



# ELETROMECAÂNICA DE UM MINIVEÍCULO ELÉTRICO MULTITRAÇÃO (ADAPTAÇÕES E ENSAIOS)

Palavras-Chave: VERDE, ADAPTAÇÃO MECÂNICA, CAD

Autores:

GUSTAVO WYATT VARGA, FEM – UNICAMP

Prof. Dr. ELY CARNEIRO DE PAIVA (orientador), FEM – UNICAMP

Dr. MAURO KOYAMA (coorientador), FEM – UNICAMP

## INTRODUÇÃO

O projeto Fapesp Auto-VERDE (2018-2020) objetivou o desenvolvimento das abordagens de controle e navegação “off-road” do veículo para serem testados posteriormente em um veículo em escala, visando no futuro veículos de porte maior, como tratores e máquinas agrícolas (Morton, 2004).

A plataforma do VERDE é baseada em um veículo em escala rádio controlado disponível comercialmente. O veículo possui diversas adaptações, como reprojeção da suspensão dianteira, remoção do rádio controle, do motor a combustão e do diferencial mecânico e criação de um novo sistema de tração e direção, utilizando a direção Ackermann.

A proposta desse trabalho de IC é apoiar o projeto mecânico e o aperfeiçoamento tecnológico do

miniveículo elétrico com tração independente nas duas rodas traseiras do **Projeto\_VERDE – Veículo Elétrico Robótico com Diferencial Eletrônico** da FEM.

O objetivo principal é apoiar as adaptações mecânicas necessárias do projeto mecânico (CAD), incluindo adaptações no veículo para aumentar a bitola traseira, confeccionar rodas prototipadas para situação de baixa aderência, realização de ensaios e testes elementares com os sensores de velocidade e aceleração do veículo.

Dentro dos objetivos citados, as atividades do projeto podem ser divididas em etapas de acordo com o plano de trabalho, sendo **1)** Estudo do Projeto mecânico do veículo multitração e acompanhamento do projeto VERDE; **2)** Estudo dos modelos cinemático/dinâmico e direção Ackerman;

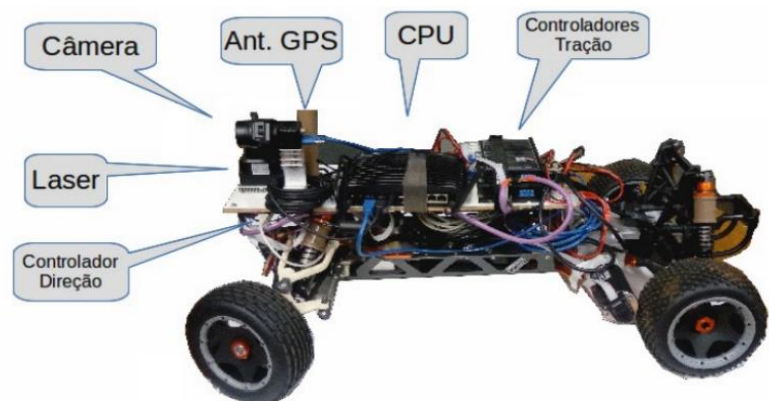


Figura 1 - Estrutura básica do VERDE

**3)** Projeto em CAD para adaptação dos eixos e bitola traseira do veículo; **4)** Fabricação/Implementação da adaptação mecânica de alteração de bitolas; **5)** Projeto em CAD e fabricação de novas rodas de baixa aderência para os veículos; **6)** Ensaios de navegação, para validação da nova configuração de eixos e rodas, e aquisição de sinais.

## METODOLOGIA

O consolidado projeto VERDE, possui uma vasta bibliografia desenvolvida ao longo da vida do projeto. Houve então, disponibilidade de materiais de estudo sobre o veículo, podendo destacar o Manual do Verde (Koyama et al., 2021) com explicações do hardware, software e uso do VERDE.

O modelo cinemático de 4 rodas, para o caso de operação planar (pista plana) e levando em consideração direção Ackermann são considerados no sistema de controle do veículo.

Os modelos cinemáticos, não fornecem uma informação precisa do movimento do veículo quando se considera velocidades elevadas e raios de curvatura ou condições de aderência variáveis, bem como inclinações de terreno. Nesses casos, é imprescindível o uso de modelos dinâmicos. (Gatti, 2016). Então como forma de embasamento teórico para entendimento do controle e softwares do veículo, estudou-se modelagem dinâmica para um veículo com 4 rodas.

