

MODELAGEM DO SISTEMA DE DIREÇÃO AUTOMOTIVO PARA ANÁLISE DE DESEMPENHO EM SIMULADORES DE DIREÇÃO - ESTADO DA ARTE

Pedro Reis e Nunes ⁽¹⁾ (pedronreis@ufmg.br), Juan Carlos Horta Gutiérrez ⁽²⁾ (horta@demec.ufmg.br)

⁽¹⁾ UFMG; Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

⁽²⁾ UFMG; Departamento de Engenharia Mecânica

RESUMO: *Uma revisão do estado da arte sobre a modelagem do sistema de direção automotivo para análise da dinâmica lateral e do retorno tátil (feedback) da direção é apresentada, com foco em simuladores de direção. Os simuladores de direção tornaram-se importantes ferramentas para o desenvolvimento automotivo, permitindo a avaliação precoce do desempenho lateral do veículo e do sistema de direção. Para proporcionar aos usuários uma experiência realista, a modelagem precisa do sistema de direção é crucial, especialmente no que diz respeito ao feedback de torque do volante. A revisão constatou que vários modelos têm sido explorados, mas apenas alguns estão focados em aplicações em simuladores, buscando simplificações para garantir a capacidade de simulação em tempo real para análises com o motorista como parte da simulação. Além disso, vários autores visaram reduzir os parâmetros de entrada necessários para construir os modelos devido ao desafio de obter dados de entrada precisos. Essa revisão do estado da arte fornece uma visão abrangente e atualizada sobre a modelagem do sistema de direção, oferecendo subsídios para futuras pesquisas e aprimoramentos em simuladores de direção, bem como para o desenvolvimento de sistemas automotivos mais seguros e eficientes.*

PALAVRAS-CHAVE: *Simulador de Direção, Dinâmica Veicular, Sistema de Direção, Feedback de Direção*

MODELING OF THE AUTOMOTIVE STEERING SYSTEM FOR PERFORMANCE ANALYSIS IN DRIVING SIMULATORS - STATE OF THE ART

ABSTRACT: *A review of the state of the art on the modeling of the automotive steering system for analysis of lateral dynamics and steering feedback is presented, focusing on driving simulators. Driving simulators have become important tools for automotive development, allowing for early evaluation of the vehicle's lateral performance and steering system. To provide users with a realistic driving experience, accurate modeling of the steering system is crucial, especially regarding steering wheel torque feedback. The review found that several models have been explored, but only a few are focused on simulator applications, seeking simplifications to ensure real-time simulation capability for driver-in-the-loop analyses. Additionally, several authors aimed to reduce the input parameters required to build the models due to the challenge of obtaining accurate input data. This state-of-the-art review provides a comprehensive and updated overview of the steering system modeling, offering insights for future research and improvements in driving simulators, as well as for the development of safer and more efficient automotive systems.*

KEYWORDS: *Driving Simulator, Vehicle Dynamics, Steering Systems, Steering Feedback*

1. INTRODUÇÃO

1.1 Simuladores de Direção e Suas Aplicações

Simuladores de direção não são exatamente uma ferramenta nova, suas primeiras aplicações datam do início da década de 70. Desde então, avanços na capacidade de processamento computacional, processamento gráfico e sistemas de realidade virtual abriram oportunidades para o desenvolvimento e uso de simuladores de direção (Gruening *et al.*, 1998). Os simuladores de direção são sistemas baseados em softwares que replicam a experiência de dirigir um veículo em um ambiente virtual. Estes tornaram-se cada vez mais comuns tanto na pesquisa quanto na indústria. São compostos por vários componentes, incluindo o modelo de dinâmica do veículo, sistema de movimento e ambiente virtual, que colaboram para gerar uma experiência de direção realista (Bruck *et al.*, 2021).

Os simuladores de direção possuem diversas aplicações, incluindo, mas não se limitando a estudos centrados no motorista, projeto de chassis e *powertrain* e desenvolvimento de sistemas autônomos. Dada a natureza segura e econômica desses simuladores, espera-se que seu uso continue a aumentar no futuro, servindo como uma ferramenta valiosa para testar tanto sistemas de veículos quanto o comportamento do motorista (Bruck *et al.*, 2021).

