

Análise e Simulação de um sistema de controle sobre o comportamento dinâmico da suspensão de um veículo *off-road* utilizando o modelo de um quarto do carro.

Thailane Carmo Silva¹, Fabiano Borges², Layse da Silva Inocêncio³, Rita de Cassia Souza de Queiroz Lopes⁴

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia, *Campus Jequié*

Resumo

Em competições *off-road* como o BAJA SAE BRASIL, os veículos enfrentam terrenos irregulares e diversos obstáculos, exigindo sistemas de suspensão eficientes para garantir desempenho e segurança. Este trabalho teve como objetivo analisar diferentes abordagens de controle de suspensão semi-ativo em comparação ao sistema passivo para melhorar a resposta dinâmica de veículos *off-road* em situações de condução em pistas desniveladas. A metodologia empregada consistiu na identificação do diagrama de massa-mola, seguido pelo desenvolvimento de uma modelagem matemática do sistema baseada no modelo de um quarto do carro, que representa a dinâmica veicular padrão para esse cenário. A modelagem foi implementada no ambiente *Simulink*, permitindo a análise da resposta transiente diante de perturbações. Além disso, foram utilizados diferentes padrões de pistas para avaliar a eficiência do controle no método semi-ativo. Foram considerados critérios de desempenho e estabilidade. Os resultados obtidos por meio da análise gráfica das respostas do sistema mostraram que a estratégia de controle no método semi-ativo apresentou um desempenho superior em comparação ao sistema passivo, especialmente quando submetido a perturbações em diferentes padrões de pistas. Isso demonstra que o controle semi-ativo é mais adequado para o uso no ambiente proposto. Adicionalmente, este estudo ressalta a importância da utilização de modelagem e simulação como ferramentas de apoio para a avaliação e seleção de estratégias de controle eficientes, especialmente ao considerar a análise da eficiência do controle em diferentes padrões de pistas. Outro aspecto importante abordado neste trabalho foi a análise da influência de diferentes parâmetros de controle no desempenho do sistema de suspensão. Foram realizadas simulações variando os valores de rigidez e amortecimento do sistema, e os resultados mostraram que ajustes adequados desses parâmetros podem levar a uma resposta ainda mais eficiente do sistema de suspensão.

Palavras-chave: Suspensão semi-ativa; Modelagem matemática; Desempenho dinâmico.

Abstract

In off-road competitions like BAJA SAE BRASIL, vehicles face uneven terrains and various obstacles, requiring efficient suspension systems to ensure performance and safety. This study aimed to analyze different approaches to semi-active suspension control compared to the passive system to improve the dynamic response of off-road vehicles in uneven track driving situations. The methodology employed consisted of identifying the mass-spring diagram, followed by developing a mathematical model of the system based on the quarter-car model, which represents the standard vehicle dynamics for this scenario. The modeling was implemented in the *Simulink* environment, allowing the analysis of the transient response to disturbances. Additionally, different track patterns were used to evaluate the efficiency of the control in the semi-active method. Performance and stability criteria were considered. The results obtained through graphical analysis of the system responses showed that the control strategy in the semi-active method performed better compared to the passive system, especially when subjected to disturbances in different track patterns. This demonstrates that semi-active control is more suitable for use in the proposed environment. Furthermore, this study highlights the importance of using modeling and simulation as support tools for evaluating and selecting efficient control strategies, especially when considering the analysis of control efficiency in different track patterns. Another important aspect addressed in this work was the analysis of the influence of different control parameters on the performance of the suspension system. Simulations were

carried out varying the stiffness and damping values of the system, and the results showed that proper adjustments of these parameters can lead to an even more efficient response of the suspension system.

Keywords: Semi-active suspension; Mathematical modeling; Dynamic performance.

1. Introdução

Veículos automotores *off-road* são classificados como 4x4 ou 4x2, dependendo se possuem tração nas quatro ou duas rodas, respectivamente (DINIZ et al., 2014). Essa classificação permite a locomoção eficaz em terrenos não pavimentados e melhora a aderência e o desempenho em condições adversas.

