

Integração de Subsistemas em Veículos Elétricos Híbridos Série

Thayson Alves¹

Orientadora: Vilma Alves de Oliveira²

¹a.thayson@usp.br, ²voliveira@usp.br

^{1,2}EESC/Universidade de São Paulo

1 Objetivos

O presente projeto de iniciação científica tem como objetivo integrar os subsistemas de um veículo híbrido elétrico série (VHES), como mostra a Figura 1, no qual um motor de combustão interna (MCI) aciona um gerador que, por meio de um conversor CA/CC, carrega as baterias responsáveis pela alimentação dos motores elétricos BLDC que propulsionam o veículo. O foco do trabalho é compreender e gerenciar os subsistemas do VHES, abordando desde a dinâmica de condução até a operação dos sistemas de propulsão elétrica, incluindo diferencial eletrônico e frenagem regenerativa.

Além disso, esta pesquisa tem o destaque na operação do veículo virtual pelo condutor em laboratório com comandos do volante e dos pedais (via Logitech[®] G29) em tempo real pela bancada *Driver-in-the-Loop* (DiL) validada pelo renomado software automobilísticos CarSim[®].

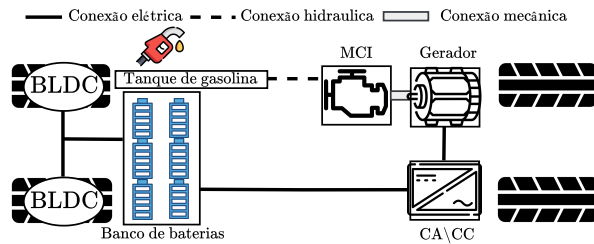


Figura 1: Arquitetura VHES. Fonte: Adaptado de (EHSANI et al., 2018).

2 Métodos e Procedimentos

O procedimento central consistiu na representação sistemática do veículo em condução por meio de um modelo de 7 graus de liberdade (do inglês, 7DOF), contemplando os movimentos longitudinal, lateral, de guinada e a rotação individual das quatro rodas. Nesse modelo, as forças longitudinais e laterais dos pneus são descritas pelo modelo de Dugoff (TORRES et al., 2024). A Figura 2 ilustra o sistema de coordenadas da dinâmica veicular em 7DOF e a influência das forças das rodas.

Em seguida, princípios de operação do VHES regem o foco principal desta pesquisa:

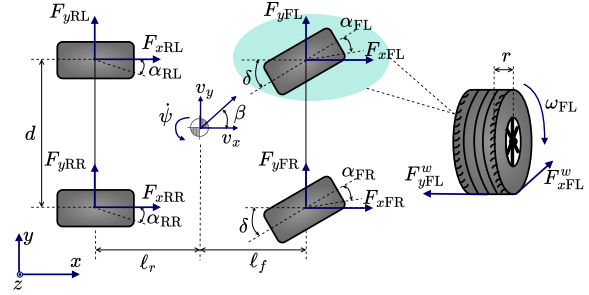


Figura 2: Sistema de coordenadas e análise de forças na dinâmica veicular com 7DOF. Fonte: Adaptado de (TORRES et al., 2024).

- Propulsão Elétrica:** responsável por converter energia elétrica em mecânica para a tração veicular. Utilizam-se motores BLDC, destacados por sua alta eficiência e facilidade de controle. Neste trabalho, esses motores (vide Figura 1) atuam nas rodas com controle em malha fechada de velocidade e corrente por meio de controladores Proporcional-Integral (PI).
- Diferencial Eletrônico:** contribui para a estabilidade veicular, evitando escorregamentos e reduzindo componentes mecânicos, o que resulta em menor massa e maior segurança. Neste projeto, adota-se uma estratégia baseada na geometria de Ackerman, impondo velocidades distintas aos motores BLDC durante curvas.
- Frenagem Regenerativa:** permite que os motores atuem como geradores, convertendo parte da energia cinética em elétrica para recarga das baterias. Neste trabalho, considera-se sua aplicação na redução da velocidade do veículo, destacando o impacto direto no estado de carga da bateria (SoC), sobretudo em frenagens bruscas.

Os métodos utilizados neste projeto consiste na utilização do MATLAB[®] e Simulink[®], garantindo consistência e viabilidade dos modelos estudados.

