

## 2 Revisão Bibliográfica

Este capítulo apresenta o embasamento teórico que justificou a proposição de uma nova estratégia de controle segmentada, para aumentar a estabilidade global de um sistema mecatrônico qualquer.

Em [1] realizou-se o desenvolvimento de um modelo representativo de um veículo terrestre, com a aplicação de técnicas de controle não-linear para acompanhamento e/ou rastreamento de trajetórias planas. Os resultados obtidos com a modelagem possibilitaram a formalização de um modelo simplificado, com quatro graus de liberdade e aplicação de controle não-linear, baseado em álgebra de Lie. Apesar de não-linear, o modelo de quatro graus de liberdade focou a descrição da dinâmica do veículo, apresentando somente os movimentos laterais, longitudinais, angulares de *yaw* (guinada) e angulares de *roll* (rolagem). Não chegou, em nenhum momento, a considerar o que ocorre nas rodas, ou como é feita a transmissão de torques e momentos de outros subsistemas, como freio e tração, para o desempenho global da dinâmica veicular. Para compensar esta desconsideração, adotou-se um tratamento das forças que atuam nos pneus, mais especificamente no contato pneu-solo, apenas nas regiões de linearidade de suas curvas representativas, deixando o modelo final de veículo terrestre bastante simplificado e limitado a pequenos deslocamentos angulares e velocidades.

Em [1] foi proposto, também, um segundo modelo, mais representativo e complexo, com oito graus de liberdade. Além dos quatro movimentos do modelo anterior, também foi incluída uma modelagem da dinâmica das rodas e o tratamento analítico das forças que atuam no contato pneu-solo. Desta maneira sua simulação computacional tornou-se muito demorada, além de exigir a definição de suas condições iniciais de maneira bastante precisa.

Em uma sequência ao trabalho desenvolvido em [1], e na tentativa de simplificar a abordagem de modelagem de veículos terrestres, começou-se a aplicar em [2] uma técnica de linearização por partes. Ela consistiu em dividir o domínio, ou espaço de estados do modelo, em pequenos pedaços, linearizá-lo no

entorno de um ponto central a este pedaço e verificar sua validade, com a aplicação de controladores mais simples que o controlador não-linear por álgebra de Lie.

Uma primeira pesquisa, realizada para o emprego de estratégias de controle em equações não-lineares que representem uma dinâmica veicular, convergiu para a referência [3]. O objetivo é o de simplificar os modelos não-lineares usando uma abordagem bastante interessante da teoria de sistemas não-lineares por partes, que se aproxima da idéia de simplificação da modelagem em questão. O propósito de [3] é encontrar um conjunto de controladores para sistemas não-lineares de maneira automática. Para tanto, considera-se um sistema do tipo

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \quad \therefore x \in D \quad (2.1)$$

onde  $D \subset R^n$  é o domínio do sistema. Cria-se uma função vetorial  $C: x \rightarrow R^L$ , que define variáveis chamadas separativas  $\{C_j(x)\}$ , continuamente diferenciáveis, e que levam em consideração as não-linearidades do sistema. Estas variáveis separativas são definidas como uma, ou mais, das variáveis de estado, geralmente as de maior importância para o desempenho do sistema. Uma vez escolhidas as variáveis separativas, divide-se então o domínio  $D$  desta variável em subdomínios  $D_i$ . Lineariza-se  $f(x)$  usando expansões de 1ª ordem em série de Taylor, no entorno de um ponto conhecido, de forma a permitir a aplicação da teoria de controle ótimo com a obtenção de um controlador LQ. Testa-se o desempenho do sistema controlado pelos controles LQ por partes e, de posse dos resultados, é feita uma nova proposição para melhorar o desempenho do sistema. Uma vez obtidos os controles em cada subdomínio  $D_i$ , são definidas funções de escolha automática que realizam a união de todos os controles para cada região do domínio  $D$ , aumentando a região de validade de cada controlador. O próximo passo corresponde a analisar a estabilidade do sistema controlado, que se faz usando a teoria de Lyapunov para análise de estabilidade. São apresentados dois exemplos numéricos onde a metodologia foi aplicada com êxito e que indicam uma melhora nos resultados obtidos originalmente com controle ótimo LQ.

