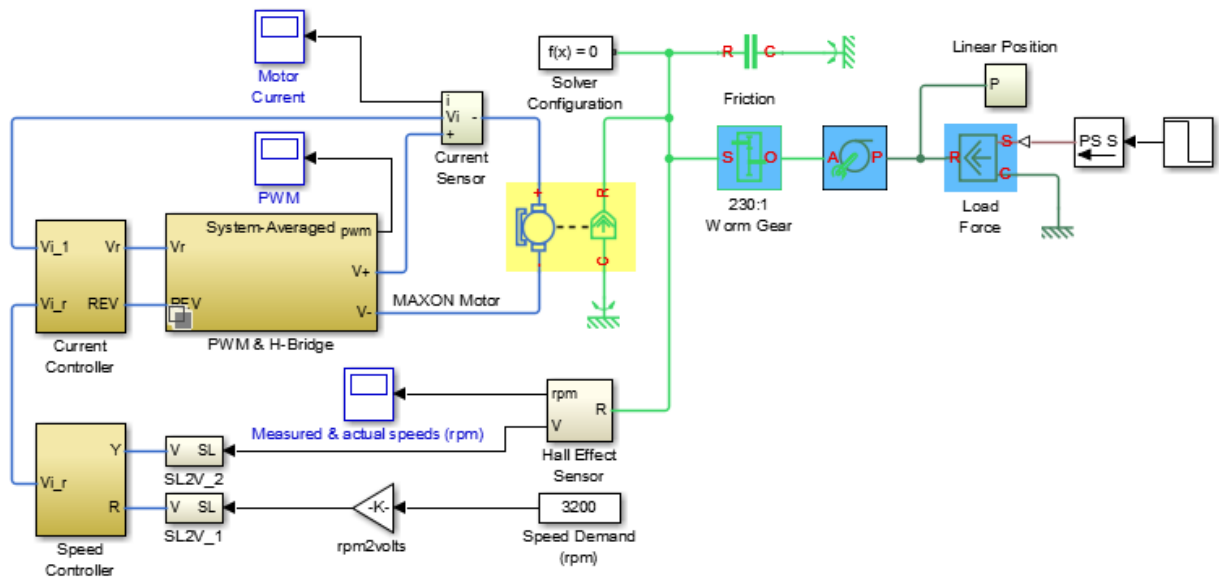
cinco medições foram captados, calcularam-se as médias e com o Excel, construiu-se um gráfico da velocidade (rpm) pelo tempo (s):

Figura 49 - Gráfico dos dados experimentais de esterço no Excel



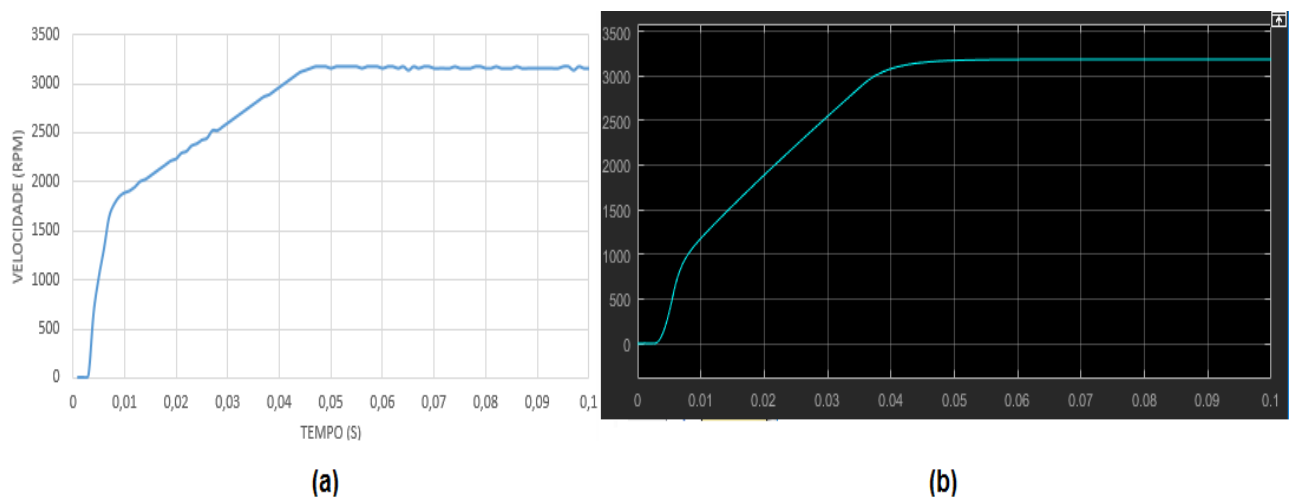
Com o modelo teórico utilizado no motor, redutor acoplado ao sistema, PIC e controlador com PWM, construiu-se um modelo na plataforma Matlab/Simulink que reproduzisse o experimento anterior. O sistema citado é exemplificado na imagem abaixo, no qual o bloco dado por “MAXON motor” utiliza do mesmo modelo teórico proposto na modelagem teórica e através do “componente measures” e “actual speeds”, calcula-se um gráfico da velocidade (rpm) do motor teórico em função do tempo.

Figura 50 - Montagem da simulação do modelo teórico no Simulink



Com o gráfico adquirido no experimento, pode-se comparar com o gráfico obtido do modelo teórico no Simulink. Essa comparação é vista na imagem abaixo:

Figura 51 - Resultado da experimentação real comparado à simulação do modelo no Simulink



Em (a), tem-se a representação do experimento plotado no Excel e em (b), o gráfico da simulação do modelo teórico no Simulink. Ao se comparar estes dois gráficos, percebe-se que ambos possuem características similares, além de valores ao longo do tempo muito próximos,

atingir um resultado idêntico de velocidade e possuir um tempo de estabilização muito próximo (aproximadamente 0,05s para ambos). Este resultado é satisfatório para o presente objetivo do projeto que seria controlar o esterço do veículo RAM que se faz em velocidades muito baixas e, assim, permite uma porcentagem maior de erro no modelo.

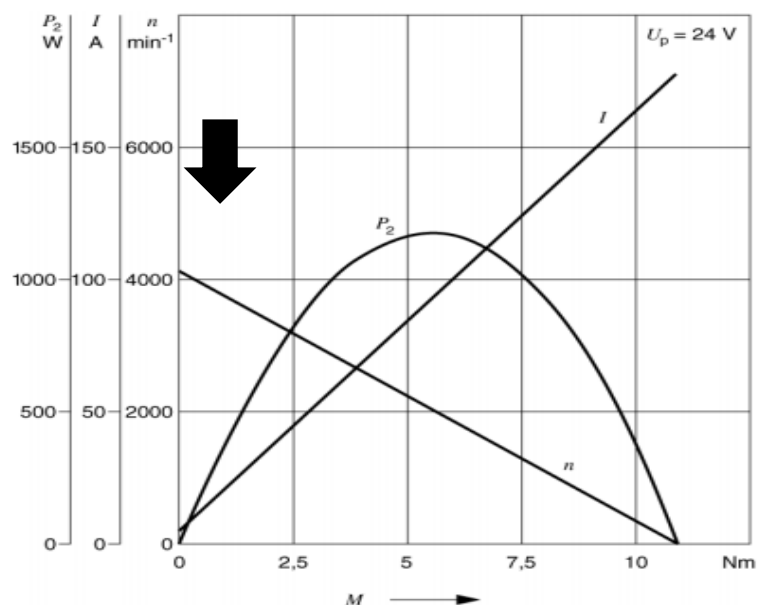
Portanto, pode-se validar o modelo de esterço proposto e, por fim, seguir para o projeto do controlador a ser utilizado no esterço do veículo autônomo.

4.3. Modelagem da tração

4.3.1. Modelagem do motor de tração

Através do datasheet do motor BOSCH, pode-se aferir n_0 :

Figura 52 - Gráfico fornecido pelo datasheet do motor Bosch



A partir da figura acima, os valores são:

$$n_0 = 4150 \text{ rpm}$$

$$\text{Volt} = 24 \text{ V}$$

Então, utilizando estes dados na Equação (20), tem-se:

$$Kv = \frac{4150 \cdot (\pi/30)}{24} \quad (27)$$

$$Kv = 18,11 \text{ rad}/(s.V)$$

Para determinar a constante de tempo, utilizou-se o osciloscópio BK Precision 2530B para a medição do tamanho de seu regime transiente, isto é, quatro vezes a sua constante de tempo ($4 \cdot \tau_2$) (FELICIO, 2010) segundo a teoria de controle.

Para levantamento da constante de tempo, ligou-se um resistor de potência (3Ω , 20W) em série com o motor, submetendo o conjunto a uma tensão de 12V. Com o auxílio de um osciloscópio, mediu-se o comportamento da tensão sobre o resistor, através da captura do transiente, como mostrado na Figura 53, a seguir.

Figura 53 - Esquema do levantamento da constante de tempo do motor

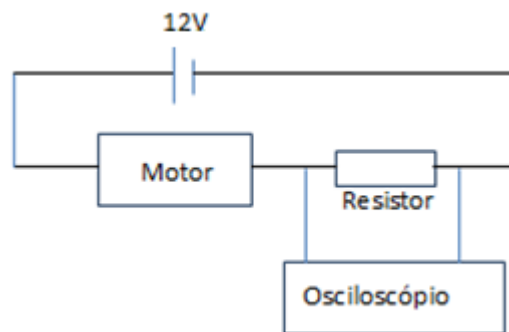
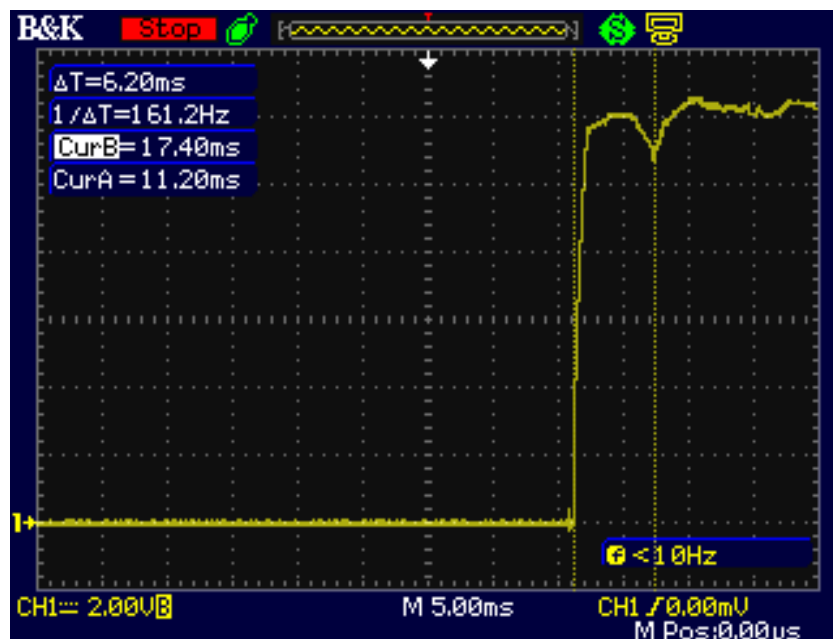


Figura 54 - Montagem experimental para obtenção da constante de tempo do motor Bosch



Foram realizadas cinco medidas consecutivas, as quais mostraram sempre o mesmo resultado. Na Figura 55 é apresentada uma das medidas realizadas. As escalas utilizadas são as de 5ms/divisão para o tempo e de 2V/divisão para tensão.

