

# 1 Introdução

Ao propor um estudo de modelagem de sistemas dinâmicos com aplicação de controle, o presente trabalho pretende abordar duas áreas do conhecimento da engenharia moderna que têm merecido destaque nos últimos anos, em função das crescentes necessidades de desenvolvimento tecnológico da indústria de uma maneira geral. O aumento da competitividade e a diminuição do ciclo de desenvolvimento obrigaram a indústria, junto com centros de pesquisa, a investir nos métodos virtuais para projeto, análise, teste, e validação de novos produtos. Porém nada disso seria possível sem o desenvolvimento das ferramentas computacionais adequadas, onde se destaca, além da melhoria na capacidade computacional, a criação de algoritmos e métodos numéricos matemáticos que consigam descrever, com alguma fidelidade, o comportamento de sistemas físicos reais.

Mais particularmente na indústria automobilística, esse avanço tecnológico tem possibilitado estudos mais aprofundados e uma melhor compreensão do comportamento dos veículos terrestres. Veja por exemplo a utilização de uma maior quantidade de sensores para capturar dados significativos do desempenho dos veículos que, após a realização de um processamento adequado, resultam em modelos dinâmicos mais representativos dos sistemas físicos característicos. Por outro lado, o avanço computacional também permite o equacionamento de modelos analíticos mais complexos, passando a ser possível avaliá-los e, posteriormente, comparar com os modelos experimentais.

A dinâmica veicular, ramo da ciência que realiza o estudo do comportamento de veículos, hoje se divide entre as vertentes experimental e teórica, tendo a experimental uma grande importância para a validação e desenvolvimento dos modelos analíticos. Em [1] pode ser percebida esta tendência de trabalho. Ao longo do texto pode ser observado que primeiro propõe-se um modelo analítico e seu desenvolvimento matemático, para, ao final, ser

comparado com dados experimentais, validando a modelagem. Ainda, com base nos dados experimentais, muitas vezes são propostos modelos simplificados, mas que corretamente reproduzem o comportamento do sistema dinâmico, podendo substituir toda a formulação teórica.

Um outro problema freqüentemente vivido por pesquisadores e engenheiros diz respeito ao grau de complexidade dos modelos matemáticos que são propostos. Até que ponto vale a pena desenvolver um modelo elaborado que tente representar o comportamento dinâmico de um sistema físico? Essa questão acaba dividindo a opinião de quem trabalha nesta área do conhecimento. Em [2], [3] e [12] são propostos modelos lineares e não lineares que funcionam para movimentos suaves, a baixa velocidade e com acelerações laterais reduzidas. Este tipo de abordagem é bastante comum, pois facilita o entendimento da dinâmica veicular, além de possibilitar simulações computacionais. Por outro lado, modelos mais complexos e que permitam análises em condições adversas são muito pouco explorados e, quando feitos, são complicados de analisar e desenvolver alguma simulação computacional, ou por exigir uma grande quantidade de cálculo matemático que demandariam técnicas de processamento paralelo, ou por não se ter métodos matemáticos ou programas que consigam interpretar tais modelos.

Pretende-se estudar a modelagem de sistemas de dinâmica veicular, baseados inicialmente nos trabalhos desenvolvidos em [2] e [3], adotando uma abordagem que preparará o modelo para posterior aplicação de controle. O resultado que se pretende alcançar corresponde à proposição de um modelo não linear, baseado no equilíbrio de forças e momentos, a ser utilizado como o sistema dinâmico que se deseja controlar.

Muitos estudos de controladores, aplicados a sistemas veiculares, fazem uso de teorias modernas de controle, tais como controle ótimo ou controle robusto [16] e [18]. Na indústria, com menor rapidez, a evolução das técnicas de controle só foi possível mediante os avanços tecnológicos e computacionais, sendo ainda hoje bastante comum o emprego de técnicas de controle clássico [7]. Porém, como acontece no caso da modelagem, o estudo e aplicação de controladores também se depara com a escolha entre simplificação e maior fidelidade. A grande parte dos trabalhos tratando de técnicas de controle prioriza a análise do controlador, em detrimento do modelo de sistema dinâmico que se utiliza. É bastante comum adotar suposições para os modelos que acabam os distanciando

de sua representação física. Porém, tais suposições permitem a proposição dos controladores, sua simulação e validação. Uma outra abordagem bastante comum é o projeto de controladores para os sistemas componentes da dinâmica veicular, como um sistema de tração, um sistema de freio, uma injeção eletrônica ou outros tipos de sistemas. Dessa maneira, como existem modelos para dinâmica veicular que fornecem respostas da real necessidade de força, momento ou potência para o sistema dinâmico, é mais simples projetar um controlador que garanta o correto funcionamento de um simples componente.