A tração em veículos *off-road* se refere à capacidade de transferir potência do motor para o solo (PACEJKA, 2005). Os "jipes" são emblemáticos nesse cenário, projetados para enfrentar obstáculos com ousadia e confiabilidade.

A evolução dos veículos *off-road* incluiu a popularização global de modelos como o jipe e o fusca (OLIVEIRA et al., 2023). Atualmente, as principais montadoras oferecem uma variedade de modelos com avanços tecnológicos.

A competição BAJA SAE BRASIL desafia equipes universitárias a projetar e construir veículos *off-road*, avaliando não apenas o desempenho em pista, mas também aspectos como projeto, custos e viabilidade de produção em série.

Maximizar o desempenho e a segurança dos veículos é fundamental para uma participação bem-sucedida nas competições (DINIZ et al., 2014). O comportamento dinâmico de um veículo *off-road* é determinante para sua eficiência, desempenho e segurança, especialmente em competições de alto nível como o BAJA SAE BRASIL.

Este trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento dinâmico da suspensão de um veículo *off-road* utilizando o modelo de um quarto de carro e analisar o desempenho de um sistema de controle sobre o comportamento dinâmico da suspensão. Será desenvolvida uma modelagem matemática para estabelecer uma representação precisa e detalhada do sistema veicular em análise.

2. Fundamentação teórica

2.1. Dinâmica veicular

Segundo Berto et al. (2015), a dinâmica veicular é um campo interdisciplinar importante que aborda o comportamento dos veículos em movimento. Compreender os princípios de engenharia e os

fenômenos físicos subjacentes à dinâmica veicular é crucial para o desenvolvimento de sistemas automotivos mais seguros, eficientes e confortáveis. A interação entre os pneus e o solo desempenha um papel fundamental na estabilidade e controle do veículo. Os pneus influenciam a aderência, a capacidade de resposta aos comandos do condutor e a manutenção da trajetória desejada. Além disso, a suspensão desempenha um papel crucial na absorção de vibrações e impactos causados pelas irregularidades da estrada.

Para compreender os três tipos de dinâmica veicular, a Figura 1 exibe um sistema de coordenadas implementado pela *Society of Automotive Engineers* (Sociedade de Engenheiros Automotivos - SAE International).

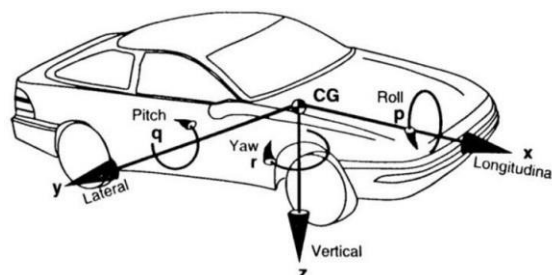


Figura 1. Sistema de eixo de veículo SAE. Fonte: Gillespie (2021).

O eixo vertical é denominado eixo z, o eixo longitudinal é denominado eixo x e o eixo lateral é denominado eixo y. O eixo z é positivo para cima, o eixo x é positivo para frente e o eixo y é positivo para a direita. A Figura 1 ilustra a orientação dos eixos e a direção positiva de cada um deles, fornecendo uma referência para a análise da dinâmica veicular em diferentes situações.

O modelo de um quarto de carro é uma representação simplificada da dinâmica veicular vertical, que considera a massa do veículo concentrada no centro de gravidade, e as molas e amortecedores representados por elementos lineares. A Figura 2 ilustra o modelo de um quarto de carro, onde M_s e M_u são as massas, K_s e K_t são as constantes de mola, C é a constante do amortecedor, X é o deslocamento vertical do veículo, F_{ext} é a força externa, quando aplicada ao veículo.