Figura 55 - Medida do tempo em transitório para o motor



Utilizando este valor experimental para ΔT ($\Delta T = 6,2\text{ms}$):

$$\Delta T = 4 \cdot \tau_2$$

$$\tau_2 = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{s}$$

A partir dos dados obtidos no Datasheet do motor (Kv) e do experimento com o motor (τ_2), pode-se estabelecer a seguinte função de transferência $Bm(s)$ para o motor BOSCH:

$$Bm(s) = \frac{Wb}{Eb}(s) = \frac{18,11}{s \cdot 1,6 \cdot 10^{-3} + 1} \quad (28)$$

Então, percebe-se que esta função $Bm(s)$ poderá relacionar, no domínio da frequência, como se comportará a rotação de saída do motor a partir de uma tensão aplicada e, portanto, explicitará o seu modo de funcionamento em variadas situações de tensão.

4.3.2. Modelagem do redutor de tração

Para o redutor assumido na metodologia do esterçamento, e como $r_4 = 25 \cdot r_3$ da Equação (22):

$$Mr(s) = \frac{\theta_{rb}}{Wb}(s) = \frac{1}{s \cdot 25} \quad (29)$$

Esta função $Mr(s)$ relaciona, no domínio da frequência, a rotação de saída do motor que será fornecida como entrada ao redutor com a rotação de saída que o redutor terá por consequência. Então, esta função torna-se fundamental na análise do redutor, pois, a partir

desta, pode-se aferir como sua rotação de saída variará a partir da variação da rotação do motor acoplado.

4.3.3. Modelagem da corrente, pinhão e coroa de tração

Para o conjunto corrente, pinhão e coroa assumido na metodologia do esterçamento, e como $r_6 = 3 \cdot r_5$ da equação (23):

$$C_{pc}(s) = \frac{\theta_{pc}}{\theta_{rb}}(s) = \frac{1}{3} \quad (30)$$

Essa função de transferência $C_{pc}(s)$, no domínio da frequência, relaciona como se comportará o sistema a partir da rotação exercida pelo redutor diretamente no pinhão, ou seja, a partir dela tem-se como a rotação de saída da coroa atuará, a qual é acoplada a roda, ao sofrer com a rotação que o pinhão recebe do redutor.

A função $Tracao(s)$ da Figura 44 é calculada como:

$$Tracao(s) = \frac{6.036}{0.03875 \cdot s^2 + 25 \cdot s} \quad (31)$$

4.4. Validação da modelagem da tração

Assim como no esterçamento, na validação do modelo de tração e no projeto do controlador, a função de transferência $Tracao(s)$ terá parte derivada para que se obtenha a função $Tracao2(s) = \frac{W_{PC}}{Eb}(s)$, que relaciona a velocidade de saída da roda (rad/s) com a tensão aplicada ao motor. Então:

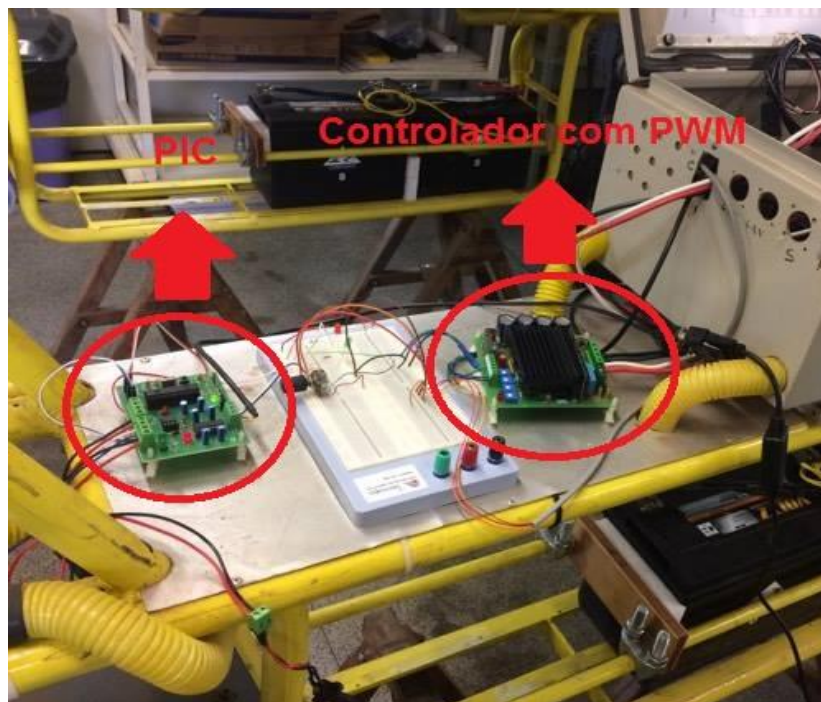
$$Tracao2(s) = \frac{0.2414}{0.00155 \cdot s + 1} \quad (32)$$

Tal qual na validação do esterço, também se propôs um experimento para a validação do modelo teórico do motor visto que é no motor que podem-se ocorrer erros teóricos que afetem o projeto final.

O experimento consistiu no mesmo esquema do esterço, em que através de um sistema composto por PIC, controlador com PWM, encoder, motor e demais sistemas acoplados (neste caso redutor e roda), para que se reproduza o que acontece em seu pleno funcionamento, pode-se controlar a que velocidade se deseja que o motor alcance a uma tensão aplicada constantemente.

Na imagem seguinte, tem-se o esquema do controlador com PWM da ELECTROMEN Oy – EM 115 DC Motor Control Unit 12-36V, 25ª, 4 Squad; e do PIC produzido no próprio NepAS no experimento.

Figura 56 - Montagem experimental da validação do modelo de tração



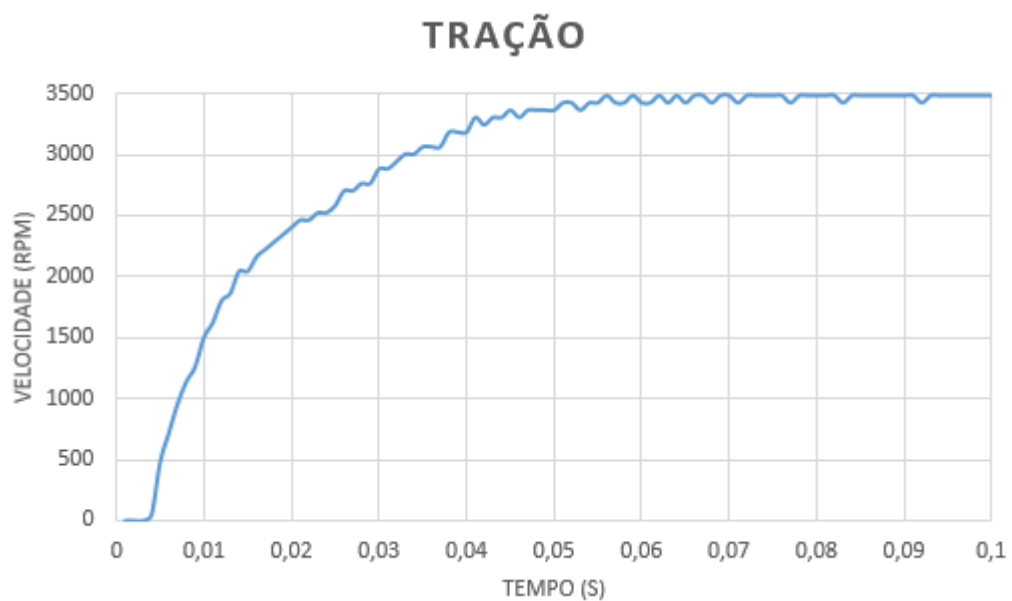
Além disso, pode-se ter uma visão mais geral do experimento na imagem abaixo, em que se nota o conjunto motor-redutor-pinhão-coroa acoplados a roda e o encoder, Hohner – serie 75 incremental, destacado na imagem.

Figura 57 - Vista ampla do experimento de validação do modelo de tração



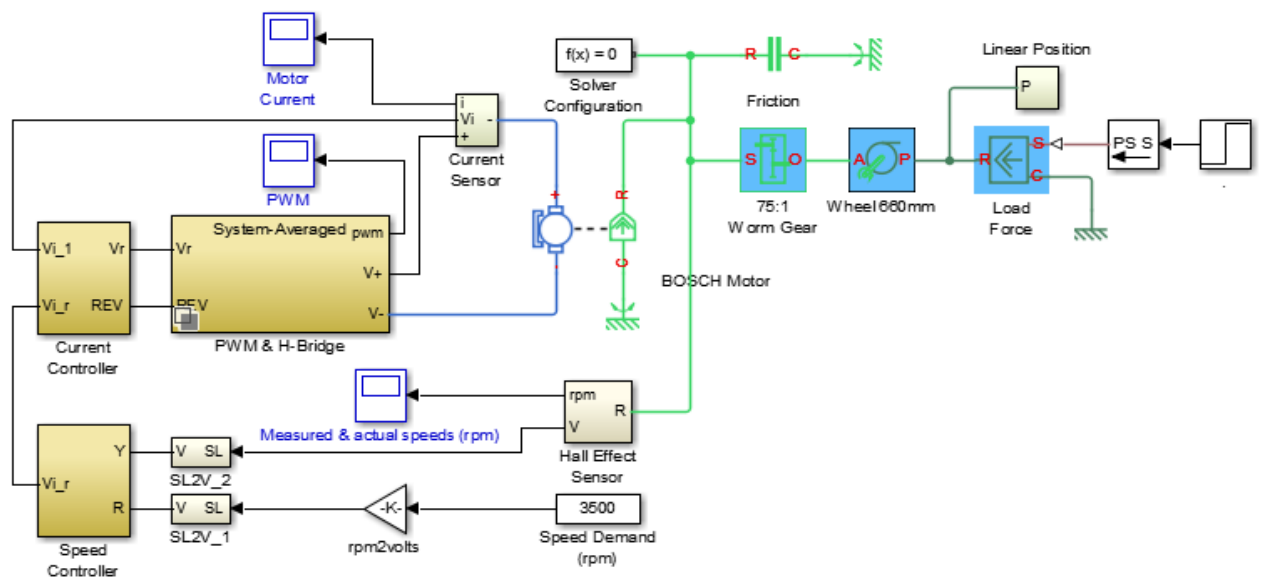
Por meio do Labview, estabeleceu-se para o motor atingir uma velocidade de 3500rpm a uma constante de 24V de tensão aplicada, com uma aquisição de dados do encoder na taxa de 1ms. Os dados foram captados em cinco medições e então sua média plotado em um gráfico da velocidade (rpm) pelo tempo (s) no Excel. O resultado é exemplificado abaixo:

