

3 Homeostase Veicular

3.1. O Conceito

A partir dos resultados da linearização por partes de [2] e baseado nos resultados obtidos pelos modelos da dissertação de mestrado [1], constatou-se a necessidade de ampliar o modelo utilizado, para melhor representar a física da dinâmica veicular. Mas, ao mesmo tempo, não havia o interesse em aumentar a complexidade do modelo a ponto de dificultar sua realização computacional. Adotou-se, então, uma estratégia de modelagem que consiste em desenvolver modelos simplificados, mas ainda representativos, para os múltiplos sistemas que compõem a dinâmica veicular. Modelos estes que podem ser fáceis e rapidamente substituídos por outros, análogos, permitindo variar a complexidade do sistema global, à medida que seja necessário, ou que se queira.

Desta forma a complexidade do sistema global, que representa a dinâmica veicular, passa a ser regida pela integração dos múltiplos sistemas, tal como acontece na realidade das oficinas mecânicas, e não mais por um modelo matemático, que pretende integrar as influências destes componentes em um único sistema de equações, para apenas enxergar as entradas e saídas dos componentes extremos [9]. Com a dinâmica veicular segmentada, cada subsistema passa a ser um indivíduo, ou órgão, que interage com os demais indivíduos, por meio de nós de integração, dentro de um organismo maior e complexo: o automóvel. A maneira como as informações a respeito do funcionamento do veículo são passadas pelos nós de integração é que determina a complexidade deste novo organismo global.

Nesse ponto do trabalho, uma analogia com o funcionamento do corpo humano se faz necessária, para que seja possível compreender o porquê da nomenclatura proposta, da segmentação do modelo de dinâmica veicular e a importância da percepção de todos os subsistemas globalmente. No corpo humano existe o conceito de homeostase, que corresponde ao estado de equilíbrio do

organismo vivo em relação às suas várias funções e à composição química de seus fluidos e tecidos. Este estado de bem-estar é definido pela interrelação entre os seus múltiplos órgãos, sendo alguns apresentados na Figura 7, e corresponde a uma condição de bom funcionamento do corpo.

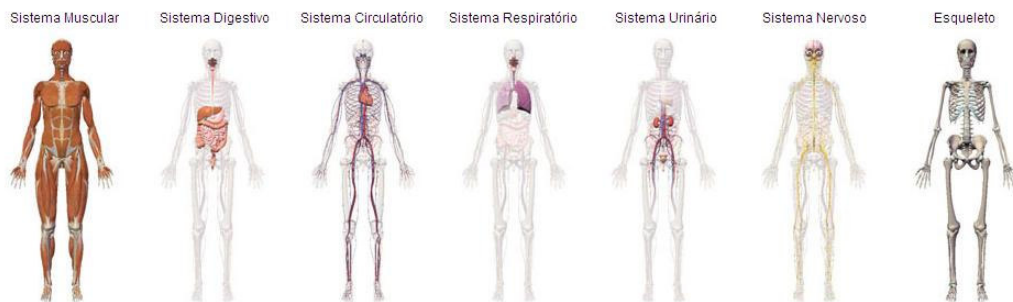


Figura 7: Visão segmentada do corpo humano.

Quando acontece algum problema, seja uma gripe, uma doença mais séria ou um ferimento, sinais de alerta são emitidos por um ou mais destes sistemas, como uma febre, uma dor, um inchaço, para avisar ao próprio corpo e aos médicos, que medidas corretivas precisam ser tomadas. Esses sinais de alerta correspondem a uma realimentação de estados para um sistema de controle, local, ou global, mas que ficará disponível para todo o corpo. Veja o exemplo de um pequeno corte na mão. A pele, em conjunto com o sistema imunológico, trabalha para regenerar a ferida que se abriu e, ao mesmo tempo, evitar que microorganismos nocivos penetrem no corpo humano. Este é um exemplo de controle local. Mas durante esse processo de regeneração, outros sistemas recebem informação de que uma ação diferente do normal precisa ser tomada, para garantir uma estabilidade e evitar que o ferimento piore. É o caso de tocar algum objeto com a mão cortada, pois uma pequena dor, ou incômodo, é sentida informando ao sistema muscular que movimentos suaves são necessários. Este seria um exemplo de ação de controle global, mas tomada de maneira passiva, pois não acelera a recuperação do corte, apenas mantém uma condição de estabilidade provisória que permite a cicatrização do ferimento. Da mesma forma o corte passa uma informação visual para que a pessoa tome alguma providência extra para regenerar a área afetada. Esta providência extra, um curativo, representaria uma ação ativa de controle local, determinada por um controlador