O interessante desta referência [3] para o estudo de controle de trajetória em dinâmica veicular diz respeito à viabilidade de dividir o domínio do sistema em partes e, em cada um deles, construir um controle específico, que depois é unido aos demais criando um controle único, que garante estabilidade em cada uma das regiões específicas do espaço de estados. Como o modelo de dinâmica veicular apresenta uma necessidade de separação no espaço, para melhor caracterizar cada um dos diferentes tipos de comportamento do veículo, a referência [3] se transforma em um interessante ponto de partida. Porém é necessário ressaltar que, por mais que se permita uma melhor análise ao longo de todo o domínio do sistema veicular, com a separação dos comportamentos distintos característicos, ainda não é possível resolver a questão dos limites físicos de funcionamento do sistema.

A partir do estudo de [3], foi possível propor uma abordagem inicial para o problema de controle de sistemas não-lineares por partes, usando a mesma idéia de subdividir o domínio do espaço de estados, ou apenas o domínio correspondente a algumas variáveis do espaço de estados – chamadas de variáveis separativas – em subdomínios conhecidos. Em cada subdivisão, e somente para aquela subdivisão, o modelo era, então, linearizado por aproximações de série de Taylor de 1<sup>a</sup> ordem, em torno de um ponto central ao subdomínio. De posse do sistema linearizado, calculou-se um controlador, válido apenas naquele subdomínio, que garantia a estabilidade do sistema e que, quando composto com os demais controladores para as demais regiões do domínio do espaço de estados, formava o controlador não-linear por partes inicialmente pensado. Os resultados dessa abordagem permitiram a verificação inicial do funcionamento da técnica, conforme apresentado em [2].

A importância deste estudo preliminar, de construção de controladores não-lineares por partes, realizado com [2] e [3], reside no fato de permitir a utilização de modelos complexos para a obtenção de modelos linearizados localmente, e a consequente determinação de controladores locais, de validade limitada e conhecida, mas que ao serem combinados, conseguem garantir estabilidades globais para o sistema dinâmico não-linear. Dessa forma, permite-se a implementação computacional de modelos altamente não-lineares e complexos, ponto crítico para o emprego em sistemas físicos reais.

Mas mesmo assim, esta técnica pressupõe a existência, ou o desenvolvimento, de um modelo não-linear, complexo, que englobe todos (ou a grande maioria) dos sistemas que compõem a dinâmica veicular. Essa suposição inviabiliza a recuperação de informações sobre o comportamento específico de cada subsistema, bem como impede uma rápida e fácil substituição de qualquer componente (motor, suspensão, sistema de propulsão, freio, etc) por outro semelhante, se assim for necessário.

Mesmo sendo possível utilizar modelos complexos, altamente não-lineares, para a determinação de modelos linearizados, e controladores por partes, ainda assim é bastante complicado o trabalho de representação de toda a dinâmica veicular, em um único sistema de equações diferenciais. O primeiro motivo diz respeito ao número de subsistemas componentes, como apresentado em [1] e [4] a [13]. O segundo motivo diz respeito a conhecer, e bem, todos os domínios das variáveis de estado, de maneira a realizar a determinação das variáveis separativas e como elas subdividem o domínio do sistema. Se for considerado que a dinâmica veicular é composta por seis sistemas distintos, – mais especificamente o chassi, os pneus, o sistema de freios, o sistema de transmissão, o sistema de suspensão e o sistema de direção – percebe-se a quantidade de variáveis de estado existentes. Se todos os estados forem adotados como variáveis separativas, e não apenas os principais, então o algoritmo de linearização e determinação de controladores locais se transforma em algo bastante complexo e de difícil manipulação. Para evitar que isso aconteça, é necessário analisar cada um dos sistemas componentes da dinâmica veicular em separado, levando-se em consideração as interações entre cada um deles e que afetam o comportamento global do veículo.

Um estudo que se faz a respeito do funcionamento de cada um dos subsistemas, tanto em separado quanto em conjunto, é apresentado na tese de doutorado de Brandão, [10], na qual se estabelece uma hierarquia entre todos os subsistemas componentes da dinâmica veicular, de maneira a organizar as demandas e os esforços de controle, solicitados durante a operação do veículo. Parte-se do pressuposto de que os sistemas a serem controlados, e seus respectivos controles, são sistemas presentes na indústria automobilística atual e que, portanto, basta organizar suas interações. Os sistemas componentes, neste caso, são:

- Sistema de frenagem e controle *ABS* (*Antilock Brake System*);

- Sistema de tração e controle *TCS (Traction Control System)*;
- Sistema e controle de suspensão *ASUSP (Active Suspension)*;
- Sistema de Direção, controle *DYC (Direct Yaw Control)* e controle *ARWS (Active Rear Wheel Steering)*.