Simuladores de direção necessitam simular a física do veículo e sua interação com a pista, simular o ambiente em torno do veículo, permitir ao motorista a interpretação do estado do modelo (e.g. áudio, movimento, vídeo) e sua interação a partir de instrumentos (volante e pedais de acelerador e freio) (Gruening *et al.*, 1998). Simuladores apresentam algumas vantagens na comparação com testes em veículos, sendo a segurança a mais notável. A capacidade de replicar o modelo do veículo e do ambiente com alto grau de precisão e consistência é outra vantagem significativa, permitindo a repetição do mesmo cenário em condições idênticas. Além disso, a aquisição de dados é mais conveniente na simulação, e o processo de troca de modelos de veículos e ambientes simulados é consideravelmente mais fácil. No entanto, é importante observar que há o risco de se obter informações enganosas se o simulador ou o modelo simulado não fornecerem uma correspondência apropriada ao cenário simulado (Gruening *et al.*, 1998).

1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho é realizar uma revisão abrangente da literatura sobre a modelagem do sistema de direção, com foco específico nas análises de feedback de torque e resposta desse sistema. Esta revisão tem o propósito de abranger trabalhos relevantes sobre o tema, não se limitando apenas àqueles aplicados em simuladores, mas também incluindo pesquisas relacionadas em outros contextos. Serão analisadas diversas abordagens de modelagem e técnicas utilizadas para representar o sistema de direção, bem como as metodologias empregadas para avaliar a precisão e a eficácia desses modelos. O estudo buscará identificar as principais tendências, desafios e avanços

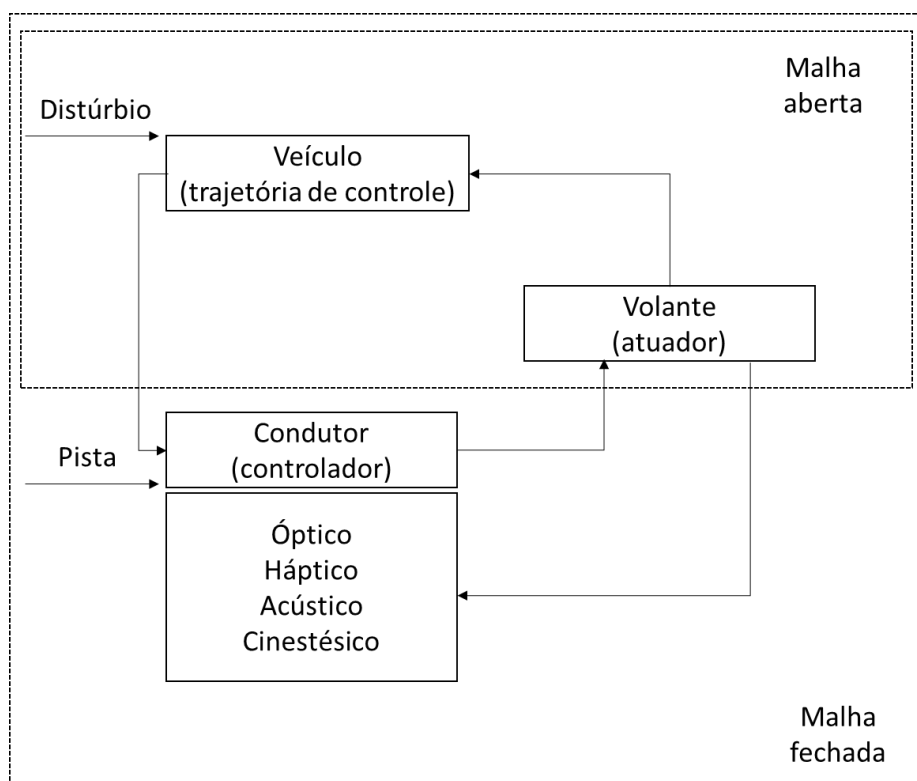
no campo da modelagem do sistema de direção, a fim de proporcionar uma visão completa e atualizada do estado da arte nessa área para pesquisadores e profissionais da indústria automotiva, contribuindo para o desenvolvimento contínuo de simuladores de direção mais realistas e eficientes.