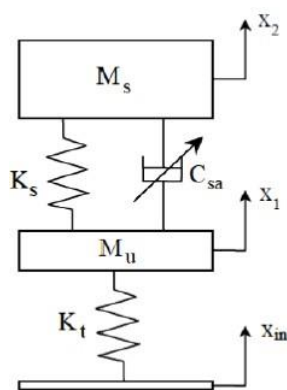


Figura 2. Modelo de um quarto de carro. Fonte: Ansari et al. (2017).

A equação genérica do movimento do sistema é dada pela equação Eq. 2.1:

$$M \ddot{x}(t) + C \dot{x}(t) + Kx(t) = F_{\text{ext}}(t) \quad (2.1)$$

2.2 SUSPENSÃO VEICULAR

A suspensão veicular é responsável por garantir estabilidade e conforto durante a condução. Segundo Ogata et al. (1998), ela é um sistema mecânico projetado para absorver as irregularidades do terreno, assegurando o conforto dos passageiros e a estabilidade do veículo. Existem dois tipos de suspensões: independentes e dependentes. As suspensões independentes permitem que as rodas se movam de forma independente, enquanto as suspensões dependentes mantêm as rodas interligadas. A Figura 3 (a) ilustra um sistema de suspensão independente.

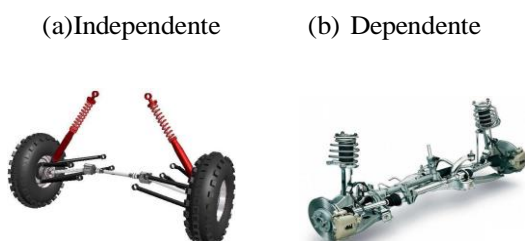


Figura 3. Sistema de suspensão independente e dependente. Fonte: a) DINIZ et al. (2014) b) Shojaeefard et al. (2017).

No âmbito da engenharia de sistemas mecatrônicos, a suspensão veicular é considerada um sistema dinâmico não linear, sujeito a modelagem matemática para análise e simulação. o. Mughal (2016) ressaltam que essa modelagem é essencial para o projeto de controladores destinados a aprimorar o desempenho e

o conforto do veículo. A simulação computacional, por exemplo, por meio do *software SCILAB*, torna-se uma ferramenta valiosa para analisar o comportamento dinâmico da suspensão, permitindo a avaliação de diferentes configurações e parâmetros de amortecimento (Ogata et al. (1998).

2.3 Principais elementos da suspensão

As suspensões automotivas são compostas por elementos essenciais como molas, amortecedores, barras estabilizadoras e braços de controle. Segundo Dixon (2009), as barras estabilizadoras são importantes para minimizar o rolamento do veículo durante curvas, influenciando a estabilidade lateral. A rigidez e geometria dessas barras podem ser ajustadas para otimizar o desempenho. Quanto aos braços de controle, eles afetam a cinemática da suspensão e a capacidade de manter o contato das rodas com o solo, especialmente em terrenos irregulares, como mencionado por Dixon (2009). As molas, conforme discutido por Acosta et al. (2017), são responsáveis por absorver choques e responder às irregularidades do terreno. A combinação adequada com os amortecedores é essencial para otimizar a resposta da suspensão em terrenos acidentados e em competições off-road.

2.4 Tipos de suspensão

Azevedo (2013) propõem uma classificação das suspensões automotivas com base na presença de fontes adicionais de energia, dividindo-as em passivas, semi-passivas e ativas. As suspensões passivas, utilizam fontes não controladas de energia, como molas e amortecedores, oferecendo uma resposta reativa às irregularidades da estrada. Por outro lado, as suspensões semi-ativas, ajustam o fator de amortecimento de maneira variável, adaptando-se às necessidades e cargas do sistema. Já as suspensões ativas, substituem componentes passivos por atuadores e sensores, permitindo um controle proativo e contínuo do comportamento da suspensão. Essa variedade de sistemas proporciona diversas opções para otimizar o desempenho veicular em diferentes condições de operação.