Dentre todos estes sistemas apenas os controles para *ABS*, para *TCS*, para *DYC* e para *ARWS* são abordados em [10]. A parte de controle de suspensão é mencionada como possibilidade de trabalho futuro e deixada para uma continuação do trabalho desenvolvido.

Ao comparar os sistemas descritos em [10] com os apresentados nos artigos em [4], percebe-se que todos são subsistemas do veículo, bastante utilizados nos automóveis atualmente, e que possuem comportamentos e papéis específicos na dinâmica veicular. Cada um desses subsistemas representa uma ação de controle isolada, que atua no veículo de maneira a obrigá-lo a cumprir seu comportamento específico projetado. Assim, a referência [10] se concentra em determinar coordenadores para a ação de cada um dos controladores, evitando conflitos ou insuficiências de desempenho, para atender a mais de um sistema da dinâmica veicular.

Uma primeira medida adotada corresponde a determinar quais são as informações necessárias ao funcionamento independente de cada um dos coordenadores de ação de controle, que devem permanecer visíveis a todo instante, e para quais indivíduos do sistema hierarquizado de controle estas informações devem ser disponibilizadas. Assim, cria-se uma estrutura de informações virtual, chamada de *VSS (Virtual Sensor Structure)*, que pretende disponibilizar estas informações aos diversos subsistemas do veículo. O *VSS* se divide em três partes, procurando organizar as informações em níveis de importância ou necessidade de processamento. São elas:

- Parte 1: Dados medidos. É composta pelo condicionamento dos sinais medidos com os sensores, sejam eles de velocidade, aceleração, pressão, temperatura, ou outros;
- Parte 2: Dados estimados. É composta por estimadores de Kalman e Fuzzy, que calculam os estados do veículo a cada nova amostragem dos sensores;

- Parte 3: Dados complementares. É composta por estimadores de condições ambientais, tais como tipo (de terra, asfaltada, de areia) e condições (lisa, esburacada, com aquaplanagem, com gelo) de pista e do ar (com ou sem vento e sua direção), parâmetros usados nos modelos dinâmicos e avisos de falha, entre outros.

Talvez o VSS seja o ponto de maior importância de [10], pois estabelece quem são as informações necessárias à integração de diferentes subsistemas, tornando-as visíveis, a todo instante, e para todos os componentes do sistema veicular. Além disso, modifica o conceito de informação disponível para qualquer um dos subsistemas componentes da dinâmica veicular.

Define-se então o conceito de coordenadores de controle, que irão determinar quais subsistemas serão atuados, em função da ação que estiver sendo desempenhada. Junto com a idéia de coordenadores, está o conceito de controle baseado em comportamento. Por comportamento, entende-se uma maneira prevista, ou repetida, pela qual o veículo deve agir ou responder. E como é natural, para cada comportamento ocorrer é necessário que exista um estímulo, que fará com que o comportamento dê uma resposta conhecida, conforme a Figura 1.

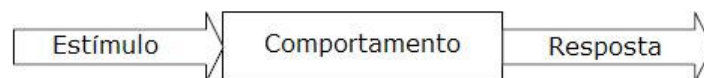


Figura 1: Diagrama de Estímulo-Comportamento.

Cada coordenador local gerencia os comportamentos de um único subsistema, como o *ABS*, o *TCS*, ou outro qualquer, determinando o controle e a estabilidade daquele subsistema em particular. Da mesma forma como existe mais de um comportamento por subsistema, também existe mais de um estímulo e mais de uma resposta possível, e é preciso determinar a importância de cada um deles, dentro do subsistema dinâmico. Assim surgem dois cenários possíveis para a atuação de cada coordenador, como apresentado na Figura 2 e na Figura 3.