1.3 Justificativas

Durante o desenvolvimento de um produto é essencial realizar uma verificação completa de sua funcionalidade, integridade e viabilidade (Lisbôa *et al.*, 2004). No desenvolvimento automotivo grande parte deste processo é executado em fases iniciais do projeto com o auxílio de ferramentas de simulação. É esperado que durante a etapa de projeto de um veículo, as percepções subjetivas do condutor sobre o veículo possam ser previstas com a ajuda de simulações (Gómez, 2015). No entanto os ajustes definitivos do sistema de suspensão e direção, que influenciam a dinâmica lateral e o feedback de direção, ainda são realizados por avaliadores em protótipos físicos (Pfeffer, 2006), (Bruck *et al.*, 2021). Embora para as montadoras ainda exista a necessidade de protótipos físicos em estágios posteriores do desenvolvimento, ferramentas integradas de simulação e visualização podem eventualmente eliminar sua necessidade completamente. Para tanto, modelos para testes virtuais devem ser capazes de representar fielmente o processo que necessitam simular.

A modelagem do sistema de direção constitui um componente fundamental das aplicações de simulador de direção devido à sua contribuição significativa para gerar uma experiência de direção autêntica para o usuário (Bruck *et al.*, 2021). O comportamento dinâmico lateral do veículo, pode ser descrito como um sistema de controle como pode ser visto na Figura 1. O motorista é o controlador e obtém sua variável de controle principalmente de forma visual e tátil, a partir do percurso da pista e da posição do veículo e pelo torque do volante. O condutor controla o veículo através do volante. O sistema de direção, portanto, tem uma função dupla. Por um lado, serve como atuador, com o qual o motorista ajusta o percurso do veículo e, por outro lado, fornece informações para o motorista sobre o estado operacional do veículo. O feedback mais importante para o motorista, além da aceleração lateral, é o torque transmitido pelo volante, apresentando menor tempo de reação que a informação visual e a acústica (Pfeffer, 2006). Assim, a capacidade de reproduzir de maneira fiel o torque experimentado no volante é uma necessidade para simuladores em que seja desejado avaliar o desempenho do sistema de direção.

FIGURA 1. Sistema de controle Condutor-Veículo



Fonte: Autor, adaptado de (Pfeffer *et al.*, 2008).

Para fornecer um nível adequado de feedback de torque, é fundamental ter uma compreensão abrangente dos momentos auto-alinhantes gerados pelos pneus e aplicados ao sistema de direção, bem como um modelo que possa determinar até que ponto esse torque é transmitido ao motorista. Considerando ainda o emprego de sistemas de assistência que visam reduzir o torque requerido do motorista para esterçar, desenvolver um modelo que represente fielmente o feedback de torque pode ser uma tarefa desafiadora, obter os parâmetros necessários para a modelagem do sistema geralmente é um processo complexo e árduo, com fornecedores destes sistemas frequentemente retendo informações importantes para a modelagem destes sistemas por motivos comerciais (Gruening *et al.*, 1998).

A justificativa para este artigo é baseada na importância da modelagem precisa do sistema de direção automotivo para o desenvolvimento de veículos mais seguros e eficientes. Além disso, a aplicação desses modelos em simuladores de direção é fundamental para a avaliação precoce do desempenho lateral do veículo e do sistema de direção. Com esta revisão do estado da arte, espera-se fornecer uma visão abrangente e atualizada sobre o assunto, oferecendo subsídio para futuras pesquisas e melhorias nos simuladores de direção e sistemas automotivos em geral.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram realizadas buscas nas bases Scopus e SAE Mobilus e coletados os títulos e resumos de todos os artigos relevantes que abordavam a modelagem do sistema de direção e suas aplicações em análises de feedback de torque e resposta. Em seguida, os artigos duplicados foram removidos e os estudos que não atendiam aos critérios de inclusão foram excluídos.

Na segunda etapa, os artigos selecionados na etapa anterior foram lidos integralmente para avaliar sua relevância e qualidade para a pesquisa. Foram considerados artigos de revisão, estudos experimentais, simulações computacionais, modelos matemáticos e qualquer outro tipo de estudo que abordasse de forma aprofundada a modelagem do sistema de direção e suas aplicações em simuladores de direção.

Por fim, na terceira etapa, os artigos escolhidos foram analisados e seus principais achados foram sistematizados e comparados. Foram identificadas as principais tendências, desafios, avanços e lacunas na área de modelagem do sistema de direção para análises de feedback de torque e resposta.

A combinação das informações coletadas nessas etapas resultou em uma visão completa e atualizada do estado da arte da modelagem do sistema de direção, abrangendo tanto estudos aplicados a simuladores de direção quanto trabalhos em outros contextos.