2.5 Sistema de controle aplicado a suspensão de um automóvel

Nise (2012) destaca a presença de sistemas de controle em diversas áreas, desde o lançamento de foguetes até o funcionamento de veículos autônomos, ressaltando paralelos com sistemas biológicos, como o pâncreas que regula os níveis de açúcar no sangue. O autor define um sistema de controle como uma composição de subsistemas e processos, enfatizando a importância de estruturas organizadas para alcançar saídas desejadas com desempenho específico. Medidas como

resposta transitória e erro em regime permanente são cruciais para avaliar a eficácia do sistema.

Milliken et al. (1995) contribuem com discussões sobre a influência da geometria da suspensão na transferência de carga e outros aspectos relacionados à dinâmica da suspensão. Eles baseiam-se em princípios de engenharia e matemática aplicada para oferecer uma compreensão profunda dos modelos de suspensão e seu impacto no desempenho do veículo.

O controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo) é amplamente utilizado em sistemas de controle automático devido à sua capacidade de ajustar a resposta do sistema de acordo com as necessidades específicas, proporcionando estabilidade e precisão.

2.6 Software para simulação

A realização de análises matemáticas sem o uso de software enfrenta desafios significativos devido à complexidade inerente dos procedimentos manuais. A manipulação direta de equações e a execução de cálculos complexos não só consomem tempo, mas também aumentam a probabilidade de erros, especialmente em contextos que envolvem sistemas dinâmicos e modelagem, onde as interações entre variáveis são complexas e exigem uma compreensão profunda. Nesse cenário, o uso de software especializado, como o *MATLAB/Simulink*, torna-se essencial para simplificar e acelerar o processo analítico, reduzindo as dificuldades inerentes a essas análises.

O *MATLAB/Simulink*, conforme destacado por Reza (2008), é uma poderosa plataforma de software desenvolvida pela MathWorks, que combina a linguagem de programação de alto desempenho *MATLAB* com um ambiente gráfico de modelagem e simulação chamado Simulink. Esta ferramenta é amplamente utilizada em disciplinas como engenharia, matemática e ciências computacionais, permitindo a modelagem, simulação e análise de sistemas dinâmicos complexos em diversos domínios, desde circuitos elétricos até a dinâmica de veículos.

Além disso, conforme observado por El-Sayegh et al. (2019), o *MATLAB/Simulink* demonstrou sua capacidade de prever o comportamento de pneus em diferentes tipos de terreno, antecipando características como a capacidade de tração, rigidez vertical e desempenho em curvas. Em um projeto específico desenvolvido pelos autores, o *MATLAB/Simulink* desempenhou um papel fundamental no desenvolvimento e validação de um pneu rígido, ilustrando assim a versatilidade e eficácia dessa ferramenta em aplicações de engenharia complexas.

3. Metodologia

O processo de desenvolvimento do estudo envolveu três etapas principais: (1) identificação do diagrama de massa-mola, (2) modelagem matemática do sistema e (3) simulação computacional no ambiente *simulink* com comparação entre as estratégias de controle. A Figura 4 ilustra o fluxograma da metodologia adotada.



Figura 4. Etapas principais da metodologia. Fonte: Autores (2024).

Para obter uma visão mais detalhada dessas etapas, foram criados alguns fluxogramas, os quais podem ser consultados no apêndice.

3.1 Identificação do diagrama de massa-mola

A primeira etapa consistiu na identificação do diagrama de massa-mola do sistema veicular, considerando a massa do veículo, as constantes de mola e amortecedor, e a força externa aplicada.

A partir do diagrama, Figura 2, foi possível identificar os componentes do sistema de suspensão e suas interações, permitindo a elaboração de um modelo matemático preciso e detalhado.