O modelo para o cálculo das forças de contato pneu-solo é interessante para o projeto de roda de baixa aderência, porém este cálculo é complexo e envolve uma grande quantidade de parâmetros. Existem vários modelos para cálculo, porém o modelo de *Pacejka*, que indica a força ou momento aplicado no pneu, foi adotado na modelagem do VERDE.

$$y_{ij}(x) = D \sin[C \operatorname{atan}(Bx - E(Bx - \operatorname{atan}(Bx)))]$$

**Equação 1 - Fórmula geral de Pacejka**

Outro modelo cinemático estudado. Utilizado para fins de controle, uma primeira abordagem considera o modelo comumente usado e denominado de bicicleta, onde as duas rodas de cada eixo são representadas apenas por uma roda central, o que supõe um veículo simétrico, com movimento em um plano (2D). (Gatti, 2016)

Nota-se que em todos os modelos apresentados, pressupõe que as bitolas traseira e dianteira possuem o mesmo tamanho no qual é caracterizado por uma variável dentro do modelo. Isso mostra que a característica original do VERDE, no qual a bitola dianteira é maior que a bitola traseira, apresenta discrepância com os modelos utilizados no controle/simulação do veículo, ou seja, essa diferença de tamanho resulta em erros no resultado final. Portanto, isso motiva criar uma solução para estender a bitola traseira para igualar seu tamanho à bitola dianteira, de forma a manter o veículo no padrão e mais próximo aos modelos.

A adaptação mecânica projetada para correção sobre a bitola deve fornecer um aumento de 60 mm para a bitola traseira, dada as medições feitas no veículo.

Bitola Dianteira	446 mm
Bitola Traseira	386 mm
<b>Extensão necessária</b>	<b>446 – 386 = 60 mm</b>

**Tabela 1 - Medições de bitola do VERDE**

Afim de estudar o comportamento do sistema de controle do veículo em terrenos escorregadios, necessitou-se de adaptação mecânica ao veículo, este sendo a instalação de rodas com baixa aderência ao solo (baixo coeficiente de atrito), para tal projeto o uso de rodas de superfície lisa e pouca deformação é interessante, por conta de seu baixo coeficiente de atrito com o solo.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A adaptação mecânica projetada para o aumento de bitola, foi a aplicação de um espaçador entre o eixo traseiro e a roda de cada lado. Projetado no CAD, a solução mais adequada foi utilizar o modelo de uma peça de junta já presente no carrinho que tem a função de fixar a roda ao eixo. A partir do modelo, a cabeça da peça foi estendida em 30 mm, para efetuar o aumento necessário da bitola.

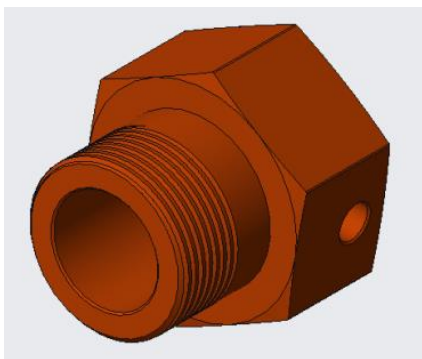


Figura 2 - Peça de junta original

Após a modelagem, foi criado o desenho técnico com as respectivas cotas da peça para fabricação do espaçador. Solicitando à oficina da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP, foram fabricados em alumínio pelos técnicos da oficina 4 espaçadores, assim foram instalados no veículo. Por meio de medições da bitola com os espaçadores, pôde-se validar a solução, tornando o tamanho das bitolas o mesmo.

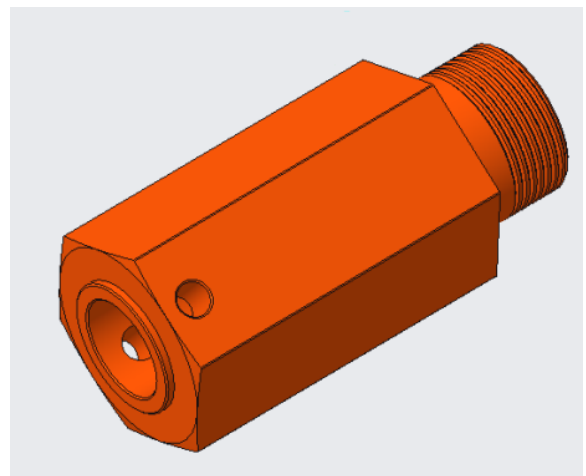


Figura 3 - Espaçador derivado da junta

Outra adaptação mecânica necessária do projeto, são rodas que permitem simular condições de terreno escorregadio para realização de ensaios. A solução pensada mais adequada e factível, seria a criação de rodas finas, fabricadas por meio de impressão 3D, no qual possuem uma interface de borracha que seja facilmente substituída. Com isso, desenvolveu-se um projeto CAD para ser usado com uma polia de borracha com baixa deformação, de forma que a polia encaixe na roda, e seja fixada por um aro externo que se prende na roda por meio de parafusos e porcas.