3 Resultados

A consolidação da dinâmica veicular foi testada e validada com o software CarSim[®] com a simulação *Double Lane Change* usada nos padrões internacionais como a ISO 3888-2 como mostra a Figura 3a com um coeficiente de determinação (R^2) médio de 94.28 % demonstrando a precisão e confiabilidade do modelo proposto. O modelo foi embarcado na Bancada DiL, como mostra a Figura 3b, para análise da integração dos subsistemas bem como uma análise visual com o *Simulink 3D Animation* promovendo uma interface realística e imersiva.

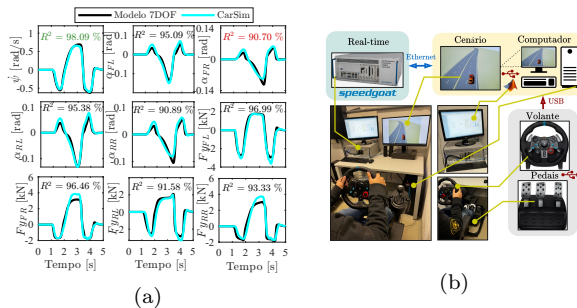


Figura 3: Bancada DiL no Laboratório de Controle na USP-São Carlos para validação em (a), e simulação em (b). Fonte: Autor.

A integração de subsistemas em VHES demonstram respostas positivas além de destacar a eficiência no gerenciamento do veículo como um todo. A Figura 4 mostra em (a) os sinais de aceleração e freio originado dos comandos do motorista na bancada DiL. Em (b) é exibido a velocidade longitudinal do veículo em condução, bem como a velocidade angular de cada roda trativa, com foco no efeito do diferencial eletrônico na produção de velocidade de rotação distintas em cada roda. Além disso, em (c) é exposto o efeito da frenagem regenerativa no aumento do SoC da bateria, efeito realizado pelo regeneração de potência, visto em (d), levando a uma recarga da bateria.

4 Conclusões

Este trabalho sintetiza a integração de subsistemas em um VHES, com ênfase na tração via motores BLDC, na estabilidade e segurança garantidas pelo diferencial eletrônico e na eficiência energética proporcionada pela frenagem regenerativa, todos embarcados em um modelo 7DOF na bancada DiL.

Como continuidade, serão avaliadas metodologias energéticas alternativas (células a combustível, su-

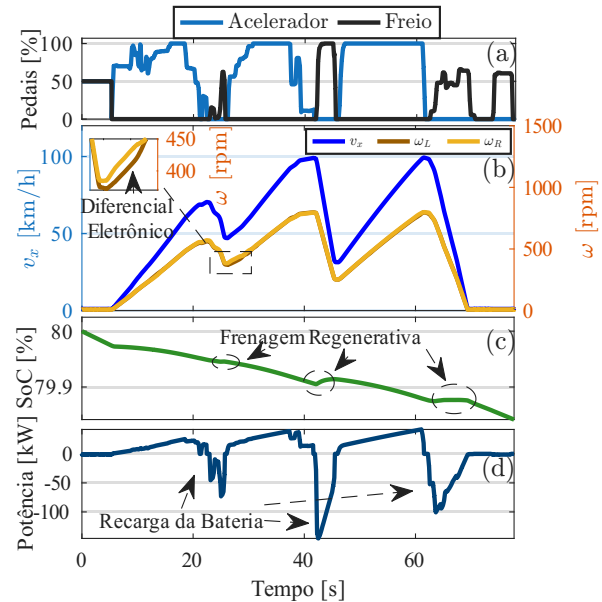


Figura 4: Resultados experimentais do veículo virtual desenvolvido no DiL. Fonte: Autor.

percapacitores e veículos plug-in), bem como novas estratégias de controle e gerenciamento de energia e tração.

Por fim, o projeto contribui para soluções frente à poluição sonora, à dependência de matrizes energéticas e à emissão de poluentes, reforçando o papel dos veículos elétricos na promoção de uma mobilidade urbana sustentável e eficaz.

Referências

EHSANI, M.; GAO, Y.; LONGO, S.; EBRAHIMI, K. **Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles**. [S.l.]: CRC press, 2018.

TORRES, L. A.; MURILO, A.; LOPES, R. V.; LEAL, V. Analysis and virtual validation of vehicle dynamics models for electronic stability control. **IEEE Latin America Transactions**, v. 22, n. 2, p. 166–172, 2024.

Este trabalho contou com o apoio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), por meio do processo nº 2024/20198-4, ao qual expresso minha sincera gratidão pelo fundamental suporte à execução desta pesquisa.

Responsabilidade pelas informações: O autor é o único responsável pelas informações incluídas neste trabalho.