Figura 58 - Gráfico dos dados experimentais da tração no Excel



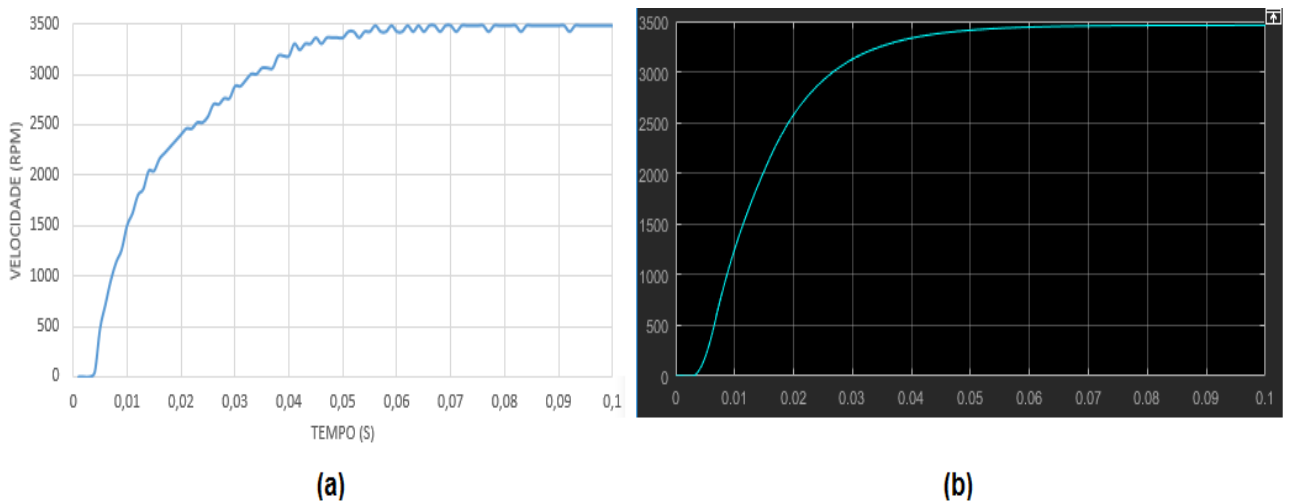
O modelo teórico do motor Bosch acoplado ao redutor, correia e roda foi simulado no Matlab/Simulink e é observado na imagem seguinte. No esquema, o bloco BOSCH Motor representa exatamente o mesmo modelo teórico utilizado na obtenção da função transferência e, no restante, são simulados o controlador, o PWM e o acoplamento dos demais elementos. No elemento “Measured” e “actual speeds” pode-se visualizar o gráfico da velocidade (RPM) que o motor adquire resultante da simulação no tempo.

Figura 59 - Montagem da simulação do modelo teórico da tração no Simulink



O gráfico obtido nessa simulação é comparado com o gráfico do experimento:

Figura 60 - Comparação da experimentação real com a simulação do modelo no Simulink



O item (a) corresponde ao gráfico do Excel e o (b) ao item obtido da simulação teórica do Simulink. Assim, por meio de comparação, percebe-se que ambos os gráficos alcançam o mesmo índice de velocidade, possuem em sua trajetória ao longo do tempo valores muito próximos e o tempo de estabilização do sistema muito próximo (aproximadamente 0,06s). Este resultado de comparação torna-se satisfatório no projeto de controle de tração do RAM, o qual trafega em velocidades e, por consequência, torna-se permissível um maior erro no modelo teórico.

Por fim, o modelo de tração teórico calculado é de fato válido e, assim, pode-se prosseguir para o projeto do controlador do sistema de tração do RAM.

4.5. Projeto do controlador dos sistemas de tração e esterçamento

4.5.1. Controlador do esterçamento

O projeto do controlador para o esterçamento consistirá em controlar a função Ester2(s) (representada abaixo), visto que relaciona a velocidade de esterço da roda com a tensão aplicada ao motor. O método a ser utilizado para o controle do sistema de esterço é o método de alocação de polos.

$$Ester2(s) = \frac{1.19.10^{-12}.s^2 + 4.468.10^{-9}.s + 9.56.10^{-7}}{2.061.10^{-17}.s^4 + 1.548.10^{-13}.s^3 + 3.401.10^{-10}.s^2 + 1.864.10^{-7}.s + 2.659.10^{-5}} \quad (33)$$

Assim, para se trabalhar com este método, deve-se utilizar do espaço de estados e, por consequência, representar a função de transferência Ester2(s) na forma canônica controlável, a qual é de suma importância na alocação de polos.

Primeiro fatora-se a função de transferência como:

$$Ester2(s) = \frac{0.s^4 + 0.s^3 + 5.77.10^4.s^2 + 2.17.10^8.s + 4.64.10^{10}}{1.s^4 + 7.51.10^3.s^3 + 1.65.10^7.s^2 + 9.04.10^9.s + 1.29.10^{12}} \quad (34)$$

Então, calcula-se a forma canônica controlável:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1.29 \cdot 10^{12} & 9.04 \cdot 10^9 & 1.65 \cdot 10^7 & 7.51 \cdot 10^{12} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot u \quad (35)$$

$$y = [4.64 \cdot 10^{10} \quad 2.17 \cdot 10^8 \quad 5.77 \cdot 10^4 \quad 0] \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + 0 \cdot u \quad (36)$$

De onde:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1.29 \cdot 10^{12} & 9.04 \cdot 10^9 & 1.65 \cdot 10^7 & 7.51 \cdot 10^{12} \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (37)$$

$$C = [4.64 \cdot 10^{10} \quad 2.17 \cdot 10^8 \quad 5.77 \cdot 10^4 \quad 0]; \quad D = 0 \quad (38)$$

Agora, verificando-se se o sistema é completamente controlável no espaço de estados, tem-se a matriz de controlabilidade:

$$CO = [A^0 \cdot B \quad A^1 \cdot B \quad A^2 \cdot B \quad A^3 \cdot B] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 7.51 \cdot 10^3 \\ 0 & 1 & 7.51 \cdot 10^3 & 7.29 \cdot 10^7 \\ 1 & 7.51 \cdot 10^3 & 7.29 \cdot 10^7 & 6.80 \cdot 10^{11} \end{bmatrix} \quad (39)$$

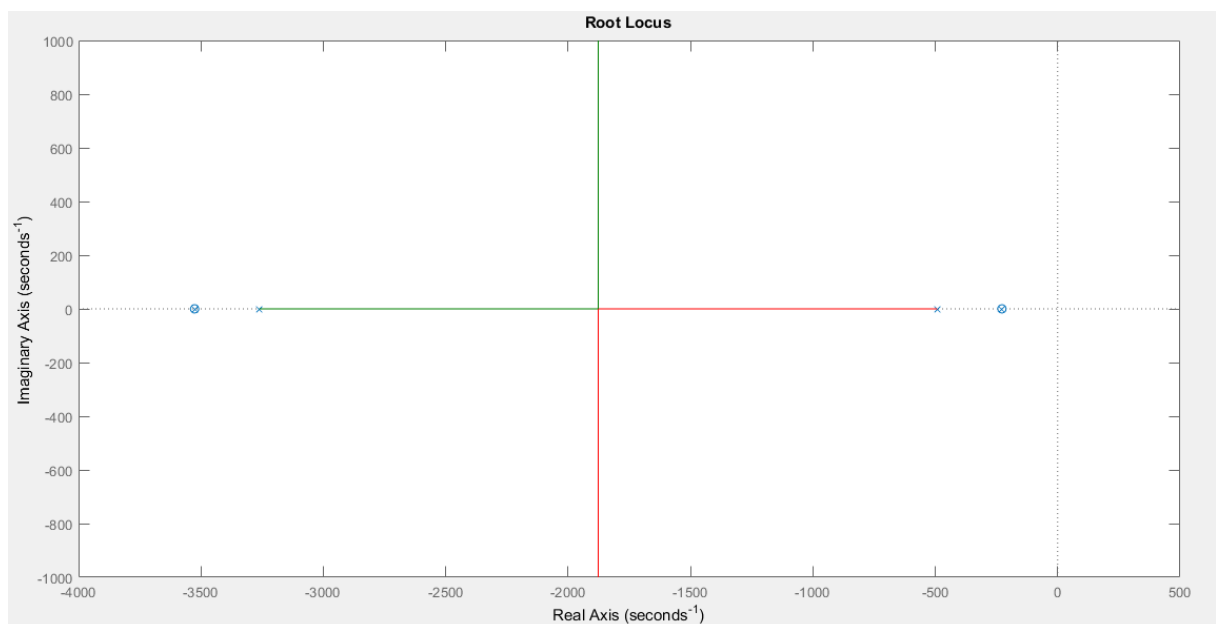
Calculando-se o determinante da matriz de controlabilidade CO:

$$\det(CO) = 1 \rightarrow \text{Matriz não singular}$$

Como a matriz CO é não singular, portanto o sistema de controle é completamente controlável. Portanto, pode-se utilizar o método da alocação de polos no sistema.