Figura 4 - Espaçadores para a bitola traseira

As porcas são fixadas por meio de cavidades hexagonais na roda, e os parafusos encaixam no aro externo e nas porcas, assim fixando o conjunto.

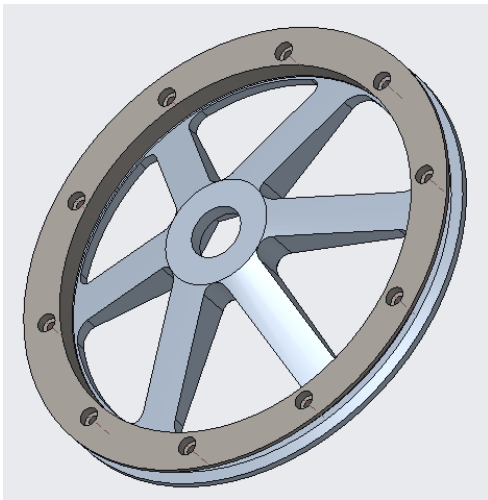


Figura 5 - Modelo no CAD da roda e aro



Figura 6 - Conjunto de rodas montadas com a polia

Por fim para realização de ensaios com escorregamento, mostra-se a instalação das rodas finas juntamente com os espaçadores da bitola. Como forma de ensaio preliminar no laboratório, o carrinho efetuou um trajeto em linha reta partindo do repouso até atingir a velocidade de 1,5 m/s e frear rapidamente (controlado por um joystick intermediado pelo sistema em ROS, *Robot Operating System*). Os dados de velocidade do veículo durante o ensaio preliminar, foram obtidos pela IMU (*Inertial Measurement Unit*) e pelos encoders dos motores. Plotando-se as velocidades na figura 10 (IMU em vermelho, roda esquerda em azul e roda direita em preto) verifica-se uma pequena distância e alguns picos entre a velocidade de cada roda e a velocidade a partir da aceleração medida pela IMU onde a aceleração é positiva, que pode ser interpretada como pequenos escorregamentos por parte das rodas, pois caso não houvesse escorregamento a velocidade de cada roda deveria seguir a aceleração, também o perfil das curvas de cada roda deveriam ser os mesmos, indicando a mesma velocidade em cada roda como indica-se no trecho onde a aceleração é negativa.