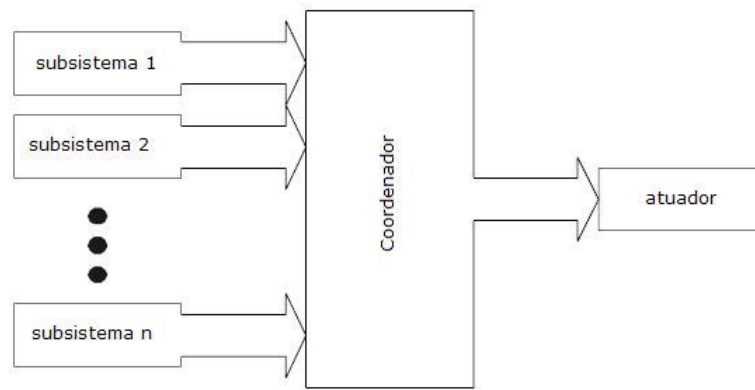


Figura 2: Primeiro cenário para o coordenador.

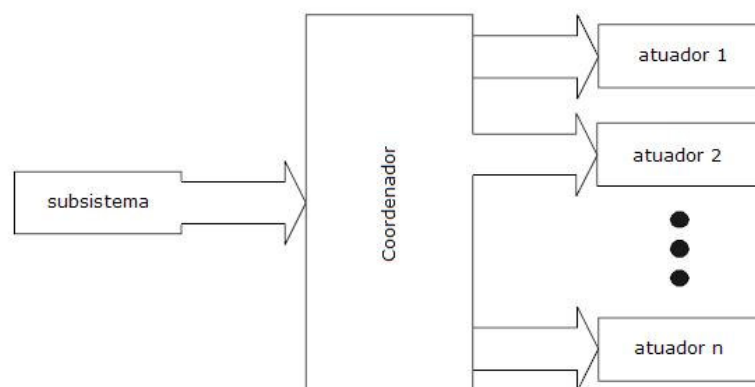


Figura 3: Segundo cenário para o coordenador.

O primeiro cenário, Figura 2, corresponde à situação de vários comportamentos, ou subsistemas, querendo acessar um único atuador. Dessa forma, se não houver uma coordenação pode haver um conflito e, ou o atuador pode responder de maneira excessiva, ou pode até não responder aos estímulos que foram gerados e, assim, o sistema perderia estabilidade. O segundo cenário, Figura 3, apresenta a situação contrária, onde um único comportamento, ou subsistema, pode gerar mais do que uma resposta, necessitando prover ação para mais de um atuador do mesmo subsistema. Para evitar que algum desses atuadores fique sem a resposta adequada, entra em cena, mais uma vez, a figura do coordenador de controle.

Assim, o coordenador de controle tem a função de resolver eventuais conflitos entre comportamentos e/ou atuadores, provendo a resposta adequada a cada um deles. Além disso, cada coordenador pode ter uma abordagem diferente, ora incentivando uma competição entre os comportamentos, ora dividindo os esforços por entre todas as demandas. Quando atua de forma competitiva, o

coordenador escolhe um único comportamento que irá determinar a saída para o atuador. Quando em abordagem cooperativa, o coordenador realiza uma média entre os sinais de comportamento, para gerar apenas uma única saída.

Além dessas duas abordagens, é possível utilizar uma terceira opção, construída a partir da combinação entre as duas abordagens anteriores. Esta passa a se chamar de abordagem híbrida, realizando uma hierarquização entre todos os comportamentos. Essa abordagem altera os pesos de cada comportamento na composição da resposta final, priorizando um determinado comportamento que seja dominante, conforme pode ser observado na Figura 4, a seguir.

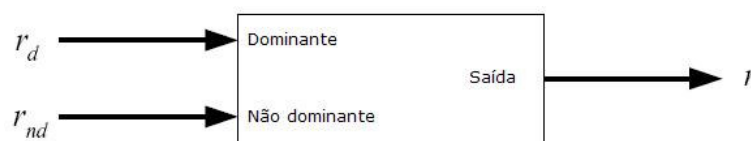


Figura 4: Abordagem híbrida.

A representação da relação ponderada entre os comportamentos pode ser mais bem compreendida através da Equação (2.2),

$$r = \xi r_d + (1 - \xi)^n r_{nd} \quad (2.2)$$

onde  $\xi$  corresponde ao peso do comportamento dominante, que deve estar entre os valores 0 e 1. Percebe-se que o peso do comportamento não dominante é complementar ao peso do comportamento dominante e elevado a uma potência  $n$ , de maneira a permitir a tomada de decisão baseada em um único comportamento ou, então, em múltiplos comportamentos.

