

1 Introdução

1.1. Objetivo

O presente trabalho propõe um procedimento de modelagem modular para os subsistemas existentes em um veículo terrestre, em que o grau de detalhamento depende do problema a ser resolvido pelo usuário. Os módulos, representando alguns dos subsistemas do veículo (chassi, suspensões, direção, rodas e pneus), contêm equações de movimento, no caso de corpos rígidos, suas relações constitutivas, no caso de elementos complacentes (molas e amortecedores) e relações cinemáticas que caracterizam a geometria, no caso das suspensões e do mecanismo de direção, e devem ser independentes.

Como o procedimento é modular, é possível adicionar à biblioteca existente, modelos desenvolvidos em outros trabalhos, desde que as relações de causa e efeito entre as variáveis de entrada e saídas nos módulos sejam mantidas. Uma vez pronto o modelo do veículo, pode-se utilizá-lo para avaliar, por exemplo, a dinâmica lateral quando um módulo de pneu for substituído por outro com um modelo matemático mais completo. Assim, o nível de detalhamento é dado pelo usuário, que define seu modelo de veículo conforme sua necessidade.

1.2. Posicionamento

Há diversos modelos matemáticos para o problema da dinâmica de veículos, alguns com o objetivo de analisar determinados componentes, como, por exemplo, as forças de flexão na haste do amortecedor [68], outros com o objetivo de analisar a dinâmica lateral [37] e outros o comportamento dinâmico do veículo em situações definidas [24]. A complexidade do modelo depende do problema que se quer estudar e avaliar.

Os casos mais clássicos de modelos matemáticos de veículos são os classificados como modelos lineares. Nestes modelos, as equações de movimento

da massa suspensa (chassi) e das massas não-suspensas (rodas) são obtidas levando-se em consideração pequenos deslocamentos. Frequentemente, nesses modelos, não se consideram nem a geometria das suspensões nem a do mecanismo de direção, não há previsão para a perda de contato do pneu com o solo, e as relações constitutivas dos elementos complacentes (mola e amortecedor) são lineares, dentre outras simplificações. Estes modelos são muito bons para se ter uma visão geral do problema que se quer de fato resolver, sendo empregados como precursores dos modelos mais detalhados. Com a visão geral do comportamento dinâmico do veículo sem elementos pormenorizados, consegue-se verificar como o veículo responde a determinados sinais de entrada. Em modelos lineares de $\frac{1}{4}$ de veículo, por exemplo, emprega-se o sistema massa-mola-amortecedor de dois graus de liberdade, que são os deslocamentos verticais dos centros de gravidade das massas, onde a suspensão é simplesmente representada por seus elementos complacentes. Nos modelos lineares de $\frac{1}{2}$ veículo busca-se estudar o movimento de arfagem (ou a rolagem) do chassi, utilizando o sistema massa-mola-amortecedor de quatro graus de liberdade, onde três são os deslocamentos verticais dos centros de gravidade das rodas e do chassi e o outro é o deslocamento angular do chassi em torno de seu centro de gravidade. É possível também verificar a resposta do sistema a excitações de base, que representam o piso onde o veículo trafega. Pode-se também formular o problema utilizando Funções de Transferência, já que se trata de um modelo linear (ou linearizado). Em muitas das vezes esta abordagem é utilizada quando se quer controlar uma determinada variável, como, por exemplo, a taxa de variação do ângulo de rolagem, já que a dinâmica do sistema mecânico é mais simples. Os problemas que podem ser resolvidos apenas com os modelos clássicos são amplos e algumas informações podem ser perdidas.

A indústria automobilística investe muito no estudo do conforto e da segurança dos veículos, onde o papel das suspensões é fundamental. A pressão contínua para reduzir os custos de produção, e, por conseqüência, aumentar a competitividade, leva a indústria a investir nos modelos já bem conhecidos de suspensão, com o objetivo de melhorar ainda mais o desempenho, valendo-se do estudo de modelos matemáticos que representam a geometria. Neste ponto não se pode mais utilizar somente os modelos clássicos lineares, haja vista a não-

linearidade inerente ao problema. Os modelos precisam ser mais refinados, com foco no detalhamento do mecanismo.