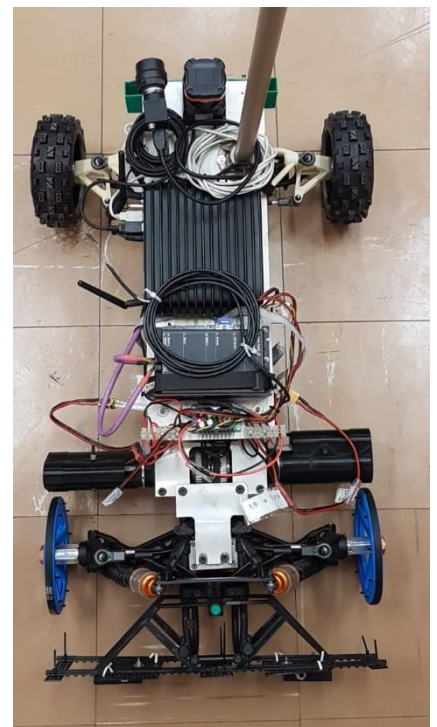


Figura 7 - VERDE com rodas de baixo atrito e espaçadores

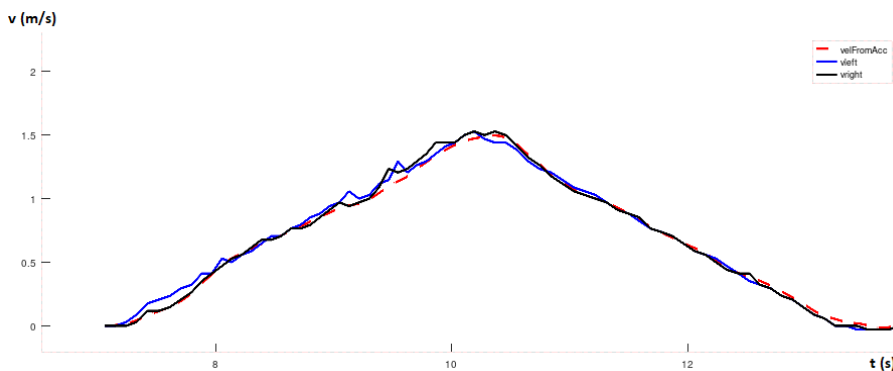


Figura 8 - Gráfico das velocidades das rodas e da IMU no ensaio preliminar

## CONCLUSÃO

As adaptações mecânicas desenvolvidas mostraram-se soluções adequadas aos problemas propostos. As especificações mecânicas do veículo se mostram mais adequadas aos modelos de controle utilizados após a alteração do tamanho da bitola traseira, para a mesma dimensão da bitola dianteira, diminuindo erros no controle de navegação do veículo. Sobre a roda de baixo coeficiente atrito, no resultado preliminar e inspeção visual do ensaio, nota-se o potencial de escorregamento desta solução, tornando possível posteriormente, estudos sobre o controle de navegação em terrenos escorregadios.

---

## BIBLIOGRAFIA

[Morton, 2004] - Morton, Mark A. "Traction Control Study for a Scaled Automated Robotic Car. Master Thesis", Virginia Polytechnic Institute and State University, 2004.

[Koyama et al., 2021] Koyama, M. F.; Santa Bárbara, A.; Mastelari, N. "Manual do Veículo Robótico em Escala – VERDE". Novembro de 2021.

[Gatti, 2016] Gatti, P. A. N. "Apoio ao Projeto Mecânico de Desenvolvimento de um Miniveículo Elétrico Robótico", FEM/UNICAMP. 7 de Fevereiro de 2016.

Ribeiro, A.M.; Fioravanti, A., Moutinho, A., **de Paiva, E.C.** "Nonlinear state-feedback design for vehicle lateral control using sum of squares programming". *Vehicle System Dynamics*. Vehicle System Dynamics, 2022, DOI: [10.1080/00423114.2020.1844905](https://doi.org/10.1080/00423114.2020.1844905)

Ribeiro, A.M., M.F. Koyama, A. Moutinho, **E.C. de Paiva**, A.R. Fioravanti. "A comprehensive experimental validation of a scaled car-like vehicle: Lateral dynamics identification, stability analysis, and control application", *Control Engineering Practice*, Vol. 116, 2021, 104924, ISSN 0967-0661, <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2021.104924>.

Cordeiro, Rafael A.; Victorino A.; Azinheira J R; Ferreira, P.A.V.; **de Paiva, E.C.**; Bueno, S. S. "Estimation of Vertical, Lateral, and Longitudinal Tire Forces in 4-Wheel Vehicles Using a Delayed Interconnected Cascade-Observer Structure". *IEEE-ASME Transactions on Mechatronics*, Vol.24, Issue 2, April, 2019. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2019.2899261>.

Cordeiro, R. A., Victorino, A., Valente, P.A.V., **de Paiva, E.C.**, Bueno, S.S. (2016). "Estimation of Tire-Ground Interaction Forces Using UKF Observers in a Delayed Interconnected Cascade Structure". *IROS State Estimation and Terrain Perception for All Terrain Mobile Robots Workshop, 2016, Korea (to be presented, October 2016)*.

Cordeiro, R. A., Victorino, A., Valente, P.A.V., **de Paiva, E.C.**, Bueno, S.S. (2016). "Estimação de Forças de Interação Pneu-Solo com Estrutura de Observadores Interconectados para um Veículo Elétrico de 4 Rodas". In: XXI Congresso Brasileiro de Automática, 2016, Vitória, Espírito Santo. Anais do XXI Congresso Brasileiro de Automática, 2016. (to be presented, October 2016).

Cordeiro, Rafael A. ; Bueno, S. S. ; Azinheira, José Raul ; **de Paiva, Ely Carneiro** ; Meirelles, P. S. ; Vivan, R. ; Azevedo H. ; Koyama, M. F. "Determinação Experimental de Parâmetros para a Modelagem Dinâmica de um Veículo Robótico Terrestre". In: 20<sup>o</sup>. *Congresso Brasileiro de Automática*, 2014, Belo Horizonte.

Koyama, M. F. ; Azinheira, J R ; Cordeiro, Rafael A. ; Ramos, J. J. G. ; **de PAIVA, E. C.** ; Mirisola, L. G. ; Azevedo H. ; Bueno, S. S. "Controle de Velocidade em Veículos Robóticos Elétricos Acionados por Dois Motores Independentes". In: *XI SBAI 2013 - Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*, 2013, Fortaleza