

1

Introdução

Os veículos de competição desenvolvem a tecnologia automotiva de ponta. Trabalhando com velocidades e acelerações muito elevadas, para o estudo e compreensão do comportamento dinâmico deste tipo de sistema é necessária a união de diversas disciplinas, entre elas: dinâmica, controle e otimização. O presente trabalho pretende tratar com determinadas partes de todas essas matérias relacionadas à Dinâmica Veicular, abordando um problema multidisciplinar, empregando as ferramentas necessárias, visando estabelecer um procedimento para a avaliação do comportamento dinâmico de veículos de competição a alta velocidade em traçados pré-definidos.

1.1

Motivação para o estudo

“Apesar de gostar muito dos automóveis, e já ter dirigido muitos carros na minha vida, nunca entendi ou me preocupei profundamente com sua dinâmica. Acredito que só agora tenha os conceitos e as ferramentas necessárias para estudo desta “intrigante” matéria, e posso compreender exatamente o comportamento dos veículos durante seu movimento. Neste aspecto, o que mais chama a minha atenção é a dinâmica dos veículos a altas velocidades, como nos carros de competição, em especial os de Fórmula 1, que trabalham em condições extremas de estabilidade, onde os milésimos de segundos são unidades relevantes para atingir o objetivo.” – Danny Hernán Zambrano Carrera.

Os modelos matemáticos são desenvolvidos para prever o funcionamento dos sistemas reais em função de seus parâmetros característicos, informação obtida a partir da simulação – solução e análise dos modelos – em determinadas condições de operação. A primeira simulação de veículos de competição surgiu, pelo que se tem notícia, na Mercedes Benz, entre os períodos de 1937 e 1939. As simulações começaram a ser mais formalmente utilizadas na década de 50 [1]. Assim esta não é uma área inexplorada, mas um recurso que tem muitos anos de

pesquisa, na qual diversos especialistas têm aplicado toda sua experiência, a fim de se tratar de forma cada vez mais consistente a dinâmica destes sistemas. Em veículos de competição com velocidades elevadas, o principal objetivo é chegar em primeiro lugar, o que significa percorrer um determinado número de voltas em uma trajetória fechada realizando algumas manobras para cumprir o circuito no menor tempo possível. Esta situação pode ser vista como um típico problema de otimização, no qual se deve obter a trajetória para o tempo mínimo de percurso satisfazendo as restrições físicas do veículo e geométricas da pista.

Estudos no sentido de otimizar o desempenho dos veículos de corrida são realizados por empresas e instituições de pesquisa que participam das competições automobilísticas. As finalidades básicas destes estudos são, entre outras: segurança do motorista, a prevenção do desgaste do veículo, aumento do seu desempenho, e finalmente ganhar a competição.

1.2

Revisão sobre o estado da arte

“... E irá ser possível construir veículos que se movimentem sem serem puxados por animais, propelidos por uma força inimaginável ...” Esta profecia foi escrita pelo acadêmico e filósofo inglês *Roger Bacon* (1219 a 1292) cerca de 600 anos antes de Carl Benz receber a sua patente para um veículo com propulsão a gás, em 16 de Janeiro do ano 1886.

1.2.1

Dinâmica veicular

As áreas de conhecimento envolvidas na dinâmica veicular são: mecânica, física, sistemas de controle, eletrônica, instrumentação, otimização, entre outras. Este tema é bastante complexo, mas também é muito interessante, já que permite o estudo simultâneo de várias áreas, o qual leva a um trabalho multidisciplinar integrado, onde especialistas devem atuar em harmonia para obter um objetivo comum. O desenvolvimento de modelos matemáticos e as análises do comportamento dinâmico de um veículo são fundamentais para a compreensão dos mecanismos que caracterizam os seus movimentos.

Por uma questão de conveniência, em análises preliminares, costuma-se dividir os estudos da dinâmica veicular em função dos três grandes subsistemas de um veículo, a saber:

- Dinâmica longitudinal: que estuda o movimento longitudinal e rotações em torno do eixo lateral (*pitch*) em resposta a torques aplicados às rodas devido aos sistemas de transmissão e freios;
- Dinâmica vertical: que estuda o movimento vertical e as rotações em torno dos eixos longitudinal (*roll*) e lateral (*pitch*) em função de irregularidades da pista, transmitidas pelo sistema de suspensão;
- Dinâmica Lateral: que envolve o movimento lateral e as rotações em torno do eixo vertical (*yaw*) e longitudinal (*roll*) como resultado da atuação do sistema de direção.