A fim de se implementar o controle do sistema, deve-se calcular a matriz de ganho K de acordo com as especificações a serem propostas. Para isso, escolhem-se os polos a serem alocados no sistema por meio do lugar das raízes. O gráfico do lugar das raízes obtido por meio do Matlab da função Ester2(s) é exemplificado:

Figura 61 - Gráfico do lugar das raízes da função Ester2(s)

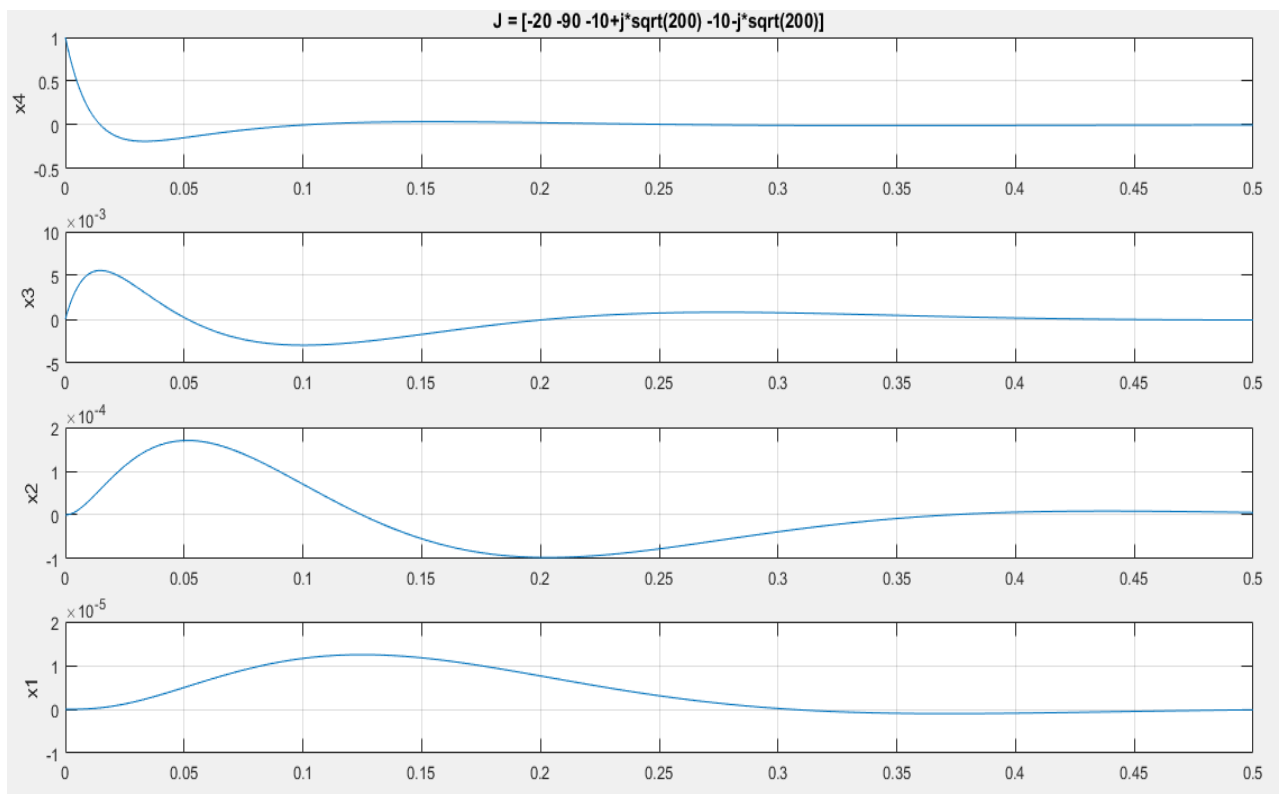


A partir do gráfico acima, o qual auxilia na análise do sistema de forma satisfatória, percebe-se que as raízes que estão sobre o eixo real encontram-se muito afastadas do eixo imaginário e, portanto, isso faz com que o sistema responda de uma forma demasiadamente rápida, o qual é desnecessário para o que se propõe o sistema no RAM com velocidades de esterço baixas e o tempo de estabilização não necessitando ser tão baixo e, além disso, pode ser prejudicial ao longo do funcionamento do sistema por forçá-lo em situações em que ocorram distúrbios grandes. Os resultados serão analisados de acordo com dois fatores que são determinantes para o bom funcionamento em projeto do RAM: o sobressinal deve ser menor que 10% e o tempo de estabilização para o sistema deve ser menor que 0,3s. Então, simulou-se o sistema com alocação de diferentes polos e condição inicial de 1 para a variável

x_4 e 0 para as demais, sendo os conjuntos “J” possuindo 4 polos cada um, sendo um par de complexos conjugados e dois reais:

$$1) \text{ Polos: } J_1 = [-20 ; -90 ; -10+j\sqrt{200} ; -10-j\sqrt{200}]$$

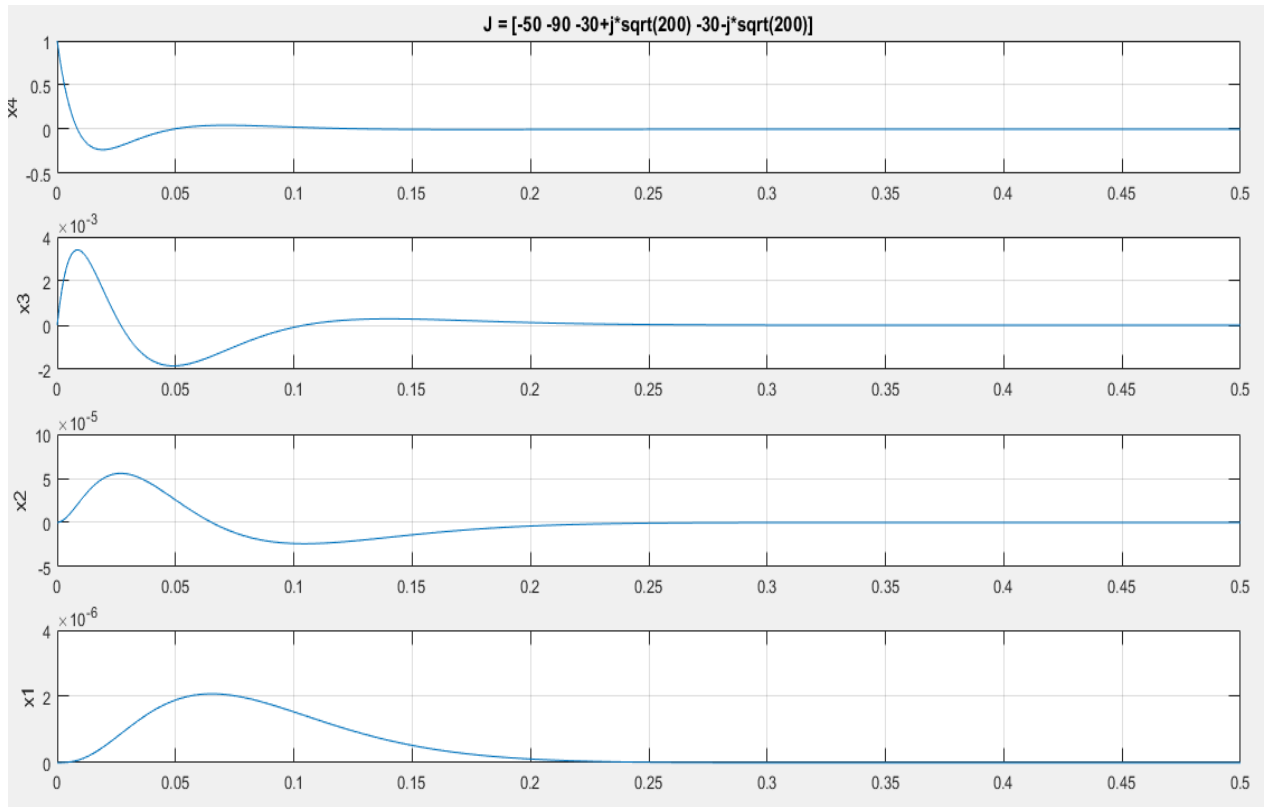
Figura 62 - Alocação de polos J1 no sistema dado por Ester2(s)



Nesta simulação, percebe-se que a variável de estado x_4 apresentou sobressinal maior que 10% e os tempos de estabilização de x_1 , x_2 , e x_3 foram maiores que 0,3s.

2) Polos: $J2 = [-50 ; -90 ; -30+j\sqrt{200} ; -30-j\sqrt{200}]$

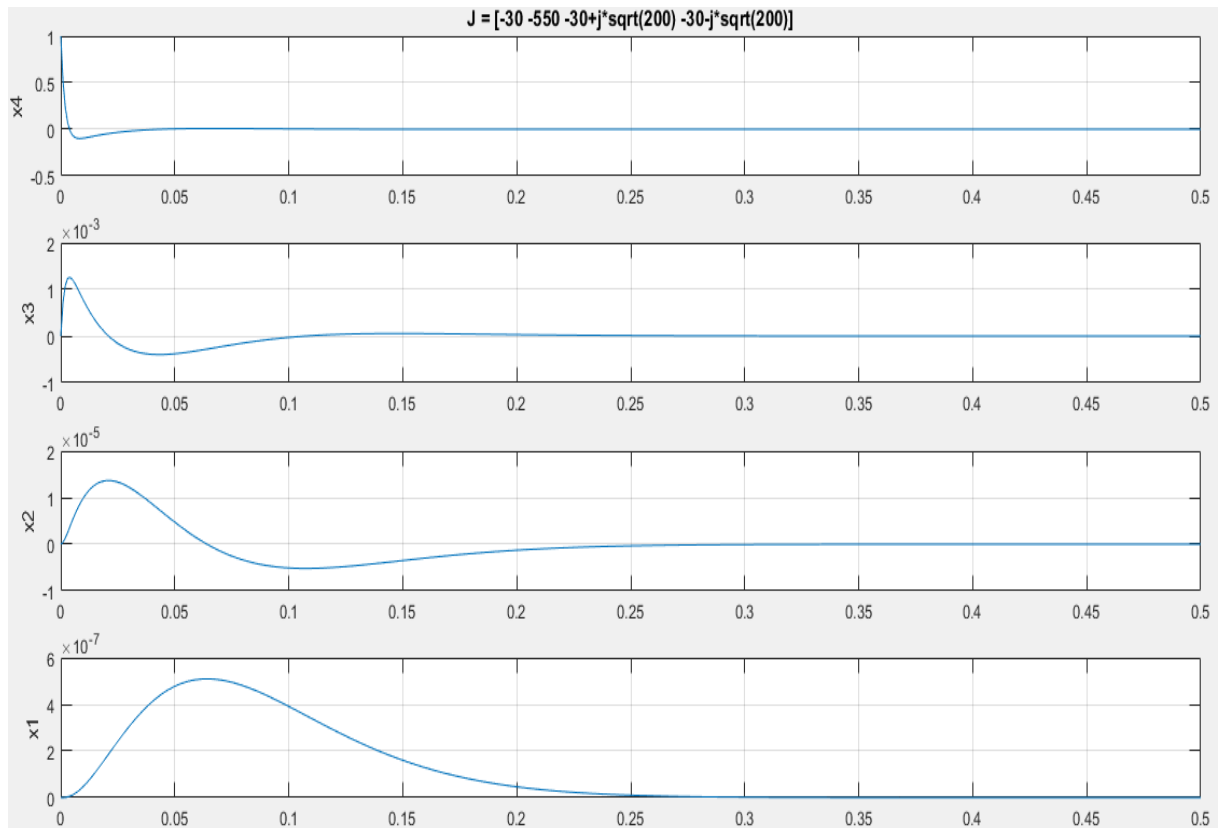
Figura 63 - Alocação de polos J2 no sistema dado por Ester2(s)



Agora, aumentaram-se os valores reais dos polos para que o sistema responda mais rapidamente. Todas as variáveis de controle responderam com tempo de estabilização menor que 0,3s. Porém, a variável de x_4 continua com um sobressinal maior que 10%.