Chega-se, portanto, à conclusão da definição de um coordenador de controle, em âmbito local, que corresponde a um controlador local do tipo *ABS*, *TCS*, *ARWS*, *DYC*, ou *ASUSP*. Da mesma forma como foi definido o coordenador local, pode-se definir outro nível de coordenador, chamado de principal. Este novo nível de coordenação é responsável por determinar as tarefas de cada coordenador local, de cada subsistema. Também é o coordenador principal quem determina a hierarquia dos subsistemas e seus mecanismos de controle. Mais ainda, em caso de falhas de algum dos subsistemas, é o coordenador principal



quem redistribui as tarefas, baseado em orientação de uma terceira figura nesta metodologia de controle: o gerente.

O gerente tem como função determinar quantos e quais subsistemas estão presentes na dinâmica veicular. Ele é o responsável pela flexibilidade do sistema de controle global, permitindo a adaptabilidade a qualquer tipo de carro, e é o responsável por determinar a distribuição de tarefas no caso de alguma falha, em algum dos subsistemas componentes.

Com a definição destes três componentes (coordenadores de controle local, principal e gerente), define-se a estratégia de controle apresentada em [10]. Esses componentes, e a maneira como eles são construídos, baseiam-se em algoritmos de inteligência artificial, como algoritmos genéticos e lógica *fuzzy*.

Outro ponto que merece atenção é que não é feito um tratamento das restrições, presentes em cada um dos subsistemas componentes da dinâmica veicular. Isso, no entanto, mostrou ser de fundamental importância ao longo dos estudos realizados em [2] e [1]. Além de importante, é necessário para a aplicação do trabalho desta tese, saber qual o real limite de estabilidade da dinâmica veicular, seja ela por inteiro, ou em cada um dos subsistemas que a compõem.

Com base nos resultados supramencionados, decidiu-se buscar linhas de pesquisa que abordassem a questão da identificação, ou determinação, de uma região conhecida de estabilidade. A referência [14] trata do problema de determinação de um conjunto máximo seguro para sistemas alternantes.

O trabalho desenvolvido em [14] surge da necessidade de encontrar soluções para problemas de segurança, que consistem em determinar um conjunto de estados seguros, dentro do qual o sistema deveria operar. Esse problema corresponde, então, a determinar computacionalmente um conjunto invariante máximo, controlável, que esteja contido em um conjunto de restrições conhecidas. No entanto, ao invés de determinar esse conjunto máximo invariante, preferiu-se determinar um conjunto máximo seguro, que corresponde a uma aproximação interna do conjunto máximo invariante, garantindo a estabilidade e a segurança dos sistemas que operem dentro dele. Desenvolve-se, então, toda a metodologia para aplicação em um exemplo prático de controle de giro livre de um motor a combustão, para fazer frente às variações de carga quando não houver nenhuma marcha engrenada. Por variações de carga entende-se a utilização do ar condicionado e de dispositivos eletrônicos, entre outros, que ocasionam uma

maior demanda de potência do motor. No que diz respeito à representação do problema, o modelo desenvolvido para o controle de velocidade de giro livre de motores a combustão é tratado como um sistema híbrido, com dinâmicas a tempo contínuo e eventos discretos, como a geração do torque no motor.

A seguir são propostas definições para determinar o tipo de sistemas que se desejam controlar, bem como a maneira de representá-los. Também são feitas definições para os conjuntos máximos, invariante e seguro, de forma a permitir toda a proposição de algoritmos computacionais. Para simplificar o cálculo computacional, assume-se que os conjuntos máximos são poliedros e, utilizando os algoritmos recursivos para cálculo de uma aproximação interna ao conjunto máximo controlado invariante, é possível calcular um poliedro controlado máximo seguro que determine a região de estabilidade para o sistema dinâmico sob restrições. O poliedro máximo seguro será tão próximo ao conjunto máximo invariante quanto menor for um fator de expansão que determina esta aproximação. Este fator de expansão também é proposto em [14]. Dessa forma consegue-se desenvolver um algoritmo computacional, que converge em um número finito de passos, e que determina uma boa aproximação ao conjunto invariante controlado máximo, da dinâmica do motor em giro livre.

No entanto, [14] apresenta a evolução do problema de maneira bastante superficial, se concentrando mais nas definições matemáticas do que na apresentação da aplicação prática, o que faz necessário um maior aprofundamento no tema. Outro ponto que fica em aberto é o tratamento da metodologia para sistemas híbridos, como mencionado no início da referência. Ao longo do texto existe uma preocupação muito grande em definir, e bem, todos os conceitos para sistemas a tempo contínuo e a tempo discreto, mas não é abordada a questão do sistema híbrido.