3. RESULTADOS

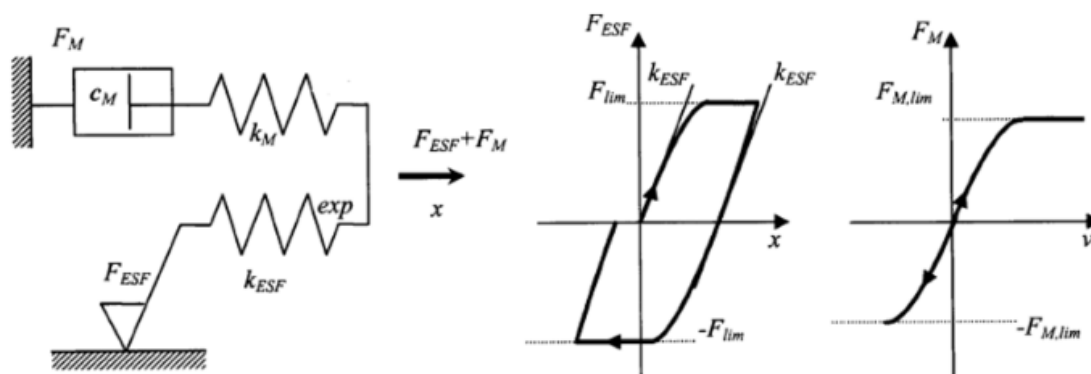
Pode ser constatado na literatura que para um bom feedback de direção, o sistema de esterçamento deve transmitir todas as informações úteis e suprimir excitações inúteis ou perturbadoras, as excitações relevantes de carga nos tirantes ocorrem principalmente na faixa de frequência de 0 a 20 Hz. Excitações acima de 20 Hz geralmente não contém informações úteis (Düsterloh *et al.*, 2019).

De acordo com (Raabe *et al.*, 2022), modelos de sistema de direção com um ou dois graus de liberdade geralmente são adequados para avaliações da dinâmica lateral. Esses modelos muitas vezes negligenciam o atrito do sistema de direção ou utilizam modelos de atrito relativamente simples para reduzir a complexidade e diminuir o tempo computacional, sendo suficientes para análises ao nível de veículo, mas insuficientes para análises focadas no feedback e resposta do sistema de direção.

Um modelo de sistema de direção para o desenvolvimento de funções do sistema assistência é apresentado por (Więckowski e Żardecki, 2011). É tomada especial atenção à influência da folga do engrenamento e do atrito, avaliados no deslocamento angular do volante durante a manobra de mudança de faixa. Também é apresentado um modelo de atrito relativamente complexo que considera o atrito deslizante, os efeitos de deslizamento-adesão, o atrito viscoso e a folga da engrenagem. Além disso, a inércia do sistema é representada no volante e uma mola representa sua elasticidade. A característica não-uniforme da transmissão das juntas universais é negligenciada.

Um modelo com dois graus de liberdade é apresentado por (Pfeffer, 2006) e (Pfeffer *et al.*, 2008). Nesse modelo tem-se uma inercia representando o volante e a coluna de direção e uma massa que representa a cremalheira e o pinhão. As propriedades elásticas da coluna de direção são modeladas usando um elemento de Kelvin-Voigt. A característica não-uniforme da transmissão das juntas universais é negligenciada. Para representar as perdas por atrito do sistema (Pfeffer, 2006) e (Pfeffer *et al.*, 2008) utilizam modelos mola-atrito exponenciais na coluna de direção. Na cremalheira é utilizado um modelo mola-atrito exponencial com elemento de Maxwell (Figura 2). O atrito deslizante e os efeitos pré-deslizamento são considerados, a dependência da carga do atrito é incorporada através de uma pré-carga. Além disso, (Pfeffer, 2006) e (Pfeffer *et al.*, 2008) modelam o sistema de assistência hidráulica com um atraso de primeira ordem, em contrapartida às tabelas de consulta normalmente utilizadas. A representação do sistema pode ser observada na Figura 3.