À medida que os modelos se tornam mais refinados, quando se passa a considerar vínculos entre a massa suspensa e as massas não-suspensas, há o problema de se obter as equações de movimento, notadamente na construção de modelos matemáticos para representar a geometria das suspensões e do mecanismo de direção.

Para resolver seus problemas, a indústria freqüentemente faz uso de programas comerciais dedicados à dinâmica de multicorpos, os chamados “pacotes fechados” (por exemplo, [100] e [101]), que permitem ao usuário montar o mecanismo a partir de modelos já prontos, o que agiliza o processo, mas que não permitem modificações. Estes programas servem de apoio para análises do comportamento do veículo como um todo e podem ser utilizados para avaliar, por exemplo, o efeito da rigidez da suspensão no comportamento em curva. O ponto negativo é o alto custo de aquisição, o que restringe seu uso.

O veículo pode ser definido como um conjunto de subsistemas, e cada um deles visto como um módulo que pode ser analisado em separado. Esse aspecto da modularidade pode ser explorado para gerar modelos matemáticos de forma a estabelecer a intercambialidade entre módulos, permitindo substituir subsistemas inteiros por outros com as mesmas relações de causa e efeito. Geralmente o problema encontrado no modelo matemático está nas variáveis de entrada e de saída, ou seja, no acoplamento com os demais subsistemas. O modelo matemático de um módulo deve ser criado com base na interação do subsistema como um todo, para assim direcionar o problema para que o resultado final atinja o objetivo de ser intercambiável.

Existem técnicas e métodos que produzem modelos matemáticos modulares, diferenciados pelo grau de modularidade que se deseja atingir. Esse grau é definido pela forma como o modelo é criado. O equacionamento pode conduzir a uma *modularidade computacional*, onde os modelos matemáticos dos módulos são estanques, ou seja, toda a dinâmica inerente aquele sistema físico mecânico é resolvida dentro do módulo, e assim não é preciso acoplar todas as equações representativas dos subsistemas para se obter o modelo matemático global. Se isso precisar ocorrer, há *modularidade analítica*, ou seja, cada um dos módulos é equacionado, suas equações são unidas em um único sistema, uma

forma fechada, e depois este é resolvido. A Figura 1 descreve esquematicamente a diferença entre os dois tipos.