3.2 Modelagem matemática do sistema

A modelagem do sistema foi realizada com base no modelo de um quarto de carro, considerando os parâmetros abordados anteriormente na Eq. 2.1. As equações de movimento do sistema foram obtidas a partir da segunda lei de Newton, conforme a Eq. 3.1 e a Eq. 3.2.

$$M\ddot{x}_2(t) + C(\dot{x}_2 - \dot{x}_1)(t) + Ks(x_2 - x_1)(t) = 0 \quad (3.1)$$

$$M\ddot{x}_1(t) + C(\dot{x}_1 - \dot{x}_2)(t) + Ks(x_1 - x_2)(t) + Kt(x_1 - x_0)(t) = 0 \quad (3.2)$$

3.3 Simulação computacional no ambiente *simulink*

A modelagem matemática do sistema foi implementada no ambiente *simulink*, permitindo a simulação computacional da resposta transiente do sistema diante de perturbações. Foram realizadas simulações para as estratégias de controle semi-ativo e

passivo, com análise comparativa dos resultados obtidos. A Figura 5 ilustra a simulação computacional no ambiente *simulink*.

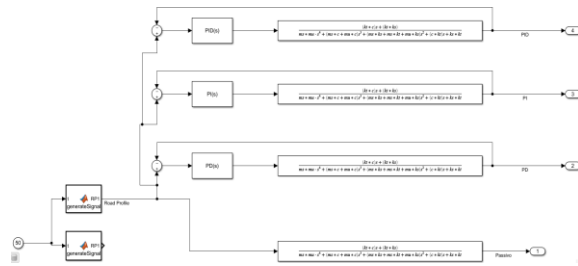


Figura 5. Simula o computacional no ambiente *simulink*. Fonte: Autores (2024).

4. Resultados e discussões

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos a partir da simulação computacional no ambiente *simulink*, com análise comparativa entre as estratégias de controle semi-ativo e passivo.

4.1 Identificação do diagrama de massa-mola

Os dados obtidos e utilizados para o diagrama de massa-mola foram retirados do relatório de entregáveis do projeto Sun City Baja. A Figura 6 apresenta os valores das constantes de mola e amortecedor utilizados na modelagem do sistema, além das massas do mesmo.

Parâmetros do quarto de carro	1/4 de carro	Total	Variável
Peso não suspenso dianteiro	10,658	21315	Mu
Peso suspenso	43,791	175,164	Ms
Rigidez da suspensão dianteira	8 N/m	8 N/m	Ks
Rigidez vertical do pneu dianteiro	40,001 N/mm	40,001 N/mm	Kt
Coefficiente de amortecimento	26.204 N.s/m	26.204 N.s/m	C

Figura 6. Parâmetros do sistema de suspensão. Fonte: Autores (2024).

4.2 Modelagem matemática do sistema

A modelagem matemática do sistema foi realizada com base nas equações de movimento apresentadas anteriormente na Eq 3.1 e Eq 3.2. A partir do diagrama de corpo livre aplicado ao modelo de um quarto de carro, foi possível obter as equações diferenciais que descrevem o comportamento dinâmico da suspensão. A Figura 7 ilustra o diagrama de corpo livre em cada massa do sistema.

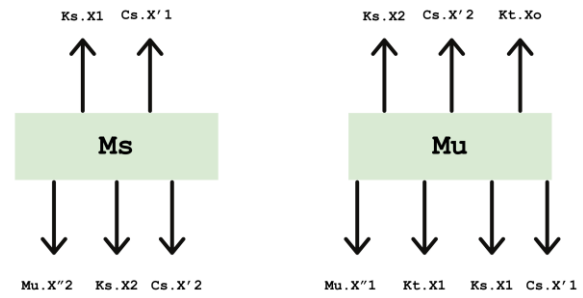


Figura 7. Diagrama de corpo livre do sistema de suspensão. Fonte: Autores (2024).