Dando continuidade à pesquisa de cálculo de conjuntos invariantes controlados máximos, faz-se a análise da referência [15]. Semelhante a referência [14], esse artigo estabelece conceitos e propriedades para a determinação de conjuntos máximos seguros, a partir da determinação de poliedros aproximantes de um conjunto invariante máximo, representativo das restrições de um sistema linear, discreto, invariante no tempo e autônomo, ou de um sistema linear a tempo discreto com entradas de controle.

Diferente de [14], em [15] são abordados somente sistemas discretos, com a elaboração de dois algoritmos para a determinação dos conjuntos máximos seguros. Além disso, ambos os algoritmos apresentam uma metodologia que visa realizar o cálculo para determinação dos conjuntos seguros, apenas para restrições não redundantes, simplificando o tratamento. Do ponto de vista prático, [15] apresenta uma metodologia mais eficaz para a construção dos algoritmos para cálculo dos conjuntos seguros, bem como apresenta a possibilidade de determinar o conjunto máximo seguro apenas para as variáveis de estado, sem considerações de controle.

Outra referência sobre o assunto de conjuntos máximos seguros é a [16], que aborda a determinação dos mesmos algoritmos tratados em [14], [15] e [17], agora para sistemas híbridos, que são caracterizados por uma máquina de estados finita associada a um conjunto de sistemas dinâmicos.

Os resultados obtidos em [16] são interessantes, pois deixam clara a possibilidade de escrever a dinâmica veicular como um conjunto de sistemas híbridos, onde os eventos discretos poderiam ser interpretados como saídas dos domínios de estabilidade. Esta estabilidade seria restaurada ao ativar-se a função de reinício. Ela levaria o sistema dinâmico de volta para um ponto dentro do domínio de estabilidade, no caso o conjunto máximo seguro.

Uma referência mais detalhada que [16] é a referência [18], um relatório de pesquisa que apresenta como foram desenvolvidos os algoritmos de determinação de conjuntos máximos seguros para sistemas híbridos com restrições.

Os trabalhos apresentados pelas referências [14] a [18] são bastante interessantes e serviram de base para a proposta da tese, pois fornecem ferramentas para a determinação dos domínios de validade, ou estabilidade, dentro dos quais a dinâmica veicular poderia operar. No entanto, sua matemática complexa, aliada à complexidade do modelo de veículo pretendido aqui neste trabalho, acaba por inviabilizar futuras implementações computacionais, em virtude da quantidade de cálculos dinâmicos para a determinação de domínios de estabilidade. Além disso, para uma primeira abordagem sobre o tema da homeostase veicular, pretende-se averiguar a influência de sucessivas habilitações de sistemas sobre um domínio de estabilidade central, básico, que englobe modelos de veículos com subsistemas passivos e controlados a partir de um controlador central relativamente simples.

Uma linha de pesquisa alternativa estuda a elaboração de controladores distribuídos, para garantir os limites de estabilidade do veículo. A grande maioria das referências encontradas - [19] a [24] - trata a questão de controle diretamente nas rodas, mais especificamente na região de contato do pneu com o solo, modificando as forças longitudinal, lateral ou vertical.

Em [22] faz-se a análise de sistemas *ABS* baseados em limiares de desaceleração, buscando definir um modelo matemático de fácil compreensão. O artigo apresenta o equacionamento das forças presentes no contato pneu-solo, velocidades e acelerações das rodas e dinâmica do chassi. Na etapa de equacionamento das velocidades, estabelece um modelo que leva em consideração o torque fornecido à roda, como sendo um equilíbrio entre o torque proveniente do motor e o torque de frenagem, conforme apresentado na Equação (2.3),

$$T = T_m - T_f = T_m - \gamma P_f \quad (2.3)$$

onde o torque de frenagem é proporcional à pressão de frenagem (ou do pedal de freio sobre o atuador hidráulico).