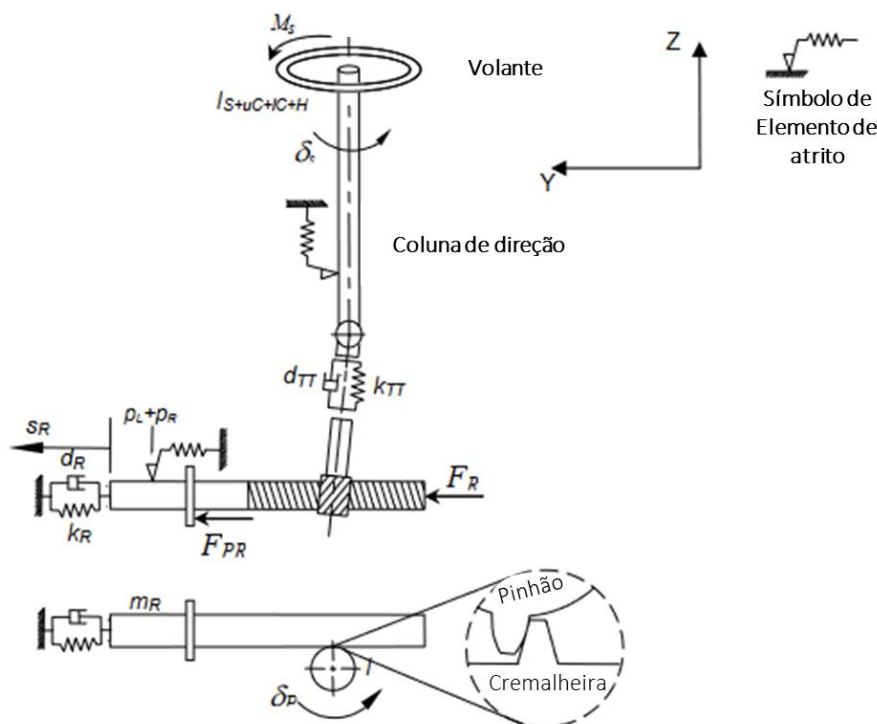
FIGURA 2. Modelo de atrito-mola exponencial com elemento de Maxwell



Fonte: (Pfeffer *et al.*, 2008)

Onde: F_M é a força do elemento de Maxwell; c_M é o amortecimento do elemento de Maxwell; k_M é a rigidez do elemento de Maxwell; $F_{M,lim}$ é a força limite do elemento de Maxwell; F_{ESF} é a força do elemento de mola exponencial; k_{ESF} é a rigidez para força F_{ESF} igual a zero; F_{lim} é a força limite do elemento de mola exponencial.

FIGURA 3. Modelo de dois graus de liberdade de acordo com (Pfeffer et al., 2008)



Fonte: Autor, adaptado de (Pfeffer et al., 2008)

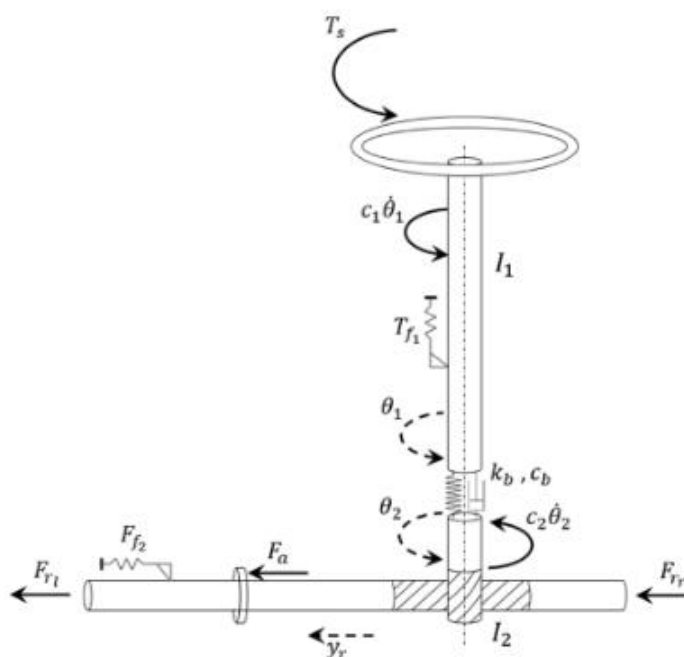
Onde: M_s é o torque no volante; I_s é a inércia total da coluna de direção; δ_s é o deslocamento angular da coluna; d_{tt} é o amortecimento total da coluna; k_{tt} é a rigidez total da coluna; p_L é a pressão do sistema de assistência hidráulica, câmara esquerda; p_R é a pressão do sistema de assistência hidráulica, câmara direita; F_{PR} é a força do sistema de assistência; S_R é o deslocamento da cremalheira; F_R é a força total dos tirantes; m_r é a massa da cremalheira; δ_p é o deslocamento angular do pinhão.