O veículo e seus subsistemas empregados nos estudos da dinâmica veicular podem ser ilustrados pelo diagrama da Figura 1.1.

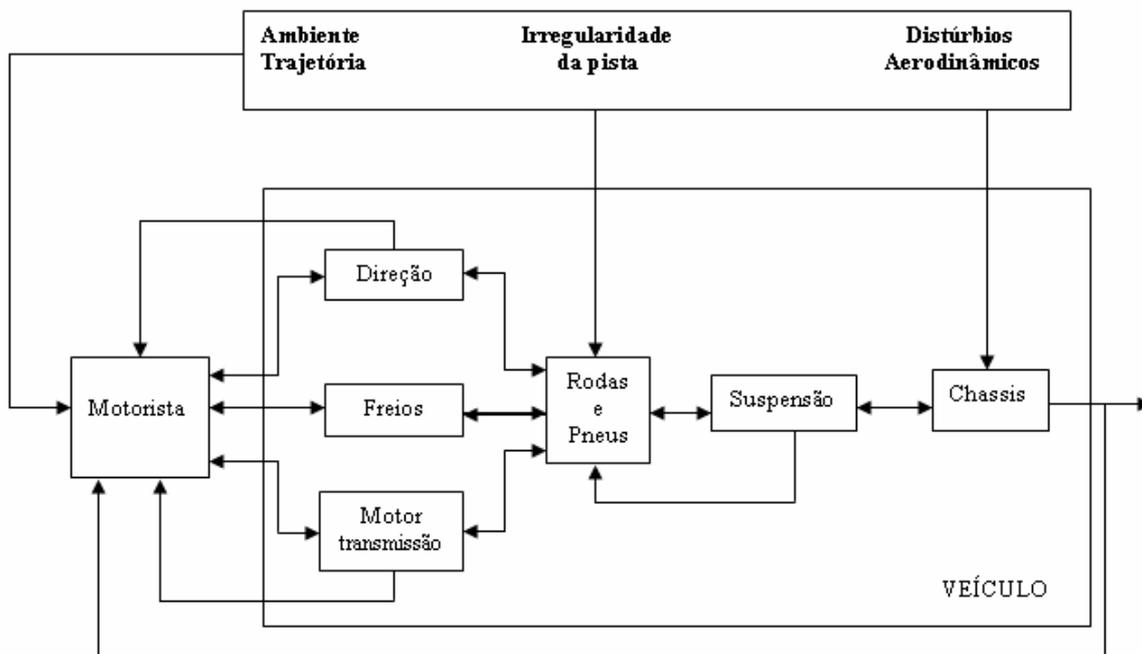


Figura 1.1 Diagrama de blocos representativo de um veículo terrestre.

Na Figura 1.1 pode-se ver com muita clareza que o veículo é um sistema complexo, onde o motorista tem que perceber, além do seu comportamento, no que diz respeito à resposta do sistema de direção, e àquela da transmissão da potência do motor, na geração da sua trajetória, também a influência do ambiente

onde o veículo se está movimentando, para poder dirigir da melhor forma e obter o desempenho adequado. Não se deve esquecer que os componentes internos do veículo estão interligados, isto é, a alteração de um componente pode afetar outro e vice-versa, e assim sucessivamente. O ambiente onde o veículo se movimenta gera esforços que afetam diretamente o seu comportamento. As forças externas presentes na dinâmica veicular são: gravitacionais, aerodinâmicas, e as geradas no contato pneumático/pavimento.

Existem diversas publicações na literatura nas quais se trata dos problemas da Dinâmica Veicular. Por exemplo, naquelas dos autores *Smith* e *Starkey* nos anos 1994 e 1995 [6] [7], se estuda a dinâmica lateral dos veículos terrestres. Nesses trabalhos se fez a avaliação de um modelo dinâmico com controle para a mudança de direção do veículo. Este mesmo modelo foi utilizado como base para o presente trabalho. Outra publicação onde se estuda a dinâmica lateral dos veículos terrestres, é a de *Will* e *Zak* no ano 1997 [8], na qual se tem o desenvolvimento mais detalhado do modelo empregado, que é similar àquele apresentado por *Smith* e *Starkey*.