Se o veículo estiver realizando apenas o movimento de frenagem, quando o sistema *ABS* estiver em operação, considera-se desprezível o torque proveniente do motor e a nova relação de torque passa a ser representada pela Equação (2.4),

$$T = -T_f = -\gamma P_f \quad (2.4)$$

No entanto, quando o veículo desacelera, alivia-se a pressão sobre o pedal de aceleração e reduz-se o torque do motor, baixando a velocidade de giro do motor, sem, no entanto desacoplá-lo do sistema de transmissão. Para tornar esta modelagem mais completa, seria necessário considerar a porção residual de torque proveniente do motor, que irá variar de acordo com a redução de marcha que estiver sendo aplicada. Lembra-se que quanto menor a marcha, o que corresponde a uma maior redução, maior o torque residual que é conhecido como “freio motor”. Seria importante levar este torque residual em consideração, para perceber sua influência sobre a atuação do *ABS*.

Em [22] propõe-se uma estratégia de controle de sistema *ABS* dividido em 5 fases de operação. Diferentes valores de torque de frenagem são definidos para trabalharem de acordo com o comportamento de aceleração da roda e de maneira integrada ao perfil de escorregamento do pneu, que também é medido. Com isso são estipulados alguns limiares que irão alterar a amplitude do torque de frenagem, determinando as diferentes fases de aceleração e/ou escorregamento.

A referência [20] aborda a questão de limitação do desempenho teórico de controladores integrados de dinâmica veicular, mais especificamente sistemas de esterçamento e de frenagem distribuídos para as quatro rodas. O propósito do trabalho é minimizar a carga de trabalho em cada pneu. Junto com [20], a referência [23] desenvolve um algoritmo de controle integrado, para esterçamento, frenagem e tração, buscando minimizar a soma quadrática das cargas nas quatro rodas. No entanto, não aborda o ciclo limite das forças dos pneus, o que não garante que o controlador mantenha estabilidade. A referência [20] também cita outra referência interessante, a [24], que adota um controlador hierarquizado de múltiplas camadas para o controle da dinâmica veicular.

Na 1ª camada hierárquica o controlador é responsável por calcular a força e o momento que são necessários para o veículo realizar um movimento específico. Essa determinação se faz pela atuação das interfaces de controle, pedais e ângulo de guinada do volante. As forças de cada um dos pneus são calculadas na 2ª camada hierárquica, baseado no conceito de elipse de aderência, que foi apresentado em [1]. O último nível do controlador hierárquico atua em cada uma das rodas de maneira independente, para que seja possível alcançar o valor de força desejado. Cada margem de aderência dos pneus é estimada usando a técnica de “*self aligning torque*” (*SAT*), bem como cada uma das forças longitudinal e lateral, preservando a característica de independência do controlador. Para viabilizar este controlador, faz-se uso de algoritmos de programação quadrática sequencial (*SQP*), que são responsáveis por calcular a magnitude e direção das forças nos pneus. Os cálculos devem obedecer às restrições físicas, que são os limites de forças e momentos resultantes, de maneira a maximizar a margem de aderência no contato pneu-solo.

Ao observar as referências aqui abordadas, pode-se perceber que todas possuem um ponto em comum: utilizam modelos parciais da dinâmica veicular, levando em consideração que apenas um segmento dela é necessário para o

levantamento de dados, suficientes para a tomada de alguma ação de controle. Essa estratégia pode funcionar para o desenvolvimento de controladores específicos ou locais, que afetam apenas subsistemas determinados do corpo total do veículo. Mas deixam de ser consideradas as influências de diversos outros subsistemas, que completam a dinâmica veicular, e que por estarem integradas ao veículo, exercem influências distintas. Influências estas que poderiam ser mais facilmente verificadas, ou controladas, se o controlador pudesse enxergar todos os subsistemas da dinâmica veicular, transformando o veículo em único organismo.

Ao observar a grande maioria das modelagens desenvolvidas para a dinâmica veicular, pode-se perceber que elas buscam um modelo detalhado, complexo e bastante representativo, como observado em diversas referências ([6] a [9], [25], [27] e [28]) e em algumas das publicações de maior renome na área (*Vehicle System Dynamics* e *SAE Papers*, por exemplo). No entanto a complexidade destes modelos vem sempre acompanhada de um preço: grande dificuldade de implementação computacional. Para evitar essa dificuldade são promovidas diversas linearizações nos modelos, sob condições específicas e controladas, que ainda o mantém válido para o que é proposto, que é o desenvolvimento de controladores locais especializados [11] a [13]. No entanto, a proposta de se ter um modelo não-linear, representativo e ao mesmo tempo implementável, fica distante.