3) Polos: $J_3 = [-30 ; -550 ; -30+j.\sqrt{200} ; -30-j.\sqrt{200}]$

Figura 64 - Alocação de polos J_3 no sistema dado por Ester2(s)



Com a utilização dos polos localizados mais distantes sobre o eixo real, o sistema tenderá a ter um sobressinal menor em x_4 . Assim, o sistema responde com todas as suas variáveis de estado com tempos de estabilização menores que 0,3s, sobressinais menores que 10% e de forma estável. Portanto, utilizar-se-á este conjunto de polos J_3 para a obtenção da matriz de ganho K .

Por meio da fórmula de Ackermann para obtenção da matriz de ganho “Kester”:

$$Kester = [0 \ 0 \ 0 \ 1].[CO].\phi(A) \quad (40)$$

$$Kester = [0 \ 0 \ 0 \ 1] \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 7.51 \cdot 10^3 \\ 0 & 1 & 7.51 \cdot 10^3 & 7.29 \cdot 10^7 \\ 1 & 7.51 \cdot 10^3 & 7.29 \cdot 10^7 & 6.80 \cdot 10^{11} \end{bmatrix} \cdot \phi(A) \quad (41)$$

Com o auxílio do programa Matlab, utilizou-se da função *acker* que calcula a matriz de ganho K por meio da fórmula de Ackermann. Por fim, calculou-se a matriz de ganho Kester para o sistema de controle de esterçamento no espaço de estados, por meio do conjunto J3 de polos.

$$Kester = [-6,87 \cdot 10^3 \quad -1,65 \cdot 10^7 \quad -9,04 \cdot 10^9 \quad -1,29 \cdot 10^{12}] \quad (42)$$

Portanto, com a utilização desta matriz de ganho Kester, o sistema responderá de forma estável com sobressinal menor que 10% e tempo de estabilização menor que 0,3s, os quais atendem satisfatoriamente o bom funcionamento do esterçamento do RAM.

4.5.2. Controlador da tração

O controlador a ser projetado deve controlar a velocidade de saída da tração, ou seja, deve-se utilizar da função *Tracao2* que relaciona a tensão aplicada ao motor com a velocidade da roda no movimento de tração:

$$\text{Tracao2}(s) = \frac{0.2414}{0.00155 \cdot s + 1} \quad (43)$$

Pelo projeto, usar-se-á o método de alocação de polos para calcular a matriz de ganho de controlará o sistema. Então, a função de transferência *Tracao2(s)* deve ser representada no

espaço de estados, na forma canônica controlável, a qual a representa a etapa inicial do processo.

Primeiramente, fatora-se a função Tracao2(s):

$$\text{Tracao2}(s) = \frac{0.s+1.56.10^2}{1.s+6.45.10^2} \quad (44)$$

Então, calcula-se a forma canônica controlável:

$$[\dot{x}_1] = [-6.45.10^2]. [x_1] + [1]. u \quad (45)$$

$$y = [1.56.10^2]. [x_1] + 0. u \quad (46)$$

De onde, por notação:

$$A = [-6.45.10^2]; B = [1] \quad (47)$$

$$C = [1.56.10^2]; D = 0 \quad (48)$$

A fim de que o sistema possa utilizar o método de alocação de polos, o sistema deve ser completamente controlável, ou seja, deve-se calcular a matriz de controlabilidade “CO” do sistema e verificar se esta é não singular:

$$CO = [A^0.B] = [1] \quad (49)$$

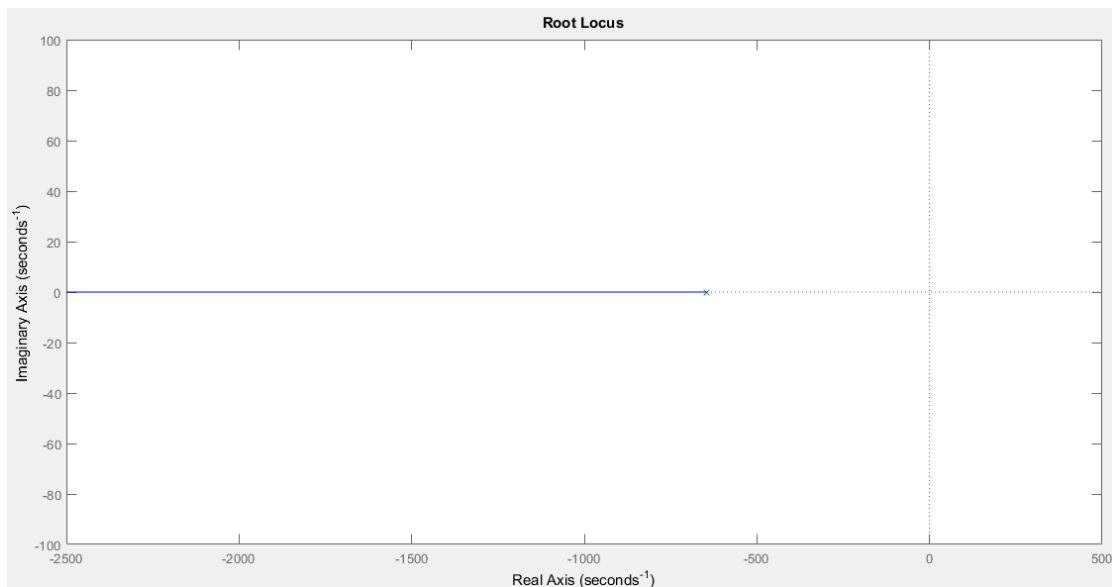
Calculando-se o determinante da matriz CO:

$$\det (CO) = 1 \rightarrow \text{Matriz não singular}$$

Como a matriz CO é não singular, portanto o sistema de controle é completamente controlável e, por consequência, pode-se recorrer ao uso do método de alocação de polos para realizar seu controle.

Prosseguindo-se no método de controle escolhido, o objetivo é calcular a matriz de ganho K que regulará o funcionamento do sistema de acordo com especificações propostas no projeto do RAM. Com este intuito, deseja-se escolher os polos a para se alocar no sistema de controle e calcular a matriz K. Por meio do método do lugar das raízes, pode-se aferir a localização das atuais raízes do sistema para se escolher as demais alocadas. Com o uso do Matlab na função Tracao2(s), temos o seguinte mapeamento do lugar das raízes:

Figura 65 - Gráfico do lugar das raízes de Tracao2(s) no Matlab

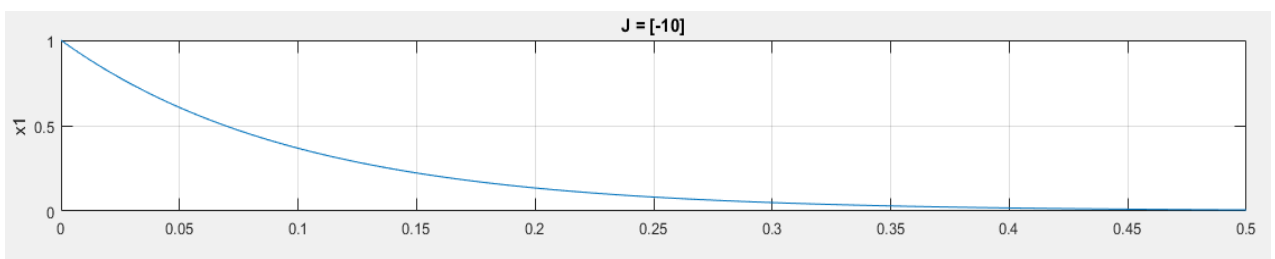


A partir da figura acima, pode-se perceber que a localização do único polo do sistema, que se encontra sobre o eixo real, é bem distante do eixo imaginário. Isso ocasiona uma resposta demasiadamente rápida do sistema, o qual é desnecessário, pois o RAM atua com velocidades de tração relativamente baixas e, ademais, quando em contato com grandes distúrbios pode ocasionar prejuízos ao sistema. Por projeto, têm-se duas especificações a serem seguidas na escolha dos polos: a estabilização da resposta do sistema deve ser menor que 0,3s e o sobressinal menor que 10%.

Então, testou-se alguns polos por meio do Matlab, em que o a variável a ser controlada x_1 tem como condição inicial o valor 1 e os polos “J” a serem testados possuem valores apenas reais. Os resultados são apresentados e discutidos na sequência:

1) $J_4 = [-10]$

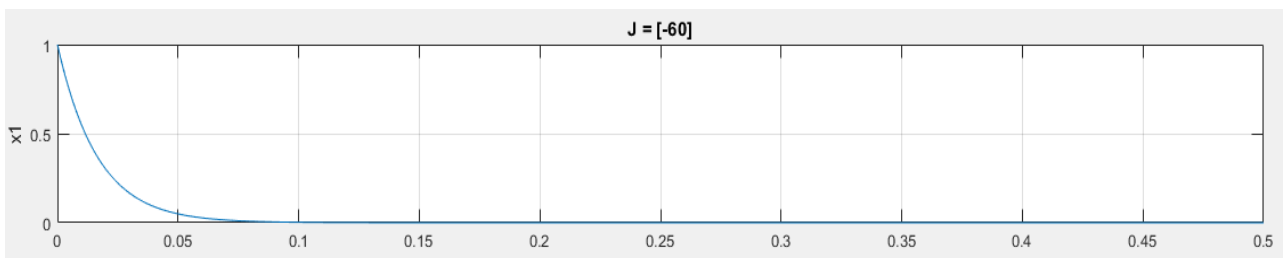
Figura 66 - Alocação de polos J_4 no sistema dado por Ester2(s)



Percebe-se que o sistema teve uma resposta sem sobressinal, o qual segue o requisito. Porém, o tempo de estabilização da resposta é maior do que 0,3s.