central, que ajudaria a acelerar o processo regenerativo e a garantir uma maior proteção à região do ferimento. A retomada dos movimentos naturais por parte do sistema muscular seria acelerada, após um tempo mais curto a ferida estaria completamente regenerada e o corpo humano retornaria à sua condição de homeostase. Trata-se de uma coleção de ações locais de controle para restabelecer a condição de funcionamento normal do corpo. Uma extensão deste exemplo seria a necessidade de realizar um movimento brusco com a mão já cortada, mas para evitar que outro ferimento ocorresse. Neste caso, antes de procurar proteger o local já danificado, ou fora de seu comportamento normal, o corpo humano precisa proteger o funcionamento geral do organismo. Nesta situação o controle global ignoraria a solicitação de movimento local suave, daria novas instruções para evitar maiores ou novos danos, mesmo que elas significassem um movimento brusco no local já comprometido, e corrigiria a ameaça à saída da condição de homeostase. Uma vez que não houvesse mais perigo, aí seriam retomadas as ações locais suaves para as partes que apresentassem algum dano ou ferimento e todo o processo de recuperação supracitado poderia ser desempenhado naturalmente.

Da mesma forma, também pode acontecer uma situação onde a retomada da condição de homeostase não é mais possível, mesmo com tentativas de ações corretivas, locais ou globais. Um exemplo seria um câncer em estágio terminal. Por mais que o corpo tente produzir anticorpos, ou que os médicos apliquem os medicamentos adequados, não é mais possível retornar a uma condição estável. Gradativamente o funcionamento dos órgãos afetados se deteriora, até que suas falências ocorram.

Uma terceira possibilidade para o funcionamento do corpo humano estaria ligada a uma necessidade constante de medicação, que garantiria uma ampliação dos limites que definem a condição de homeostase, mantendo um bom funcionamento do corpo, mesmo que ele esteja doente. Um exemplo desta possibilidade seria uma pessoa com doença coronariana, que precisa tomar medicações específicas para manter o sangue liquefeito, evitando a formação de obstruções, ou trombos, que poderiam causar acidentes vasculares. Esta situação corresponde a uma extensão da condição de homeostase natural. O remédio é responsável por construir uma nova região de normalidade, maior do que a original, que permite um funcionamento adequado das funções do corpo humano,

mesmo com uma falha de funcionamento sempre presente, e que pode ser interpretada como uma condição de **homeostase expandida** (Figura 8).

Ao analisar o comportamento do corpo humano do ponto de vista de estabilidade, a condição de homeostase estabelece uma coleção de limiares para o funcionamento normal do corpo, ou uma coleção de limiares de estabilidade a partir dos quais há necessidade de uma intervenção recuperativa, uma ação de controle. Quando o corpo produz anticorpos, ou médicos aplicam remédios, tem-se a execução destas ações de controle, para restabelecer a condição normal de funcionamento do corpo humano. No entanto todas estas ações de controle são locais e restritas a sistemas específicos do corpo humano. Quanto maior for o problema a ser enfrentado pelo organismo, maior é a quantidade de ações de controle necessárias para restabelecer a homeostase. Uma ilustração das possibilidades acima mencionadas pode ser visualizada na Figura 8, a seguir.

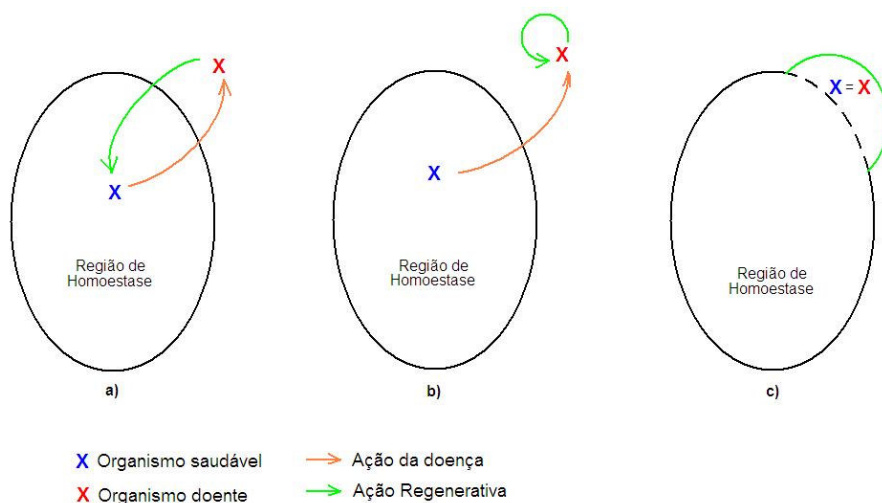


Figura 8: Comportamento do corpo humano: a) retomada da homeostase, b) falência do organismo, c) funcionamento em homeostase expandida.