Uma alternativa para se manter a complexidade e não-linearidade dos modelos de dinâmica veicular corresponde a tratar o veículo como um sistema multicorpos, como feito em [29] a [32]. Nestas referências, o autor divide o veículo em estrutura, sistema de direção e sistema de propulsão. Ainda dentro desta divisão, a estrutura do veículo é composta do chassi, do sistema de suspensão, do motor e de eventuais cargas, como passageiros e bagagens, conforme apresentado na Figura 5. O objetivo deste tipo de modelagem é a implementação computacional, para construção de *softwares* comerciais de simulação para a indústria automotiva.

Assim como diversos outros trabalhos de modelagem, as referências [29] a [32] utilizam técnicas voltadas para análises dinâmicas e de vibrações, como o princípio de Jordain e o formalismo de Euler. Os resultados destes equacionamentos ainda são modelos complexos e fechados, que não permitem muitas modificações de parâmetros ou subcomponentes [29]. Isso dificulta a

recuperação de informações como velocidades, forças e momentos, em pontos específicos do subsistema (Figura 6, por exemplo). Em geral o que se tem são as informações referentes às variáveis de entrada e saída do sistema, enquanto que as variáveis internas, que poderiam contribuir para uma melhoria no desempenho de controladores especializados, são deixadas inacessíveis.

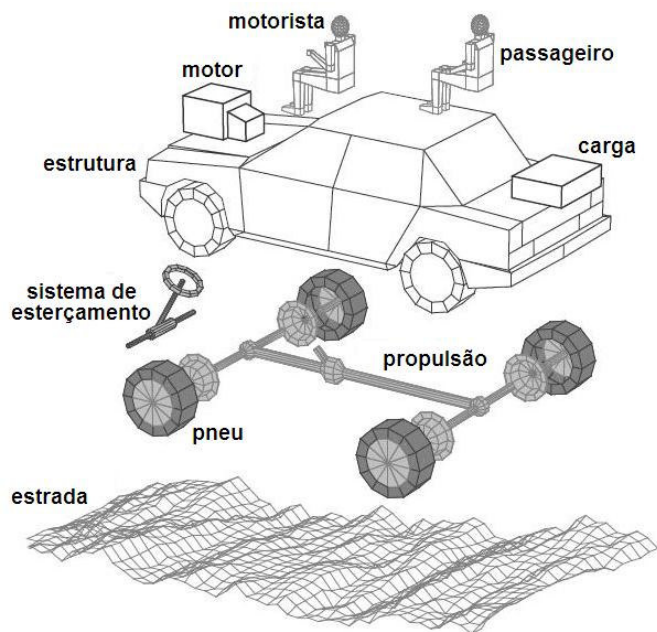


Figura 5: Exemplo de modelagem por subsistemas [29].

Poder-se-ia equacionar um modelo tão detalhado quanto se desejasse, explicitando todas essas variáveis internas. No entanto, a complexidade aumentaria absurdamente e, mesmo assim, ainda permitiria a possibilidade do sistema, ao ser integrado aos demais componentes da dinâmica veicular, acabar perdendo sua individualidade e dificultar a recuperação das informações a ele intrínsecas.

Outro ponto diz respeito ao propósito deste tipo de modelagem. Os modelos são construídos para que se façam análises estruturais e de vibrações, seguindo a idéia de elementos finitos, de modelagem por multicorpos, ou multielementos. São modelos computacionalmente pesados, inviáveis para análises instantâneas, para geração de uma ação a partir de um controlador e trabalho em tempo real.

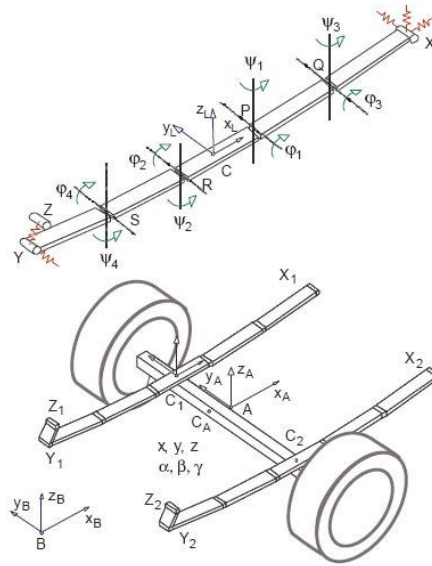


Figura 6: Exemplo de modelagem por multicorpos, para análises estruturais.