O modelo proposto por (Van Ende et al., 2015) tem o objetivo de investigar as principais características de direção ao centro, até uma frequência de 0.7 Hz. No modelo, toda a inércia e massa do sistema de direção são concentradas em uma única massa da cremalheira. A elasticidade da coluna de direção é considerada usando um elemento de Kelvin-Voigt com características de mola definidas por partes. Além disso, a transmissão não-uniforme das juntas universais é modelada. Elementos exponenciais de mola-atrito são considerados na coluna e na cremalheira, com o atrito deslizante dependente da velocidade, os efeitos de pré-deslizamento também são considerados. Uma tabela de consulta para consideração da força de assistência é utilizada em (Van Ende et al., 2015).

Um modelo com dois graus de liberdade é apresentado em (Certosini et al., 2019), composto por uma inércia que representa o volante, a coluna de direção e suas juntas universais, outra inércia

representa o pinhão, a cremalheira e os tirantes (Figura 4). A barra de torção é representada por uma rigidez e um amortecimento atuantes entre duas massas agrupadas, demais componentes do sistema são considerados rígidos. A razão de transmissão das juntas é considerada constante. O atrito do sistema é modelado de acordo com a formulação de LuGre (Certosini *et al.*, 2019), onde a força de atrito é definida por um componente proporcional à deformação das superfícies, um proporcional à razão de deformação e um terceiro proporcional à velocidade relativa. O sistema de assistência hidráulica é modelado através de tabelas de consulta.

FIGURA 4. Modelo de dois graus de liberdade de acordo com (Certosini *et al.*, 2019)



Fonte: (Certosini *et al.*, 2019)

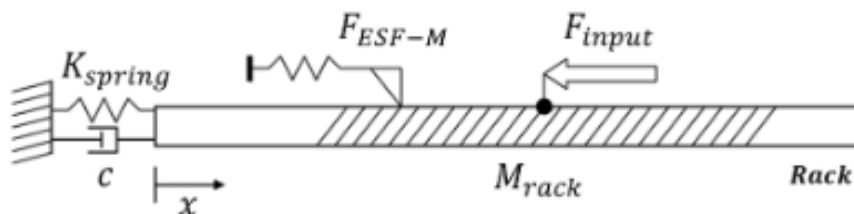
Onde: T_s é o torque aplicado ao volante; I_1 é a inércia da coluna de direção; c_1 é o coeficiente de amortecimento da coluna de direção; $\dot{\theta}_1$ é a velocidade angular da coluna de direção; T_{f1} é o torque de atrito da coluna de direção; θ_1 é o deslocamento angular da coluna de direção; θ_2 é o deslocamento angular do pinhão; k_b é o coeficiente de rigidez da barra de torção; c_b é o coeficiente de amortecimento da barra de torção; c_2 é o coeficiente de amortecimento do pinhão; $\dot{\theta}_2$ é a velocidade angular do pinhão; F_a é a força do sistema de assistência; F_{f2} é a força de atrito da caixa de direção; F_{r1} é a força no tirante esquerdo; F_{rr} é a força no tirante direito; I_2 é a inércia do pinhão, cremalheira e tirantes.

Um modelo de feedback de direção aplicado ao servo-motor conectado ao volante de um simulador de direção é apresentado em (Salaani *et al.*, 2004). O torque do volante é determinado através do torque imposto pelo motorista, do torque do sistema de assistência, do amortecimento do sistema de direção, do torque devido ao momento auto-alinhante dos pneus e do torque dos

batentes de fim de curso do sistema de direção. Os parâmetros que definem o modelo apresentado em (Salaani *et al.*, 2004) não representam necessariamente características de um sistema de direção. Os coeficientes do modelo são obtidos para replicar o comportamento de determinados veículos, o que impede sua aplicabilidade.