Aplicando a segunda lei de Newton, as equações de movimento do sistema foram obtidas, utilizando a transformada de Laplace para foi possível obter as equações no domínio da frequência. As Eq 4.1 e Eq 4.2 representam as equações de movimento do sistema no domínio da frequência.

$$MsX_2S^2 + C(X_2 - X_1)S + Ks(X_2 - X_1) = 0 \quad (4.1)$$

$$MuX_1S^2 + C(X_1 - X_2)S + Ks(X_1 - X_2) + Kt(X_1 - X_0) = 0 \quad (4.2)$$

Onde:

X_0 = deslocamento do solo

X_1 = deslocamento da massa não suspensa

X_2 = deslocamento da massa suspensa

Ms = massa suspensa

Mu = massa não suspensa

Ks = constante da mola suspensa

Kt = constante da mola não suspensa

C = constante do amortecedor

4.3 Função de transferência

A partir das equações de movimento do sistema, foi possível obter a função de transferência que descreve a relação entre a entrada e a saída do sistema, conforme Figura 8. A função de transferência é uma ferramenta fundamental na análise de sistemas dinâmicos, permitindo a avaliação de sua resposta em diferentes condições de operação. A Figura 9 apresenta a função de transferência do sistema.

$$G(s) = \frac{X_2(s)}{X_0(s)}$$

Figura 8. Relação entre a entrada e a saída do sistema. Fonte: Autores (2024).

$$\frac{X_2(s)}{X_0(s)} = \frac{(Kt * C)s + (Kt * Ks)}{(Ms * Mu)s^4 + (Ms * C + Mu * C)s^3 + (Ms * Ks + Ms * Kt + Mu * Ks)s^2 + (Kt * C)s + (Kt * Ks)}$$

Figura 9. Função de transferência do sistema. Fonte: Autores (2024).

4.4 Simulação computacional no ambiente *simulink*

A modelagem no ambiente *simulink* consistiu na implementação das equações de movimento do sistema, permitindo a análise da resposta transiente do sistema diante de perturbações externas. Foram realizadas simulações para as estratégias de controle semi-ativo e passivo, com análise comparativa dos resultados obtidos.

Para a análise de desempenho do sistema o perfil de consiste em três saliências, como ilustrado na Figura 10. A perturbação é aplicada nos instante de tempo $t = 5s$, $t = 15s$ e $t = 25s$ e pode ser descrita por:

$$f(t) = \begin{cases} a_1[f(t-5) - f(t-10)] \sin(0.2\pi t), & \text{se } 5 \leq t \leq 10 \\ a_2[f(t-15) - f(t-20)] \sin(0.2\pi t), & \text{se } 15 \leq t \leq 20 \\ a_3[f(t-25) - f(t-30)] \sin(0.2\pi t), & \text{se } 25 \leq t \leq 30 \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

Onde a_1 , a_2 e a_3 s o as amplitudes das perturba es e tem respectivamente 0.1 m, 0.05 m e 0.075 m.

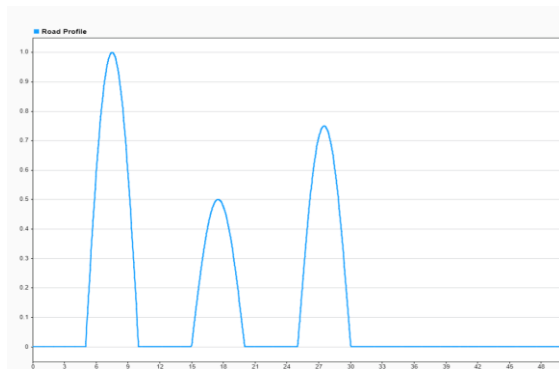


Figura 10. Perfil de pista desnivelado. Fonte: Autores (2024).