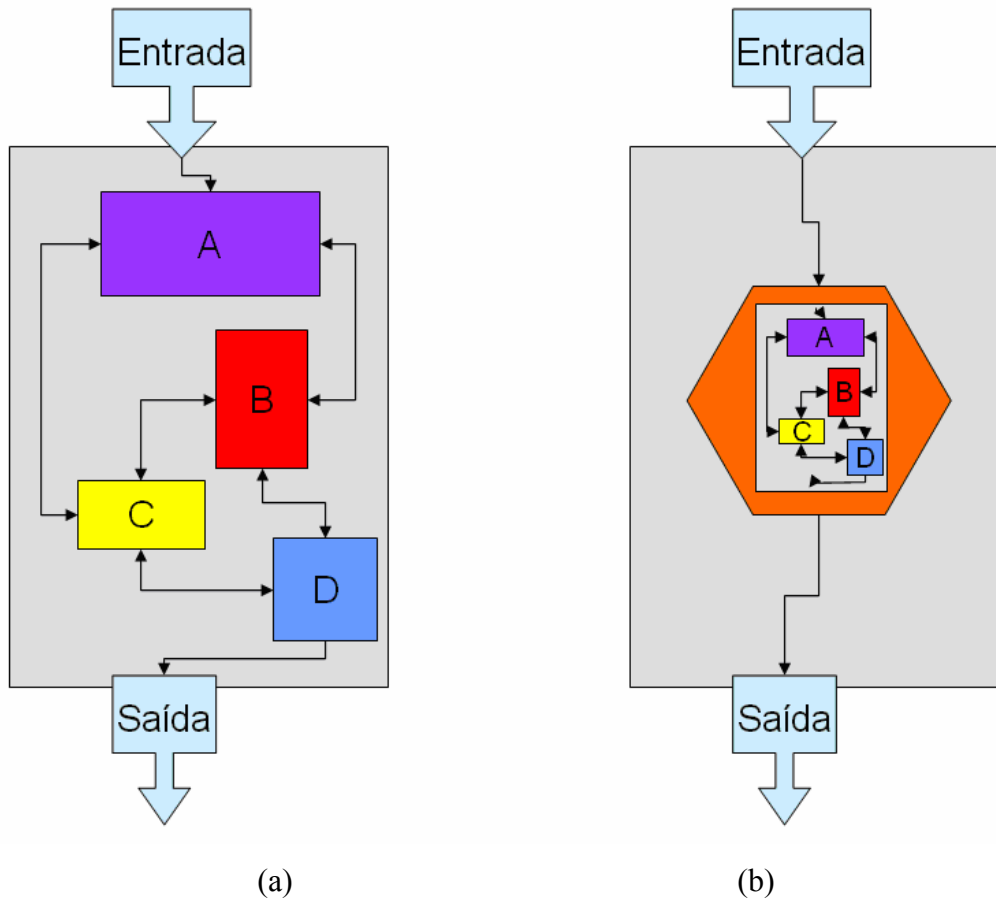


Figura 1 – (a) Modularidade computacional e (b) modularidade analítica.

No sistema com modularidade computacional (Figura 1a), cada módulo tem seu modelo matemático definido da forma que melhor o representa, e se comunica com os demais por suas variáveis de entrada e de saída. No sistema com modularidade analítica (Figura 1b), as equações dos modelos matemáticos são acopladas formando um único sistema, que pode ser resolvido numericamente. A vantagem do primeiro sobre o segundo é que cada bloco pode ser substituído por outro semelhante, que tenha as mesmas variáveis de entrada e de saída, como mostra a Figura 2, onde o módulo **B** é substituído pelo bloco **E** equivalente. A desvantagem neste caso é que a substituição somente é possível se os blocos **B** e **E** têm as mesmas entradas e saídas, e se o modelo matemático do módulo **E** não respeitar essa premissa o acoplamento pode ser *incompatível*.

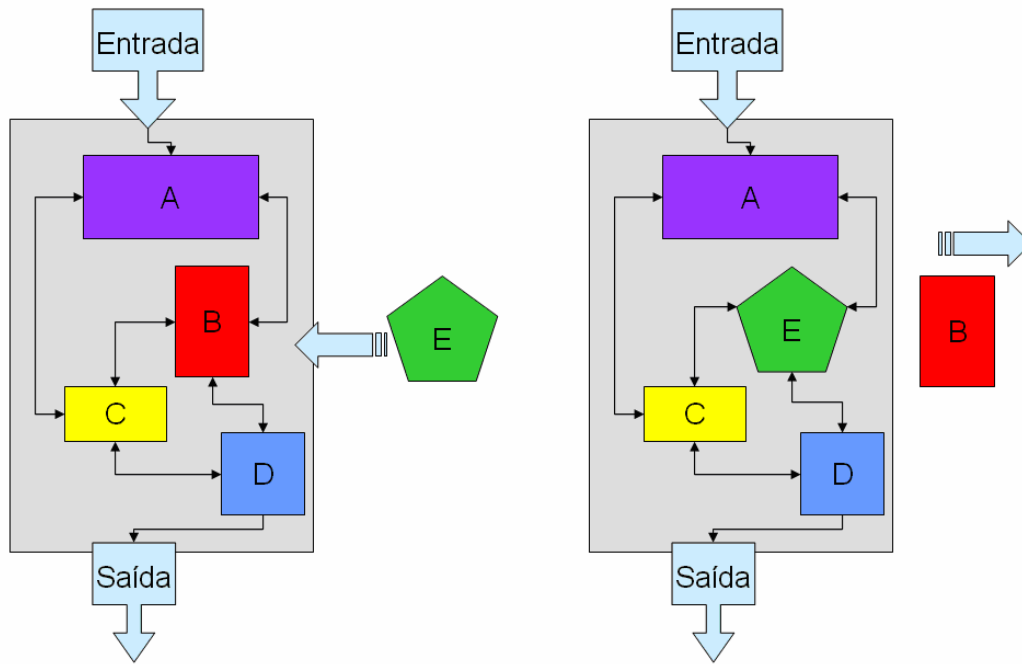


Figura 2 – Intercambialidade de módulos no sistema com modularidade computacional.