Um modelo simplificado de um grau de liberdade (Figura 5), derivado de um modelo multicorpos de cinco graus de liberdade é apresentado em (Cianetti *et al.*, 2021). É objetivada a redução dos parâmetros de entrada do modelo sistema de direção, visto que estas informações não estão sempre disponíveis por confidencialidade de fornecedores destes sistemas. O modelo simplificado também visa a redução do tempo computacional, para aplicação em simuladores de direção. A resposta em frequência do ângulo de volante pelo torque no volante é obtida em (Cianetti *et al.*, 2021), são realizadas variações das propriedades de massa e inércia da coluna e da caixa de direção, onde se conclui que até uma frequência de 2 Hz estas não apresentam influência na resposta do sistema. Desta forma o modelo é reduzido à uma massa representando a cremalheira e as inércias da coluna de direção são consideradas unitárias. As rigidezes dos segmentos da coluna são sintetizadas em uma rigidez equivalente. É considerado um único elemento de atrito-mola exponencial com elemento de Maxwell na caixa de direção, os atritos da coluna são negligenciados. Uma função polinomial de sétima ordem é utilizada para representar o deslocamento da cremalheira por ângulo de esterçamento em (Cianetti *et al.*, 2021).

FIGURA 5. Modelo simplificado com 1 grau de liberdade de acordo com (Cianetti *et al.*, 2021)



Fonte: (Cianetti *et al.*, 2021)

Onde: K_{spring} é a rigidez equivalente do sistema; c é o coeficiente de amortecimento do sistema; F_{ESF-M} é a força de atrito com elemento de mola exponencial e elemento de Maxwell; F_{input} é a força de entrada no sistema; M_{rack} é a massa da cremalheira.

Um modelo do sistema de direção de dois graus de liberdade que consiste em uma inércia combinada de volante e coluna de direção e uma massa que representa a cremalheira é proposto por (Raabe *et al.*, 2022). O modelo utiliza uma rigidez constante para representar a característica elástica da coluna de direção. O atrito do sistema é modelado através de elementos ESF na coluna de direção e na cremalheira. Busca-se um compromisso entre a precisão do modelo e o número de

parâmetros de entrada. Os parâmetros do modelo são determinados a partir de dados de projeto, como valores de massa, inércia e rigidez, bem como relações de transmissão.

Modelos multicorpos são utilizados extensivamente para análises da dinâmica lateral, vertical e de feedback de direção. Em (Lozia e Zardecki, 2007) é apresentado um modelo multicorpos e suas simplificações. É dada atenção especial ao atrito e ao efeito de deslizamento-adesão, modelados por uma função linear em partes. Três modelagens do atrito são comparadas, atrito seco, atrito seco com atrito estático aumentado e atrito seco com atrito estático aumentado e com efeito de Stribeck. A matriz de equações diferenciais do sistema multicorpos é apresentada. A folga das engrenagens é considerada através de uma função linear em partes.

O processo de obtenção de parâmetros de rigidez, histerese e atrito do sistema de direção é apresentado por (Ganesh *et al.*, 2021) e (Camuffo *et al.*, 2002), que se utilizam de testes em bancada para a caracterização do sistema. Uma bancada de testes para o sistema de direção (*steering bench*) é utilizada por (Ganesh *et al.*, 2021), a partir da qual se determina a rigidez e atrito da coluna de direção e o atrito da caixa de direção a partir de medições com a coluna acoplada e desacoplada. Em (Camuffo *et al.*, 2002) uma bancada para medições de parâmetros de suspensão é utilizada. Os pneus ficam sobre uma superfície de baixo atrito, o volante é substituído por um atuador hidráulico. Uma entrada senoidal de baixa frequência é aplicada para se obter a histerese do sistema, bem como o atrito da coluna e da caixa de direção. O sistema de assistência elétrica é caracterizado por (Camuffo *et al.*, 2002) através de combinações de frequências de entrada angular no volante e sinais da velocidade do veículo através da rede CAN.

4. CONCLUSÕES

Foi evidenciado que os simuladores de direção desempenham um papel fundamental no desenvolvimento automotivo, pesquisa e treinamento de motoristas, proporcionando uma avaliação virtual precoce e precisa do desempenho do veículo e do sistema de direção. A modelagem adequada do sistema de direção é essencial para garantir uma experiência de direção realista aos usuários, com destaque para o feedback de torque no volante, o qual influencia diretamente a informação que o veículo transmite ao condutor.

Os modelos apresentados na literatura demonstraram diversas abordagens e técnicas, buscando equilibrar a precisão das análises com a capacidade em tempo real exigida pelos simuladores. A redução do número de dados de entrada necessários para a modelagem e a consideração do atrito e folga do sistema foram desafios enfrentados pelos pesquisadores.

Essa revisão ressaltou a importância de uma modelagem adequada do sistema de direção, tanto para análises em simuladores como em outros contextos. O avanço contínuo nessa área contribuirá para aprimorar a qualidade dos simuladores de direção, resultando em uma redução potencial da necessidade de protótipos físicos no desenvolvimento automotivo.