2) $J_5 = [-60]$

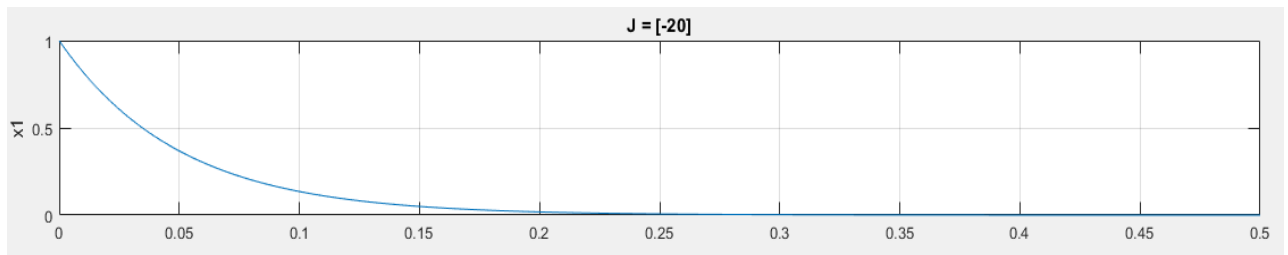
Figura 67 - Alocação de polos J_5 no sistema dado por Ester2(s)



Neste experimento, tentou-se um polo que fosse mais afastado do eixo imaginário para que o sistema respondesse de forma mais rápida. Porém, o sistema respondeu demasiadamente rápido, o qual se torna desnecessário para seu bom funcionamento.

3) $J_6 = [-20]$

Figura 68 - Alocação de polos J_6 no sistema dado por Ester2(s)



Com um polo mais próximo do eixo imaginário, tem-se que o sistema respondeu com tempo de estabilização ligeiramente menor que 0,3s, sobressinal nulo e de forma estável. Portanto, com a aferição das especificações concluídas, segue-se a para a obtenção da matriz de ganho K com a alocação do polo $J_6 = [-20]$ no sistema.

Com o uso da fórmula de Ackermann para o cálculo da matriz de ganho K_{tracao} :

$$K_{tracao} = [1] \cdot [CO] \cdot \phi(A) \quad (50)$$

$$K_{tracao} = [1] \cdot [1] \cdot \phi(A) \quad (51)$$

Com o auxílio do programa Matlab, utilizou-se da função *acker* que calcula a matriz de ganho K por meio da fórmula de Ackermann. Por fim, calculou-se a matriz de ganho Kester para o sistema de controle de esterçamento no espaço de estados, por meio do conjunto J_3 de polos. O resultado é dado a seguir:

$$K_{tracao} = [-6,25 \cdot 10^2] \quad (52)$$

A partir do processo concluído, ao se utilizar a matriz de ganho K_{tracao} para regular o sistema no espaço de estados, o sistema responderá satisfatoriamente de acordo com os quesitos especificados para o bom funcionamento da tração do RAM, ou seja, de forma estável com tempo de estabilização menor que 0,3s e sobressinal menor que 10%.

4.6. Implementação da geometria de Ackermann

A fim de se simular as equações referentes aos ângulos de esterçamento e rotação utilizaram-se dos seguintes dados do veículo RAM:

$$d_b = 1,05 \text{ m}$$

$$d_a = 1,05 \text{ m}$$

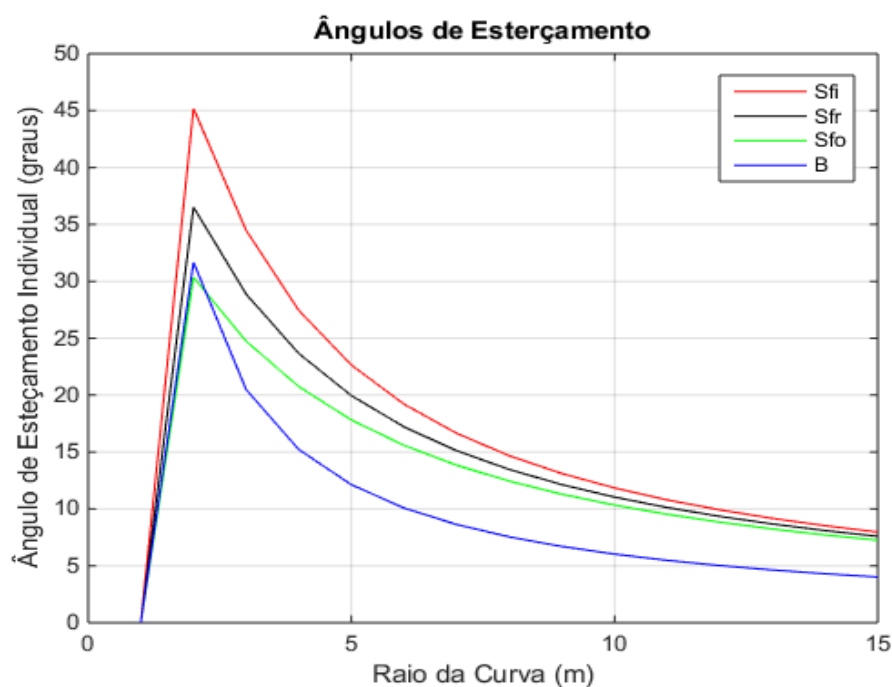
$$r_w = 0,33 \text{ m}$$

$$l_b = 0,75 \text{ m}$$

$$l_a = 0,75 \text{ m}$$

Deste modo, simulando as equações (3), (9), (10) e (11) no Matlab e, ainda, levando-se em conta que o ângulo máximo de esterçamento das rodas seja de 45° devido às limitações mecânicas do RAM, obtêm-se o gráfico, mostrado na figura 35, dos ângulos de esterçamento de suas rodas e de rotação do seu centro de massa em função de um raio R de curvatura, variando até 15 metros:

Figura 69 - Gráfico dos ângulos de esterçamento e rotação do RAM em função do raio de curvatura R da trajetória



Utilizando-se da geometria de Ackermann aplicada ao RAM a fim de que não ocorra o deslizamento das rodas ao esterçar, pode-se deduzir as equações (TORRES et al., 2012) para as velocidades angulares ω_{r_o} (traseira esquerda), ω_{r_i} (traseira direita), ω_{f_o} (dianteira esquerda) e ω_{f_i} (dianteira direita) em função do raio de curvatura R a ser percorrido.

Estas equações são apresentadas abaixo:

$$\omega_{r_i} = \frac{r_{r_i}}{r_\omega} \chi \frac{v_r}{R} \quad (53)$$

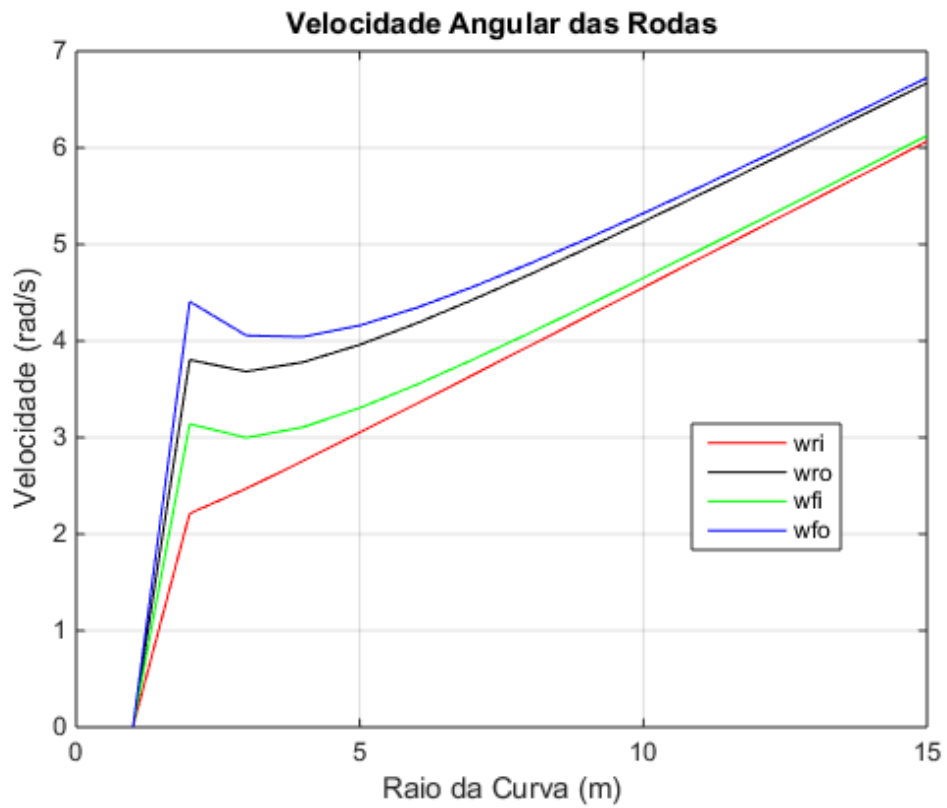
$$\omega_{r_o} = \frac{r_{r_o}}{r_\omega} \chi \frac{v_r}{R} \quad (54)$$

$$\omega_{f_i} = \frac{r_{f_i}}{r_\omega} \chi \frac{v_r}{R} \quad (55)$$

$$\omega_{f_o} = \frac{r_{f_o}}{r_\omega} \chi \frac{v_r}{R} \quad (56)$$

Assim, utilizando-se dos dados obtidos no projeto do RAM e que já foram aplicados para se obter o gráfico da figura anterior, pode-se obter um gráfico que relacione as velocidades angulares de cada roda em função do raio R da curva percorrida. Então, pelo Matlab, para um intervalo de R variando até 15 metros, obtêm-se o gráfico das velocidades angulares de cada roda em função de R que está demonstrado a seguir:

Figura 70 - Gráfico da velocidade angular de cada roda do RAM em função do raio de curvatura R da trajetória