No sistema com modularidade analítica (Figura 3), a substituição do módulo **B** no módulo **E** é feita antes da montagem do sistema global, e todos os conflitos que podem gerar incompatibilidades são resolvidos nesse passo. A vantagem é que esse sistema pode reduzir o esforço computacional, uma vez que todas as influências de um módulo nos demais são resolvidas. A desvantagem é que à medida que o equacionamento se desenrola, essas mesmas influências não ficam tão claras, e pode não ser possível saber, por exemplo, como a dinâmica ou a cinemática do módulo **C** afeta o módulo **B**. Ainda que cada um dos módulos tenha seu modelo matemático perfeitamente definido, sem a presença de parâmetros pertencentes a outros módulos, perde-se a visualização quando o sistema de equações é montado, já que todos os efeitos são misturados, e um novo sistema de equações é escrito.

Essas duas formas de modelagem matemática são encontradas na Técnica dos Grafos de Ligação [1] e nos Transformadores Cinemáticos [16], sendo que nesta última pode-se proceder somente do segundo modo, com a construção do sistema de equações de movimento. Sua vantagem é que o número de equações de movimento é igual ao número de graus de liberdade do sistema físico. Esta forma de modelagem é explorada em [23], na construção do modelo matemático de um

veículo com dois eixos, ambos esterçantes, e no qual se considera a geometria da suspensão e seus efeitos dinâmicos. Em seguida, [24] partindo da mesma premissa, usa o modelo de [23] na análise da dinâmica lateral do veículo, e [25] substitui a suspensão encontrada nos dois modelos anteriores, do tipo McPherson, por outra, do tipo Braços Sobrepostos, e analisa a dinâmica lateral do novo veículo. Esse procedimento é afeito a sistemas multicorpos.

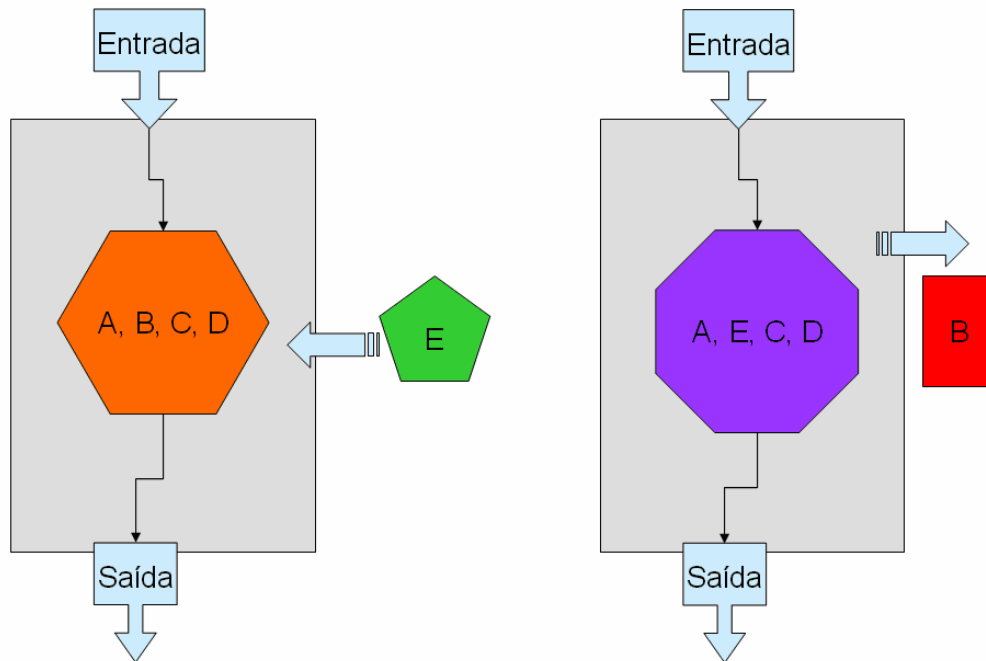


Figura 3 – Mudança de módulos no sistema com modularidade analítica.