4.5 Análise comparativa dos resultados

A comparação entre os resultados obtidos para as estratégias de controle semi-ativo (PI, PD e PID) e o método passivo foi realizada com base na análise da resposta transiente do sistema diante das perturbações externas. A análise transiente refere-se ao estudo do comportamento do sistema durante a transição entre

estados de equilíbrio, ou seja, quando ocorrem mudanças repentinas nas condições de operação. No contexto do sistema de suspensão, a análise transiente é importante para avaliar a resposta do veículo a irregularidades na estrada, como saliências, que podem causar vibrações indesejadas. Uma resposta transiente rápida e estável do sistema de suspensão contribui para uma melhor percepção de conforto por parte do motorista, reduzindo as vibrações transmitidas ao veículo. A Figura 11 ilustra a resposta do sistema para o perfil de pista, considerando as duas estratégias de controle.

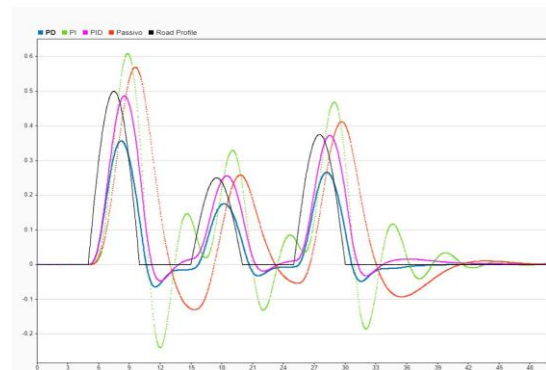


Figura 11. Resposta do sistema para o perfil de pista. Fonte: Autores (2024).

A partir da análise gráfica das respostas do sistema, foi possível identificar que a estratégia de controle semi-ativo apresentou uma saída com melhor desempenho em relação à perturbação no método passivo. Dentre as estratégias de controle semi-ativo, o controlador PD se destacou por oferecer uma resposta mais rápida e estável, com menor tempo de acomodação e menor erro em regime permanente. Esses resultados indicam que o controle semi-ativo é mais eficiente para melhorar a resposta dinâmica da suspensão em veículos off-road, proporcionando maior adaptabilidade, estabilidade e dirigibilidade em condições adversas.

Esse desempenho satisfatório do controlador PD está relacionada à sua capacidade de ajustar rapidamente a ação de controle com base no erro entre a saída desejada e a saída real do sistema. O controlador PD utiliza tanto a informação do erro atual quanto a taxa de variação do erro para determinar a ação de controle a ser aplicada. Essa abordagem permite uma resposta mais rápida e precisa do sistema, pois o controlador é capaz de antecipar e corrigir as variações indesejadas na saída do sistema.

Além disso, o controlador PD também é capaz de reduzir o tempo de acomodação do sistema, ou seja, o tempo necessário para que a saída do sistema atinja um valor próximo ao valor desejado. Isso ocorre devido à ação proporcional do controlador, que ajusta a

magnitude da ação de controle com base no erro atual. Dessa forma, o controlador PD consegue minimizar as oscilações e estabilizar rapidamente a saída do sistema.

Os controladores PI e PID são mais lentos devido à ação integral, que responde à acumulação dos erros passados. Embora essa ação seja importante para corrigir erros em regime permanente, ela pode introduzir oscilações indesejadas na saída do sistema, aumentando o tempo de acomodação e comprometendo a estabilidade do sistema. Por outro lado, o controlador P é mais rápido, mas menos estável, pois não considera a taxa de variação do erro na determinação da ação de controle. Portanto, o controlador PD se destaca por oferecer um equilíbrio entre velocidade e estabilidade, proporcionando uma resposta mais rápida e precisa do sistema.

Esses resultados reforçam a eficácia do controle semi-ativo na melhoria da resposta dinâmica da suspensão em veículos off-road, destacando sua importância para competições de alto nível, como o BAJA SAE BRASIL.