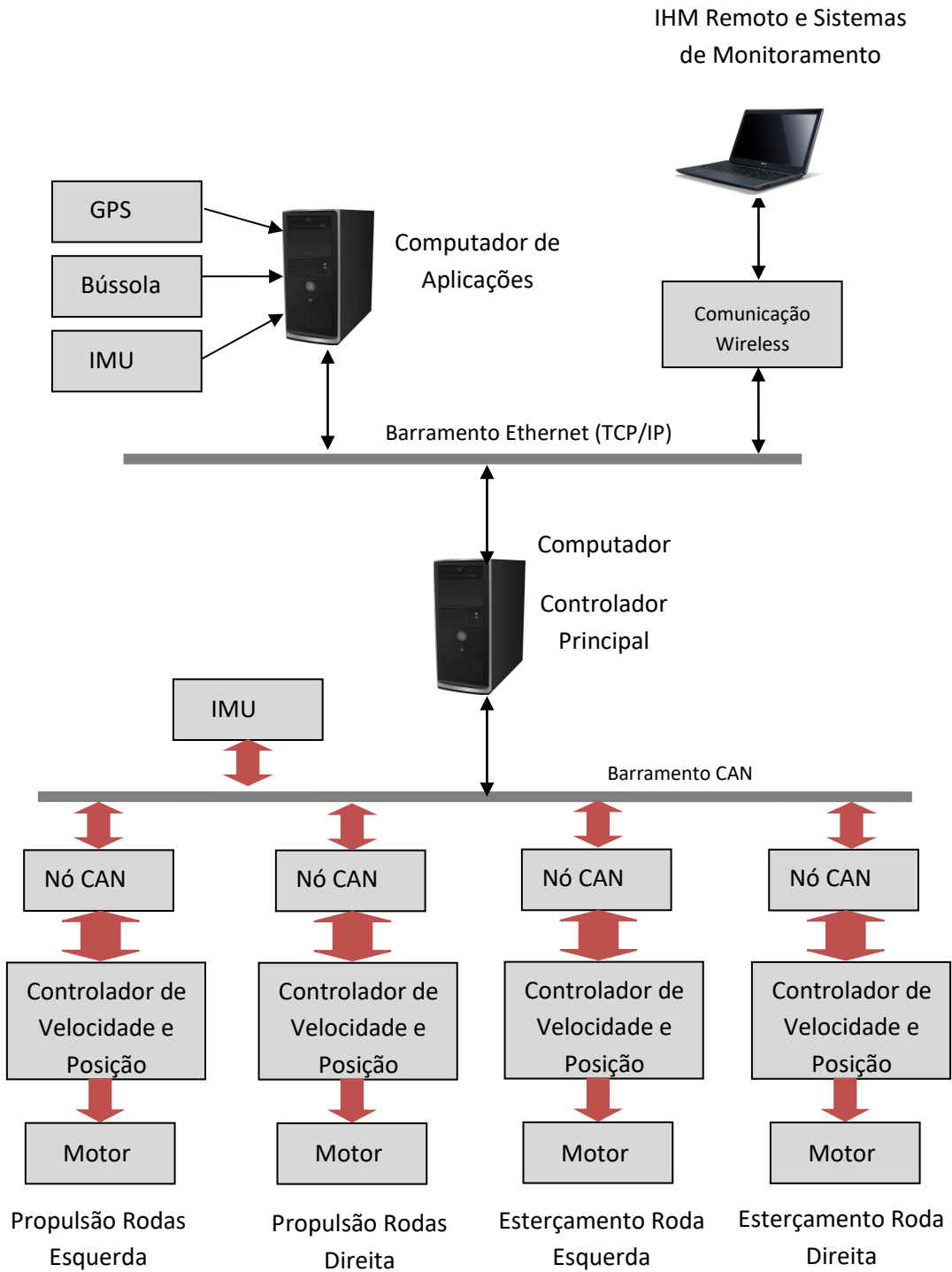


Portanto, este gráfico anterior se torna importante em um veículo sem diferencial mecânico para evitar que ocorra o fenômeno conhecido como *Wheel Slip* e, assim, o esterçamento ocorra de modo ótimo, tal qual planejado.

4.7. Implementação dos controladores do RAM

A estrutura de hardware, para controle do RAM, é mostrada na figura seguinte.

Figura 71 - Estrutura de Controle do RAM



Esta estrutura é dividida em duas camadas principais:

- Camada de controle de locomoção e esterçamento;
- Camada de sistemas de navegação e aplicações.

A camada de sistemas de navegação e aplicações é responsável pelo controle de missões do veículo, ou seja, de posse de uma posição meta, faz o controle estruturado de deslocamento do veículo para que o mesmo chegue ao destino cumprindo uma determinada trajetória, com determinados parâmetros de velocidade e aceleração.

A camada de controle de locomoção e esterçamento é responsável pelo controle do deslocamento do veículo, provendo capacidades de controle de velocidade e ângulo de esterçamento das rodas e, conseqüentemente, do veículo. Ela é composta pelos seguintes componentes:

- Duas placas controladoras (Drivers de controle de velocidade) para controle de locomoção, um para os motores do lado esquerdo e outro para os motores do lado direito;
- Duas placas controladoras (Drivers de controle de velocidade e posição) para controle de esterçamento, um para cada uma das rodas dianteiras;
- Quatro Nós CAN (implementados com Microcontrolador PIC 18F258) utilizadas como interfaces entre o barramento CAN e os controladores;
- Uma IHM (Inteface Homem-Máquina), utilizada para conduzir manualmente o RAM;
- Um computador, utilizado como Controlador Principal.

A comunicação entre os nós CAN, o Controlador Principal e a IHM é feita via barramento CAN, padrão ISO11898 2.0B. As mensagens são no padrão SAE J1939.

As placas CAN são programadas para interpretar as mensagens CAN recebidas, enviar mensagens de comando aos controladores, e enviar mensagens CAN com o estado atual de controle. Elas também monitoram um sistema isolado de emergência que pode ser acionado por hardware (botoeiras ou outras placas CAN – falha de hardware) ou software (falhas de controle ou botão de emergência da IHM).

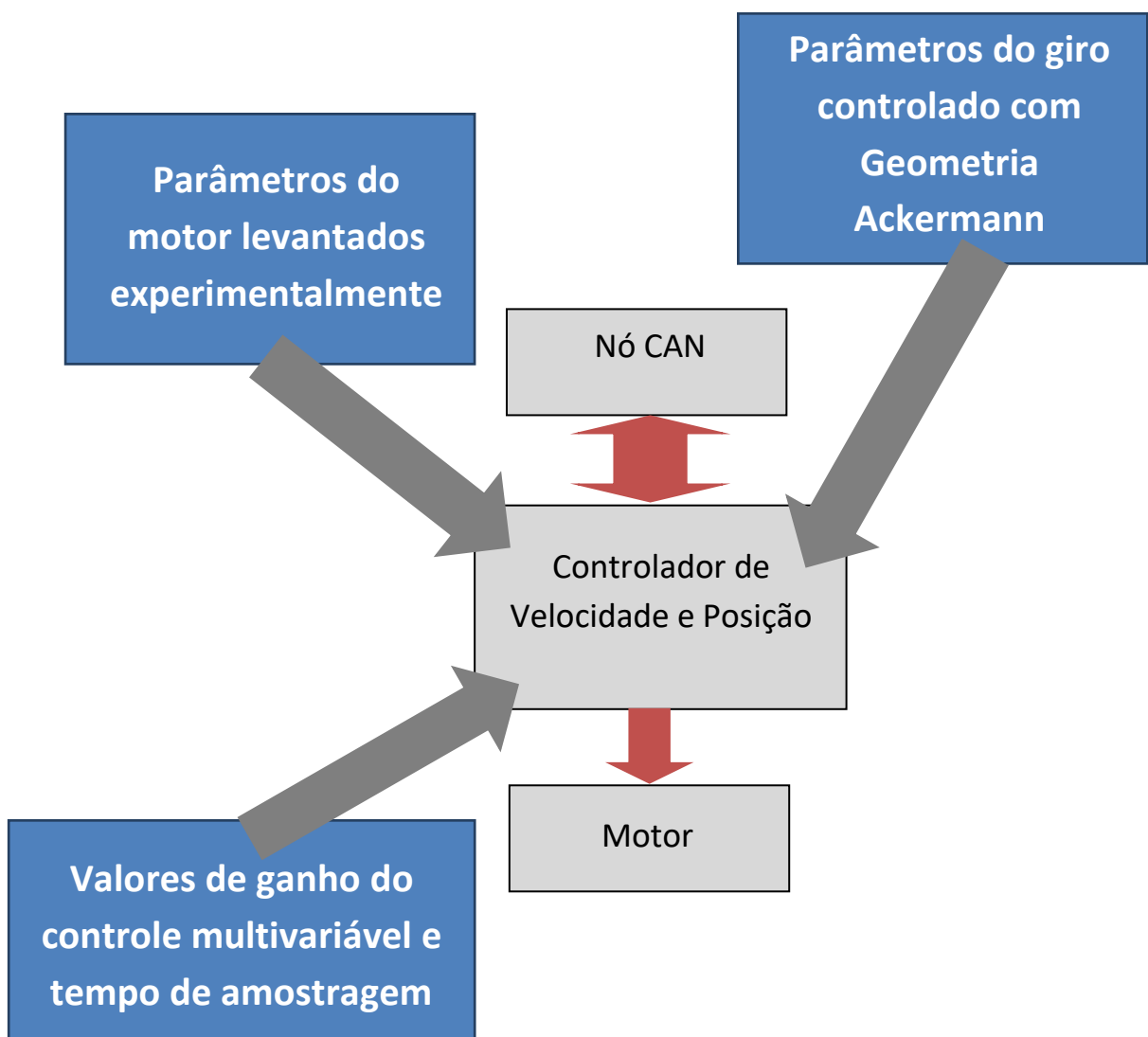
A IHM é utilizada para conduzir o RAM manualmente.

O cerne desta camada é o Controlador Principal, responsável por coordenar a velocidade de giro das rodas e seu esterçamento baseado na Geometria de Ackermann. Ele está sendo programado para abstrair o hardware da camada de controle de locomoção e esterçamento e a complexidade no processo de coordenação das rodas. Ele também define uma interface de software padronizada de acesso ao hardware e ao software dessa camada.

Nos Controladores (placas controladoras de velocidade e posição) são programados os algoritmos de controle de cada motor levando em conta, conseqüentemente, os parâmetros físicos dos mesmos (parâmetros levantados neste trabalho).