Usando Grafos de Ligação, os autores da referência [10] implementam um procedimento, baseado em um código comercial, o programa SIMNON® [97], para a simulação das equações que descrevem a dinâmica de corpos rígidos e de seus acoplamentos. Nesse trabalho, definem-se rotinas que caracterizam o comportamento dinâmico de cada um dos sub-sistemas que compõem um sistema mais complexo, cujo modelo para simulação é estabelecido pela conexão desses módulos.

Em [89] apresenta um procedimento para acoplar modelos dinâmicos baseado no fluxo de potência, não determinando o modelo em forma fechada. O sistema modelado é um sistema hidráulico-mecânico.

Na referência [30] é apresentado um modelo matemático modular de um veículo sobre suspensão, onde o autor usa o princípio de Jourdain para obter as equações de movimento, na forma fechada, do sistema global.

Em [27], é apresentado um modelo matemático modular para análise da dinâmica de veículos com estrutura flexível, utilizando Grafos de Ligação e Estruturas de Junção deles obtidas [1], unindo um subsistema de parâmetros distribuídos, o chassi, a subsistemas de parâmetros concentrados, as suspensões. O acoplamento é computacional, e também é obtido o sistema de equações de estado do sistema.

Neste trabalho é criado um modelo matemático com acoplamento computacional dos blocos de chassi e suspensões, usando variáveis de potência, onde cada um dos módulos tem sua própria estrutura de junção definida. Essa forma modular é assim montada para caracterizar o intercambialidade dos módulos representativos das suspensões, mecanismos formados por corpos rígidos vinculados. Após a montagem, a modularidade é estendida a um passo posterior, mostrando que o mesmo procedimento adotado para a construção dos modelos matemáticos dos módulos pode ser adotado para a construção do sistema fechado de equações do modelo, usando as estruturas de junção dos módulos.

1.3. Motivação

Os programas usados para simulação de veículos são em sua maioria pacotes fechados. Assim, a influência de um parâmetro sobre o comportamento do conjunto em muitos casos não é clara, como também seus efeitos dinâmicos.

Busca-se aqui a visualização destes efeitos, uma vez que os módulos são equacionados sem que se perca a forma como os parâmetros afetam o comportamento dinâmico, e de forma analítica. O equacionamento permite conhecer o modelo, que deixa de ser uma “caixa-preta” para se tornar uma “caixa-transparente”.

Além disso, o acoplamento computacional de módulos independentes, onde até as equações são também modulares, são úteis em problemas de controle em tempo real, já que há, neste trabalho, somente equações algébricas, sem a

necessidade de inverter matrizes ou resolver sistemas de equações implícitos, o que também se traduz em redução do custo computacional.

Outro aspecto é o da praticidade de se utilizar programas de código aberto, deixando ao usuário a liberdade de modificar parâmetros ou aumentar/reduzir o grau de sofisticação do modelo segundo seus critérios e necessidades.

1.4. Relevância

O procedimento aqui desenvolvido trata de um sistema com múltiplos corpos conectados por meio de mecanismos de geometria fechada, com elementos flexíveis e dissipativos e características de comportamento particulares, muitas vezes descritas por curvas, e não necessariamente por equações ou modelos analíticos, todos representados da mesma forma, como módulos, empregando o mesmo tipo de variáveis, que são acoplados entre si. Portanto, considera-se o tema abordado suficientemente não trivial.

Os modelos desenvolvidos e os resultados encontrados mostram que é possível obter uma solução para o problema proposto empregando a metodologia que é adotada neste trabalho. O problema então tem solução.