Em conclusão, esta revisão do estado da arte forneceu uma visão abrangente e atualizada sobre a modelagem do sistema de direção para análises de feedback de torque e resposta. As informações obtidas são valiosas para pesquisadores e profissionais da indústria automotiva, fornecendo subsídios para futuras pesquisas e aprimoramentos em simuladores de direção, bem como para o desenvolvimento de sistemas automotivos mais seguros e eficientes.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis por este trabalho.

REFERÊNCIAS

BRUCK, L., HAYCOCK, B., E EMADI, A. A Review of Driving Simulation Technology and Applications. *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*, v. 2, p. 1–16, 2021.

CAMUFFO, I., CAVIASSO, G., PASCALI, L., PESCE, M., E ALVIANO, E. Simulation Tools and Evaluation Criteria for Steering Wheel Feel Improvement of an Electric Power Steering System. *SAE 2002 Automotive Dynamics & Stability Conference and Exhibition*, Detroit, EUA, p. 2002-01-1593, 2002.

CERTOSINI, C., VINATTIERI, F., CAPITANI, R., E ANNICCHIARICO, C. Development of a real-time steering system model for driving simulators. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, v. 233(11), p. 2701–2713, 2019.

CIANETTI, F., FABELLINI, L., FORMICA, V., E AMBROGI, F. Development and validation of a simplified automotive steering dynamic model. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, v. 235(8), p. 2188–2199, 2021.

DÜSTERLOH, D., USELMANN, A., SCHERHAUFER, J., BITTNER, C., E SCHRAMM, D. Objectification of the feedback behavior of the suspension and steering system. *9th International Munich Chassis Symposium 2018*, Munique, Alemanha, p. 505–526, 2019.

GANESH, L., HG, P. P., E N, B. Accurate Steering System Modelling for Vehicle Handling and Steering Performance Prediction Using CAE. *Symposium on International Automotive Technology*, Pune, India, p. 2021-26-0403, 2021.

GIL GÓMEZ, G. Towards efficient vehicle dynamics evaluation using correlations of objective metrics and subjective assessments. Licentiate Thesis - KTH Royal Institute of Technology, 64 p., 2015.

GRUENING, J., BERNARD, J., CLOVER, C., E HOFFMEISTER, K. Driving Simulation. *SAE Transactions*, v. 107, p. 376–385, 1998.

LISBÔA, V. W., CAJUHI, A. J., NICOLETTI, R., E MASCARENHAS, W. N. Zero Prototype Approach in the Development of a Plastic Automotive Component. *2004 SAE Brasil Congress and Exhibit*, São Paulo, Brasil, p. 2004-11-3300, 2004.

LOZIA, Z., E ZARDECKI, D. Friction and Stick-Slip Phenomena in Steering System - Modeling and Simulation Studies. *SAE World Congress & Exhibition*, Detroit, USA, p. 2007-01-1153, 2007.

PFEFFER, P. E. Interaction of vehicle and steering system regarding on-centre handling. PhD Thesis - University of Bath, 179 p., 2006.

PFEFFER, P. E., HARRER, M., E JOHNSTON, D. N. Interaction of vehicle and steering system regarding on-centre handling. *Vehicle System Dynamics*, v. 46(5), p. 413–428, 2008.

RAABE, J., KETZMERICK, E., ABEL, H., E PROKOP, G. Steering System Simulation during the Concept Phase regarding Feedback Behavior. *SAE International Journal of Vehicle Dynamics, Stability, and NVH*, 6(2), p. 189-206, 2022.

SALAANI, M. K., HEYDINGER, G. J., E GRYGIER, P. A. Closed Loop Steering System Model for the National Advanced Driving Simulator. *SAE 2004 World Congress & Exhibition*, Detroit, EUA, p. 2004-01-1072, 2004.

VAN ENDE, K. T. R., KÜÇÜKAY, F., HENZE, R., KALLMEYER, F. K., E HOFFMANN, J. (2015) Vehicle and steering system dynamics in the context of on-centre handling. *International Journal of Automotive Technology*, v. 16(5), p. 751–763, 2015.

WIĘCKOWSKI, D., E ŻARDECKI, D. Influence of freeplay and friction in steering system on double lane change manoeuvre. *Journal of KONES Powertrain and Transport*, v. 18(2), p. 483-492, 2011.