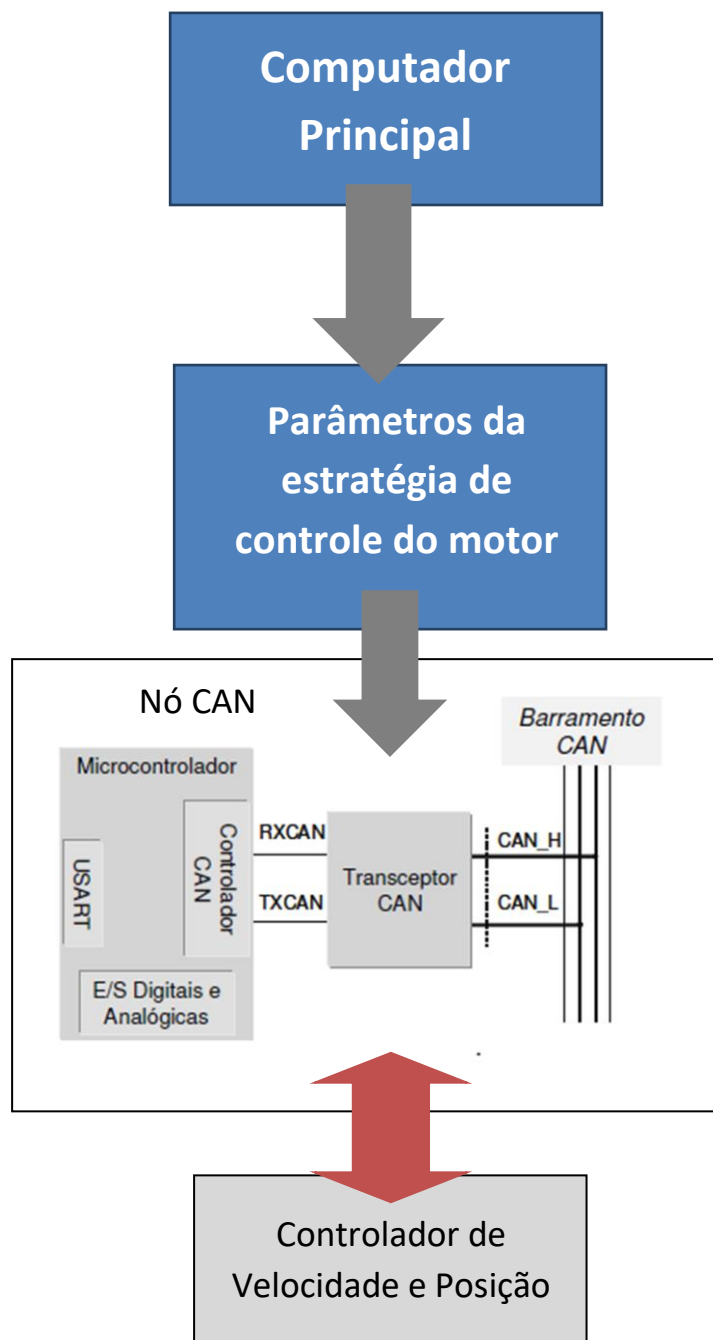
A figura a seguir ilustra esta funcionalidade.

Figura 72 - Configuração dos Controladores



A programação destes parâmetros nos controladores é dinâmica, ou seja, o Nó CAN pode fornecer valores que mudam dinamicamente, aos controladores, permitindo estratégias de controle diferenciadas. Através do Nó CAN, o controlador principal pode, em momentos distintos do controle de trajetória, mudar dinamicamente estes parâmetros, enviando-os aos controladores pelo barramento CAN. Este envio segue o protocolo padrão ISO11898 2.0B, com mensagens no padrão SAE J1939. Na figura abaixo, este procedimento é ilustrado.

Figura 73 - Estrutura de atuação do controlador



Então, a fim de se obter os parâmetros dos controladores para que ele, posteriormente, seja implementado em Nós CAN, levantaram-se os dados experimentais referentes ao motor e calcularam-se os ganhos e tempos ótimos de amostragem. A partir destes dados obtidos experimentalmente, modelaram-se as funções de transferência do sistema de tração e esterço do RAM, pois a partir destas torna-se possível estimar o funcionamento dos sistemas dado uma entrada. Com a utilização das funções de transferência calculadas, aferiram-se os parâmetros do controlador no espaço de estados para o funcionamento ótimo e estável dos sistemas em relação ao que se propõe em projeto.

Portanto, com a aplicação da geometria de Ackermann para o RAM em conjunto aos parâmetros de estratégia ótimos para o controlador, pode-se implementar o controlador de velocidade e esterço no sistema robótico.

5. CONCLUSÕES

Inicialmente, realizou-se a modelagem dos sistemas mecânicos. No que se refere ao sistema de esterço, a modelagem teórica atendeu satisfatoriamente ao que se propõe se comparado ao experimento realizado, isto é, todos os valores de sua simulação no ambiente Simulink estão dentro de uma margem da validação real em decorrência da baixa velocidade angular em que o RAM é executado. De modo análogo, o modelo teórico proposto para a tração do veículo autônomo foi validado por conta da comparação de sua simulação no Simulink com a experimentação realizada, pois os valores no tempo também se encontraram dentro de uma margem de erro gerada pelas baixas velocidades que o RAM opera.

Em decorrência da validação dos modelos teóricos, sucedeu-se o projeto do sistema de controle dos sistemas. Ambos os modelos apresentaram como requisitos de projeto uma velocidade de estabilização máxima de 0,3s em conjunto a um sobressinal máximo de 10%. Dentro destes padrões, projetaram-se dois modelos de controle no espaço de estados pelo método de alocação de polos em que as matrizes calculadas Kester e Ktracao para o controle multivariável façam com que os sistemas funcionem de forma estável e que desempenhem de acordo com as especificações de projeto.

Ao que se refere do uso da Geometria de Ackermann, foi obtido êxito nos cálculos das relações de angulação e velocidade entre as rodas do veículo se comparado ao que se esperava, e sua simulação no Matlab apresentou bons dados para o prosseguimento do ótimo funcionamento do veículo autônomo RAM.

REFERÊNCIAS

BEKEY, G. A. *Autonomous Robots: From Biological Inspiration to Implementation and Control*. Cambridge, USA: The MIT Press, 2005. p. 577.

FELÍCIO, L. C. *Modelagem da dinâmica de sistemas e estudo da resposta*. São Carlos: RiMa, 2010.

FREITAS, R. R. *Estudo de uma estrutura em pórtico para utilização em um veículo agrícola autônomo*. Dissertação de Mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos - SP, 2008. p. 93.

GRIEPENTROG H. W.; ANDERSEN N. A.; ANDERSEN J. C.; BLANKE M.; HEINEMANN O.; MADSEN T. E.; NIELSEN J.; PEDERSEN S. M.; RAVN O.; WULFSOHN D. *Safe and reliable: further development of a field robot*, Precision agriculture, 09: papers presented at the 7th European conference on precision agriculture, Wageningen, The Netherlands, 6-8 July 2009. p. 857-866.

KLOSE, R., MOLLER, K., VIELSTADTE, C., RUCKELSHAUSEN, A. *Modular system architecture for individual plant phenotyping with an autonomous field robot*, Proceedings of the 2nd International Conference on Machine Control & Guidance, March 9-11, 2010, p. 299-307.

MARCHI, J. *Navegação de robôs móveis autônomos: estudo e implementação de abordagens*. Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC, 2001.

NISE, N. S. *Engenharia de sistemas de controle*. Rio de Janeiro: LTC 2002.

OGATA, K. *Engenharia de Controle Moderno*. 5ª Edição. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011.

RAJAMANI, R. Vehicles Dynamics and Control, Springer. USA. 2006.

ROSA, A.; MOMBACH, E.A.; BREGALDA, R. Controle de velocidade de motor CC e tacogenerador. Artigo científico - Instituto Federal de Santa Catarina – SC, 2013.

RUCKELSHAUSEN, A.; BIBER, P.; DORNA, M., et al.: “BoniRob – an autonomous field robot platform for individual plant phenotyping”, Joint International Agricultural Conference JIAC 2009 Wageningen

SAVAGE. Suportive autonomous vehicle for agriculture. Disponível em:
<<http://www.savage.gr/about.html>> Acesso em: 18/12/2015.

SINGH, B.; PAYASI, R.P.; VERMA, K.S. ; KUMAR,V.; GANGWAR, S. Design of Controllers PD, PI &PID for Speed Control of DC Motor Using IGBT Based Chopper. Paper - GERMAN JOURNAL OF RENEWABLE AND SUSTAINABLE ENERGY RESEARCH (GJRSER). Singh, et al., Vol. 1, Issue.1, pp. 29-49, 2013.

SORENSEN, C. A. G., PESONEN, L., BOCHTIS, D., VOUGIOUKAS, S. G., & SUOMI, P. Functional requirements for a future farm management information system. Computers and Electronics in Agriculture, 2011. 76(2), p. 266-276.

SOUSA, R. V. CAN (Controller Area Network): an approach to control and automation in agricultural area (In Portuguese). São Carlos: EESC-USP, 2002. 94 p. Master dissertation.

TABILE, R. A.; GODOY, E. P.; PEREIRA, R. R. D.; TANGERINO, G. T.; PORTO, A. J. V.; INAMASU, R. Y. (2011). Design and development of the architecture of an agricultural mobile robot. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.31, n.1, p.130-142, jan./fev., 2011.

TORRES, C. J. ; ARCHILA, J. F.; BECKER, M.; TRONCO, M. L.; TIBERTI, A. J. ;
PORTO, A. J. V. Cinemática directa de una plataforma robótica para agricultura. In: Anais do
XI Congreso Internacional de electrónica y tecnologías de avanzada, Pamplona, 2012.

VU, H.V.; ESFANDIARI, R.S. Dynamic systems: modeling and analysis. 1ª Edition. USA:
McGraw-Hill, 2003.

WEISS, U.; BIBER, P. Plant detection and mapping for agricultural robots using a 3D-lidar
Sensor. Proceedings of the 4th European Conference on Mobile Robots, September 2009, p
205-210

ZANATTA, A.F; GODOY, E.P; PORTO, A.J.V. Simulação, análise e controle de motor de
corrente contínua utilizando um sistema de controle via rede CAN. Proceedings of the 9th
Brazilian Conference on Dynamics Control and their Application, 2010.