1.2.2

Modelos do veículo

Em engenharia, a palavra modelo possui dois significados: modelo em escala, que é um arranjo similar à situação real (leis e escalas apropriadas); e modelo matemático, que se conhece como o estabelecimento de equações matemáticas correspondentes a princípios ou leis físicas ou ainda a relações empíricas. O uso de modelos matemáticos na dinâmica de veículos é um dos mais importantes recursos de desenvolvimento de produto para a indústria automobilística, em função de redução de custos e tempo de análise e desenvolvimento que proporciona. Em dinâmica de veículos encontram-se duas abordagens: modelos simples obtidos manualmente, através da aplicação de princípios físicos bastante simplificados ao comportamento do veículo; modelos complexos obtidos com o auxílio de computadores, baseados em descrição detalhada do veículo e seus subsistemas (motor/transmissão, suspensão, sistemas de freios, sistema de direção).

Para análise das trajetórias de veículos terrestres existem diversos modelos dinâmicos, de diferentes níveis de complexidade, que são empregados em função do tipo de problema que se pretende tratar. Um dos principais elementos destes modelos é a representação da capacidade de geração de força dos pneus, que resulta na aceleração do veículo como um todo, em qualquer direção (tração, frenagem e curvas), através do chamado “círculo de aderência”. O correto uso das informações contidas nesta “figura” possibilita obter o máximo desempenho do veículo em qualquer condição de operação. Para se percorrer um circuito fechado no menor tempo possível deve-se atender às restrições dinâmicas do veículo e conseqüentemente da sua capacidade de gerar aceleração nas diversas direções.

Para estudo particular apresentado neste trabalho foram criados três modelos matemáticos para o veículo: modelo massa pontual, onde apenas se considera o veículo como um ponto no espaço, sem geometria, sujeito a forças longitudinais e laterais; modelo cinemático, onde não se considera a ação das forças, mas apenas sua influência na variação do movimento do veículo, tratado com geometria, mas sem inércias, no qual o sistema se encontra em regime estacionário; modelo dinâmico, onde se levam em conta as forças que geram as acelerações, e conseqüentemente o movimento, e também as características físicas e geométricas do veículo.

Na bibliografia do presente trabalho, encontra-se uma publicação feita nos anos oitenta, onde se fez um estudo não dimensional das características dinâmicas dos pneus de um veículo terrestre [2]. Neste trabalho pode-se facilmente entender a relação entre as forças laterais nos pneus em função dos ângulos de esterçamento da roda, no qual se apresenta a natureza não linear do modelo das forças laterais. Nesta mesma década foram publicados dois artigos, [3] [4], nos quais se trabalha utilizando a teoria de controle ótimo para a simulação de um veículo terrestre se movimentando. Essas publicações empregam um modelo cinemático linearizado do veículo, e se estudou principalmente a mudança de direção do veículo, e as formas de controle a serem aplicadas na simulação deste tipo de caso. É bom ressaltar que nestas publicações, como forma de resolver o problema, emprega-se o controle ótimo. No presente trabalho pretende-se aplicar apenas a teoria de otimização, e um modelo veicular mais completo e detalhado. Em uma publicação muito interessante feita por *Maalej & Guenther & Ellis* [5], no ano 1989, é possível verificar as características das forças e momentos nos

pneumáticos. Neste artigo se faz a comparação de diferentes modelos para representar tais esforços, e dos resultados encontrados utilizando cada um deles com aqueles obtidos experimentalmente.

1.2.3 Métodos de Otimização

Dado que é possível descrever matematicamente o problema de um veículo percorrer uma determinada trajetória através de um modelo, assim como as restrições a ele impostas neste percurso, é viável empregar alguma metodologia para obter a solução ótima desse problema. Deste modo, técnicas de otimização conhecidas serão adotadas para determinar a trajetória de tempo mínimo, empregando uma função objetivo e restrições que definam tal problema, considerando as limitações associadas à geometria do traçado, características de potência do veículo, aderência dos pneus, limites no sistema de direção, e o próprio comportamento dinâmico do veículo, quando for o caso.

Neste trabalho será estudado como definir tal problema e analisar as soluções possíveis. Não será aqui implementado qualquer algoritmo de otimização, uma vez que serão empregadas as rotinas existentes na *Optimization Toolbox* do *MATLAB*, escolhendo o método mais adequado para os casos de interesse.