O procedimento adotado é uma ferramenta útil para o tratamento da dinâmica de veículos, envolvendo o controle e a simulação das características dos sistemas envolvidos. Pretende-se tornar tal processo mais simples para os usuários não iniciados em métodos de modelagem ou mesmo simulação de sistemas dinâmicos, garantindo a qualidade e a representatividade dos modelos criados. Portanto encontra-se neste aspecto a sua grande relevância.

A abordagem dada ao problema é diferente de outras conhecidas. Apesar de existirem diversos caminhos para tratar a dinâmica de veículos terrestres, é proposta uma nova metodologia que reúne as principais características de diferentes abordagens e técnicas, sem, entretanto, repetir o tratamento dado por elas ao problema. Além disso, procurou-se definir uma aplicação na qual ainda não se tenha resultados conclusivos, ou mesmo um problema que não tenha sido completamente resolvido, para aplicar o procedimento a ser estabelecido. Portanto, reside nestes tópicos o fato do trabalho ser inédito.

1.5. Descrição dos Capítulos

Este trabalho tem ao todo 10 capítulos. O Capítulo 1 trata dos objetivos, posicionamento do trabalho, motivação e relevância. No Capítulo 2, separadas por assunto e ordenadas obedecendo ao mesmo critério, encontram-se as referências bibliográficas, comentadas, para que se mostre claramente que o procedimento proposto não segue os métodos e técnicas que conduzem a modelos matemáticos fechados, equacionados por Lagrange ou pela abordagem clássica de Multicorpos Rígidos.

O Capítulo 3, que trata da modelagem via fluxo de potência, é dividido em três partes, e é praticamente baseado na referência [2]. A primeira parte, 3.1, trata das estruturas de modelos dinâmicos, e é subdividida em três tópicos. No primeiro tópico o enfoque é dado na Técnica dos Grafos de Ligação, apresentando um breve resumo e com enfoque em seus pontos principais. O segundo tópico apresenta os campos, armazenadores e dissipadores, e o terceiro tópico apresenta as *Estruturas de Junção*, que são utilizadas nos modelos matemáticos desenvolvidos neste trabalho, que, apesar de usar os grafos de ligação para mostrar como a potência flui entre os mecanismos e corpos, não segue totalmente o mesmo caminho da técnica.

Na segunda parte, 3.2, são apresentados os acoplamentos entre modelos. Esta parte também se subdivide em três tópicos, o primeiro tratando das condições de compatibilidade que devem existir entre subsistemas para que o acoplamento seja possível. O segundo tópico descreve as condições que produzem laços algébricos, como causalidade mista em armazenadores e capacitores, e mostra o tratamento dado quando ocorrem. Em seguida é mostrado, de um modo geral, como desfazer os laços cinemáticos que existem em mecanismos com cadeia cinemática fechada. É apresentado um procedimento para separar variáveis dependentes e internas das variáveis independentes, que serve de base para o trabalho. Em 3.2.2.3 surge a *Matriz de Vínculos Cinemáticos*, que descreve o comportamento cinemático do mecanismo após ter-se resolvido os laços cinemáticos existentes. Esta matriz também define em uma etapa posterior a dinâmica de um subsistema mecânico, e está diretamente ligada à estrutura de junção que o representa. O terceiro tópico trata do *acoplamento analítico* que

pode ser obtido a partir do *acoplamento computacional*, onde os módulos contendo as equações que descrevem o comportamento dinâmico dos subsistemas são acoplados por meio de suas estruturas de junção, desde que respeitem as condições de compatibilidade, chegando-se assim a um modelo fechado a partir de modelos abertos.

Na terceira parte, 3.3, dividida também em três tópicos, mostra-se que um veículo pode ser subdividido em subsistemas, que podem ser acoplados entre si desde que respeitem as condições de compatibilidade mencionadas em 3.2.1, por meio do fluxo de potência. Com a base descrita no Capítulo 3, parte-se para o 4, que descreve o procedimento desenvolvido neste trabalho.