5. Conclusão

O presente trabalho avaliou o comportamento dinâmico da suspensão de um veículo *off-road*, utilizando o modelo de um quarto de carro, e analisou o desempenho de um sistema de controle sobre o comportamento dinâmico da suspensão. Através do desenvolvimento de uma modelagem matemática, foi possível estabelecer uma representação precisa e detalhada do sistema veicular em análise, permitindo a análise e comparação de diferentes estratégias de controle. A simulação computacional no ambiente *simulink* possibilitou a análise da resposta transiente do sistema diante de perturbações externas, com destaque para a estratégia de controle semi-ativo. Os resultados obtidos indicaram que o controle semi-ativo apresentou uma saída com melhor desempenho em relação à perturbação no método passivo, destacando-se o controlador PD por oferecer uma resposta mais rápida e estável, com menor tempo de acomodação e menor erro em regime permanente. Esses resultados evidenciam a importância do controle semi-ativo na melhoria da resposta dinâmica da suspensão em veículos *off-road*, proporcionando maior adaptabilidade, estabilidade e dirigibilidade em condições adversas. Ademais, a utilização da modelagem e simulação como ferramentas de apoio para a avaliação e seleção de estratégias de controle eficiente foi fundamental para o desenvolvimento do estudo.

6. Referências

- [1] ACOSTA, M.; KANARACHOS, S.; FITZPATRICK, M. E. Accurate virtual sensing of vertical tire forces for enhanced handling dynamics. In: IEEE. IECON 2017-43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. [S.l.], 2017. p. 4009 4014.
- [2] ANSARI, F. A.; RANJAN, R.; KORADE, D.; JAGTAP, K. Characterization of hydraulic suspension system, on the basis of accumulator pressure values for a special purpose vehicle. *Materials Today: Proceedings*, Elsevier, v. 4, n. 2, p. 709 716, 2017.
- [3] AZEVEDO, C. M. M. d. Modelo matemático para controle de um sistema ativo de suspensão automotiva. Universidade Federal Rural do Semi-rido, 2013.
- [4] BERTO, L. F. et al. Modelagem dinâmica de sistema automotivo: estudo de caso via testes de performance e falhas do baja sae. 2015.
- [5] DINIZ, D. D. S. et al. Estudo da dinâmica vertical em suspensão duplo a de um veículo off-road tipo baja. Universidade Federal de Campina Grande, 2014.
- [6] DIXON, J. C. Suspension geometry and computation. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2009.
- [7] EL-SAYEGH, Z.; EL-GINDY, M.; JOHANSSON, I.; ÖJER, F. Development and validation of an off-road rigid ring truck tyre model. *International Journal of Vehicle Systems Modelling and Testing*, Inderscience Publishers (IEL), v. 13, n. 3, p. 275_294, 2019.
- [8] GILLESPIE, T. Fundamentals of vehicle dynamics. [S.l.]: SAE international, 2021.
- [9] MILLIKEN, W. F.; MILLIKEN, D. L.; METZ, L. D. Race car vehicle dynamics. [S.l.]: SAE international Warrendale, 1995. v. 400.
- [10] NISE, N. S. Engenharia de sistemas de controle, 6ªed. LTC, São Paulo, 2012.
- [11] OGATA, K.; SOUZA, H. C. d.; TANNURI, E. A. Engenharia de controle moderno. 1998.
- [12] OLIVEIRA, R. C. N. de; CAMPOS, R. P.; CASTRO, C. L. Clubes off-road-desafios e potenciais de integração. *Brazilian Journal of Development*, v. 9, n. 6, p. 20739_20755, 2023.
- [13] PACEJKA, H. Tire and vehicle dynamics. [S.l.]: Elsevier, 2005.

[14] REZA, N. Jazar. vehicle dynamics: Theory and application. Vehicle Dynamics, 2008

[15]SHOJAEEFARD, M. H.; KHALKHALI, A.; YARMOHAMMADISATRI, S. An efficient sensitivity analysis method for modified geometry of macpherson suspension based on pearson correlation coefficient. Vehicle System Dynamics, Taylor & Francis, v. 55, n. 6, p. 827_852, 2017.