Deve-se observar que não foi aqui resolvido um problema de controle ótimo, pois o cerne deste trabalho não trata de controle, mas sim da obtenção de uma trajetória ideal, que posteriormente servirá de entrada para um problema de controle, que por sua vez será resolvido através de outras metodologias. Para solução do problema de otimização foi empregado um modelo do veículo no qual sua dinâmica foi tratada de uma forma simplificada, porém suficiente. Entretanto, quando o veículo for representado por um modelo dinâmico mais completo e detalhado, incluído como restrição do problema de otimização, poderá ser necessário adotar alguma estratégia de controle ótimo, pelo simples fato de se ter um sistema de equações diferenciais associados ao problema de otimização.

Geralmente este problema de trajetória ideal é tratado através de procedimentos de controle ótimo. Na pesquisa bibliográfica realizada foram encontrados muitos artigos com este enfoque. Por exemplo, em duas publicações

muito recentes de *Velenis* e *Tsiotras* [9] [10], se utiliza o modelo bicicleta com suspensão para estudar a transferência longitudinal de carga durante o movimento do veículo, tentando avaliar o seu estado limite de estabilidade, isto é quando os pneumáticos funcionam no limite de aderência. Nesses artigos o problema é resolvido através de controle ótimo, no qual são empregadas duas funções objetivo [9]: uma de tempo mínimo de percurso, e outra maximizando a velocidade de saída da curva do veículo. Cada caso é tratado com e sem suspensão para verificar os seus efeitos no comportamento do veículo. Pode-se observar que a influencia destes componentes não é significativa neste aspecto. O fato de destaque destas publicações é que as trajetórias ótimas obtidas para os objetivos de tempo mínimo e de velocidade na saída da curva máxima são diferentes [9]. Aquela do tempo mínimo tende para um arco de círculo, o que é muito compreensível já que se deseja a maior velocidade e a menor distancia percorrida possíveis. A trajetória obtida para o caso de velocidade máxima na saída da curva é de raio máximo nesse ponto do traçado, isso porque o veículo pode acelerar enquanto ainda está dentro da curva e assim maximizar sua velocidade de saída. Da leitura destes artigos, um fato relevante para as análises que se seguem foi observado e é aqui transcrito: na entrada de uma curva as rodas dianteiras são as mais importantes, já que é nelas que a força centrípeta é inicialmente aplicada e o momento de desvio (*yaw*) produzido; por sua vez na saída de uma curva as rodas traseiras têm maior importância, porque elas geram o movimento de *yaw*.

Em outra publicação [10], são gerados perfis de aceleração e desaceleração para um modelo bicicleta que percorre uma curva em alta velocidade. Para isso se baseia no diagrama G-G, e as variáveis do controle ótimo são as forças dianteiras e traseiras dos pneumáticos.

Uma das publicações analisadas, de *Casanova* e *Symond* no ano 2000 [1], trata das manobras de tempo mínimo, na qual é utilizado um modelo um pouco mais complexo do veículo, que considera a forças aerodinâmicas e também a influência das massas dos conjuntos roda-pneu, que se aproxima mais da realidade dos veículos de competição, já que neste caso estas variáveis e parâmetros são muito importantes para a estabilidade e dirigibilidade. Neste artigo se utiliza um algoritmo seqüencial de programação quadrática para determinação da trajetória ótima, resolvendo o problema por otimização sem considerar diretamente a teoria de controle ótimo, incluindo entretanto algumas variáveis de controle. Observa-se

que nesta publicação as soluções ótimas são encontradas para trechos abertos, e que posteriormente são unidos, fazendo coincidir as condições iniciais e finais de cada um deles, para se obter a trajetória ótima para uma pista fechada.

1.2.3.1 Problema do tempo mínimo

Neste trabalho o que se pretende é obter o tempo de percurso mínimo para um veículo se movimentando entre pontos bem definidos. Então tem que se estabelecer uma função objetivo que determine o *tempo* a ser minimizado, isto é, deve-se criar uma função que represente o tempo de percurso em função de todas as variáveis e/ou parâmetros que nele influenciem. Mas como fazer isso se todo o movimento de um veículo, e as variáveis que o caracterizam, dependem do tempo? Uma proposta de solução que se apresenta é criar funções matemáticas que descrevam, dentro de aproximações razoáveis, o comportamento físico dos carros de corrida – principalmente – nas condições em questão, nas quais o tempo não aparece explicitamente, utilizando-as para resolver o problema de minimização do tempo. Mas apenas isso não é suficiente, uma vez que a otimização da trajetória possui restrições, tais como a velocidade máxima ou a aceleração máxima, que também dependem do tempo, mas não podem ser expressas explicitamente em função dele. Um tratamento adequado também foi dado para as restrições que envolviam o tempo.