A descrição do procedimento é detalhada no Capítulo 4, que desenvolve o que foi abordado em 3.2.1. Na primeira parte, 4.1, mostra-se como obter a Matriz de Vínculos Cinemáticos a partir dos vetores-posição dos pontos de entrada e saída da potência de corpos de um mecanismo, escritos conforme a referência [46], e das condições de compatibilidade cinemática entre os corpos, usando vínculos entre velocidades. A segunda parte, 4.2, mostra como a Estrutura de Junção de um mecanismo ou subsistema é obtida, considerando a hipótese de conservação da potência, a partir da Matriz de Vínculos Cinemáticos. Em 4.3 mostra-se como identificar e eliminar laços algébricos em mecanismos de cadeia fechada, usando como exemplo duas configurações distintas de suspensões automotivas independentes para ilustrar o procedimento. Constrói-se a Matriz de Vínculos Cinemáticos de cada uma e obtém-se, a partir das mesmas, as Estruturas de Junção de cada mecanismo, agora interpretados como módulos independentes, prontos para o *acoplamento computacional*. Na 4^a. parte do capítulo, este trabalho é situado, usando um diagrama de blocos para ilustrar sua posição perante outros modelos dinâmicos. Mostra-se também que um modelo analítico fechado pode ser obtido a partir do modelo aberto, onde o acoplamento entre blocos é computacional e como, mesmo em modelos analíticos fechados, podem-se identificar Matrizes de Vínculos Cinemáticos e Estruturas de Junção.

O acoplamento computacional é mostrado no Capítulo 5, que descreve os modelos obtidos usando o procedimento proposto. São apresentados três módulos distintos, com suas respectivas Matrizes de Vínculos Cinemáticos e Estruturas de Junção, o do chassi, do pneu, e o da suspensão. Os grafos de ligação também estão presentes, para facilitar a visualização do fluxo de potência nos subsistemas. Na

última parte, 5.6, o procedimento é aplicado ao mecanismo de direção. Cada subsistema é agora um módulo independente, pronto para ser usado em um diagrama de blocos, de uma forma modular.

Os módulos dos subsistemas, contendo suas equações de movimento e/ou constitutivas são implementados em ambiente MATLAB/SIMULINK®, procedimento descrito no Capítulo 6. Cada módulo é implementado de forma a respeitar e parecer-se com a sua Estrutura de Junção. Dentro de cada módulo há blocos contendo funções MATLAB® separadas por tipo. As entradas e saídas de cada módulo são variáveis de potência somente, uma exigência do autor, para que fique bem caracterizado o Fluxo de Potência. O diagrama de blocos do modelo é colocado de forma a lembrar a aparência de um veículo.

O Capítulo 7 trata da validação dos modelos e algumas simulações. Utiliza-se o programa visualNastran 4D ®, versão 2001, da MSC.Software, como base de comparação. A disponibilidade do programa (a PUC-Rio detém 4 licenças em seu Departamento de Engenharia Mecânica), sua facilidade em interagir com outros programas CAD, notadamente o Solid Works ®, da Solid Works Corporation, também disponível (versão 2003 no Instituto Militar de Engenharia e versão 2006 na PUC-Rio, ambos compatíveis com o visualNastran), e o amplo uso no mercado e na indústria, conduziram a escolha. Neste capítulo os módulos são validados, a começar pelos das suspensões (que são críticos, devido à geometria fechada), cujas equações são não-lineares. Uma vez que cada módulo de suspensão é validado, parte-se para o acoplamento com o pneu e em seguida os resultados obtidos em ambiente MATLAB/SIMULINK® são comparados com os obtidos em ambiente visualNastran. A etapa seguinte de validação envolve o acoplamento das suspensões com o chassi, e todo o sistema é simulado, comparando-se novamente os resultados obtidos nos dois ambientes. Fechando o capítulo, uma vez que o procedimento é válido, executa-se uma simulação onde uma excitação de base é aplicada em uma das rodas e discute-se o comportamento resultante do veículo.

Os capítulos 8, 9 e 10 são respectivamente o de conclusões e sugestões, o de referências bibliográficas, numeradas segundo o critério descrito no Capítulo 2, e o de bibliografia.