A escolha de técnica de controle a ser empregada neste trabalho foi feita em função do tipo de modelo proposto, não linear, sendo necessário o estudo da teoria para controle não linear [8], [20] e [22]. Dessa forma foi possível minimizar as suposições de simplificação sobre o modelo de dinâmica veicular, permitindo uma análise mais próxima da realidade. A técnica de controle não linear faz uso das não linearidades intrínsecas ao sistema veicular para projetar um controlador que garanta a sua estabilidade. Os resultados deste trabalho indicam a viabilidade de junção de modelos não lineares para dinâmica veicular, associado a técnicas de controle não lineares e abrem uma nova opção para o dilema sempre presente da simplificação do modelo a ser analisado.

Para que o estudo seja mostrado de maneira clara e seguindo uma concatenação lógica, o texto deste trabalho se divide em duas partes distintas. A primeira parte trata de modelagem de um sistema dinâmico para um veículo terrestre. Abrange os Capítulos 2, 3, e 4, distribuídos de maneira a facilitar o entendimento dos problemas relacionados.

O Capítulo 2 trata da modelagem das forças que atuam no pneu e em seu contato com o solo. Como este elemento é o responsável pelo acoplamento de todas as dinâmicas (lateral, longitudinal e vertical) com subsistemas de atuação (frenagem, propulsão e direção), é necessário que seu modelo apareça no início do texto. A partir de então ele será empregado no desenvolvimento dos demais modelos de dinâmica veicular abordados. O modelo de forças nos pneus corresponde a uma representação analítica, bastante utilizado em estudos e aplicações práticas [1] [9] [10] [11], e que emprega o conceito de elipse de aderência para determinação das forças longitudinal e lateral que agem nos pneus.

O Capítulo 3 inicia o estudo da modelagem da dinâmica veicular, propondo um modelo com quatro graus de liberdade, e que utiliza suposições

sobre o movimento do veículo de maneira a simplificar o entendimento inicial do problema. Também é empregada uma versão simplificada da modelagem dos pneus. Os graus de liberdade se limitam aos necessários para análise do movimento do veículo em uma superfície plana, caracterizando um dos objetivos deste trabalho, que é o controle de trajetória de veículos de passeio. Ao final do capítulo são apresentados resultados de simulações computacionais, procurando identificar o comportamento do modelo de veículo a manobras conhecidas: mudança de faixa de rodagem e curva de raio constante.

O Capítulo 4 por sua vez, apresenta a expansão do modelo obtido no capítulo anterior, mantendo suas não linearidades, além de incorporar mais quatro graus de liberdade que descrevem o que acontece em cada uma das rodas. Assim como o Capítulo 3, ao final deste capítulo também são apresentadas simulações computacionais, trazendo resultados que buscam identificar o comportamento do modelo a manobras conhecidas.

A segunda parte, composta pelos Capítulos 5, 6 e 0, abrange a teoria de controle e sua aplicação sobre os modelos propostos, além de serem apresentadas simulações computacionais para validação da técnica proposta.

O Capítulo 5 apresenta inicialmente, a teoria de controle não linear, identificando cada passo necessário ao projeto do controlador. Em uma segunda etapa, a teoria é aplicada ao modelo de quatro graus de liberdade (Capítulo 3) e também ao de oito graus de liberdade (Capítulo 4), resultando nas leis de controle que deverão ser implementadas para validação da técnica. A teoria inclui, além do cálculo do controlador, análise de estabilidade do sistema em malha fechada.

Já o Capítulo 6 apresenta a aplicação da teoria de controle ao modelo de quatro graus de liberdade, desenvolvido na primeira parte deste trabalho. Ao final do capítulo é apresentada uma seção de simulação computacional do controle aplicado ao modelo. Seus resultados são então discutidos, acabando-se por validar a técnica proposta.

O Capítulo 7 traz as conclusões sobre as simulações, além de propor linhas gerais para trabalhos futuros, que visam dar continuidade ao que foi abordado ao longo deste texto.

Por último o Anexo 1 traz uma tentativa de aplicação do controle ao modelo de oito graus de liberdade, com observações e sugestões para sua melhoria.