1.2.4 Estratégias de controle

Para poder observar o veículo se movimentando na pista é necessário fazer a simulação do seu movimento mediante uma malha de controle, procurando, por exemplo, analisar as manobras do motorista durante o percurso, e suas reações com relação ao que acontece com o veículo em cada instante do tempo. Os problemas de controle veicular vêm sendo estudados há algum tempo pelo Grupo de Pesquisa em Sistemas Veiculares do DEM-DEE/PUC-Rio, utilizando diversos modelos, estratégias e algoritmos, sendo que alguns desses já se encontram à disposição para uso nas mais variadas aplicações de interesse [11]. Entretanto o foco deste trabalho não foi nas estratégias de controle, uma vez que, para o caso

este será um aspecto secundário. No máximo será verificado como as restrições impostas estarão sendo satisfeitas ao longo do percurso do veículo, e como o controle deverá atuar para que isso ocorra. De acordo com os objetivos mencionados, conforme os resultados forem analisados, poderá ser estudado também como um motorista ou um piloto atua de modo a obter o máximo desempenho do veículo. Um outro problema nas estratégias de controle referente ao tipo de análise apresentado neste trabalho, mas não será aqui tratado, é o do controle do veículo em uma trajetória fechada. Neste caso em particular, existe uma dificuldade adicional na simulação computacional, devido a qual um algoritmo específico está sendo desenvolvido e implementado [12], permitindo tratar de relações matemáticas que definem uma curva na qual existem diferentes valores de uma das variáveis em função da outra, como ocorre quando se fecha uma trajetória em um referencial que não acompanha o veículo.

1.3

Objetivo da dissertação

Este trabalho é mais uma etapa no sentido de consolidar a área de Sistemas Veiculares na PUC-Rio. Já se possui uma relativa experiência nos modelos matemáticos empregados para representar a dinâmica veicular. Está se avançando no uso das estratégias sofisticadas de controle no problema de comando de trajetória e atitude dos veículos. Já se iniciou o estudo das características de resposta ao impacto de veículos tratados por modelos rígidos e flexíveis. Entretanto pouco se fez no sentido de estabelecer a influência do ser humano no comando dos veículos e a otimização das suas características de desempenho em condições extremas de uso. Esta dissertação pretende iniciar uma série de trabalhos visando dominar esse item.

O presente trabalho tem por objetivo adotar um modelo apropriado para um veículo terrestre, a fim de obter sua trajetória ótima em traçados pré-definidos, visando percorrê-lo no menor tempo possível, aplicando as teorias de dinâmica veicular, de otimização e de controle, implementadas em algoritmos através do *Simulink/MatLab*.

1.4 Descrição da Dissertação

O presente trabalho está formatado em seis capítulos, conforme a seguir:

Capítulo I, Introdução, no qual explicam-se alguns conceitos gerais de dinâmica veicular e otimização, realiza-se uma análise preliminar do problema, e também uma breve descrição dos trabalhos publicados na área, para finalmente, indicar os objetivos a serem alcançados.

Capítulo II, Modelo do Veículo, onde se detalham alguns conceitos relacionados às características dinâmicas de um veículo, mais voltados àqueles de competição, e trata-se de explicar sua representação matemática segundo um modelo suficiente para o problema que se deseja tratar.

Capítulo III, O Problema de Otimização, no qual explica-se a forma de abordar o problema para os veículos de competição, e também se mostra as considerações que devem ser feitas para obtenção do movimento ótimo do veículo em um percurso pré-determinado. Detalha-se a forma de obter a trajetória ótima para um veículo terrestre, o desenvolvimento do equacionamento correspondente a este problema e as soluções do mesmo, assim como a implementação no programa *Matlab*.

Capítulo IV, Simulação da Trajetória Ótima, onde se apresentam os resultados obtidos para casos diversos, unindo os conceitos e procedimentos tratados nos capítulos anteriores.

Capítulo V, Conclusões e Recomendações, no qual são apresentadas algumas conclusões e recomendações para futuros trabalhos.