Ao olhar para o veículo é possível observar situações semelhantes ao funcionamento do corpo humano. Para tanto é preciso enxergar cada sistema componente (chassi, suspensão, freio, direção, sistema de propulsão, motor, diferencial, eixo propulsor, etc) como um órgão, ou um sistema de órgãos, com autonomia para responder à excitação de algum estímulo exterior. Assim como no corpo humano, a resposta a um estímulo é feita de maneira bem definida e limitada a poucos graus de liberdade, e a composição destes múltiplos órgãos é

que define o comportamento do veículo como um todo. Assim como no corpo humano, cada sistema componente da dinâmica veicular possui limites de operação, a partir dos quais passam a emitir sinais de anormalidade, até que atinjam um ponto de quebra, ou falência. A composição de todos os limites individuais resulta na determinação de uma região de estabilidade global. No caso do veículo, esta zona de operação normal é diretamente afetada pelo contato do pneu com o solo e como a região de aderência entre eles se deforma.

Se existe algum componente defeituoso ou desgastado, ele pode vir a afetar esta região de aderência, modificando a estabilidade do veículo e propiciando condições mais favoráveis à ocorrência de acidentes. No corpo humano, se existe algum órgão defeituoso ou desgastado, também há uma condição que favorece a ocorrência de problemas de saúde. Componentes com defeito ou desgastados podem ser facilmente trocados nos veículos, corrigindo o problema. Já no caso do corpo humano a troca ou correção é muito mais complicada e delicada, podendo resultar em efeitos colaterais, como a rejeição a tecidos estranhos, no caso de um transplante. Eventos externos ao funcionamento, tanto do veículo quanto do corpo humano, dependendo da intensidade, levam à instabilidade e ao dano irreversível, no caso de automóveis, ou à morte, no caso do corpo humano. Mas em todas as situações, tanto com carros quanto com tecidos vivos, há uma condição de operação normal, uma zona de estabilidade. No caso de tecidos vivos esta região é definida pela condição de homeostase e identificada por múltiplos indicadores bioquímicos e/ou biofísicos.

Esta região também pode ser utilizada para classificar a condição de funcionamento normal de veículos automotivos. Isso acontece a partir do momento que se entende cada sistema componente de sua dinâmica como um sistema independente, que responde a estímulos de maneira bem definida, que recebe informações de outros sistemas vizinhos e que influencia de alguma forma, e em algum nível, a estabilidade global do automóvel. O limite de estabilidade passa a ser chamado, então, de limite de homeostase, que deve ser constantemente monitorado para evitar a ocorrência de acidentes. No entanto, não se deve impedir que o limite de estabilidade seja ultrapassado, mas sim proporcionar ações corretivas capazes de trazer o sistema novamente para a condição de homeostase e, com isso, constituir um sistema de segurança ativa corretivo para veículos em geral. A zona de homeostase, para veículos, corresponde à região de operação

estável do automóvel e deve considerar parâmetros como velocidade, deslizamento no contato do pneu com o solo, o tipo de pista onde ele trafega e eventuais obstáculos presentes em seu caminho. A função de restabelecimento da homeostase veicular fica, então, a cargo do controlador homeostático.

Para chegar ao controlador homeostático partiu-se do pressuposto de que a dinâmica veicular é composta por inúmeros sistemas, modelados isoladamente e de maneira simplificada sem, no entanto, comprometer suas características físicas. Decidiu-se por essa abordagem em função do próprio desenvolvimento histórico do automóvel, sempre de maneira incremental, mas sem comprometer o que já existia. Desta forma é possível acrescentar componentes à medida que se queira complicar o modelo do veículo, seja para realizar o projeto de controladores, seja para promover simulações computacionais. Mas isso somente se faz possível se for respeitado o conceito de fluxo de potência, onde a potência que sai de um sistema é igual à potência que entra no sistema seguinte (já consideradas as perdas por eficiência, atrito, elasticidade, ou qualquer outra não-linearidade presente). A técnica de grafos de ligação se adequa às necessidades de desenvolvimento de um modelo computacional de automóvel que permita a substituição, ou incorporação, de novos órgãos ou sistemas de órgãos ao modelo pré-existente. É esta técnica que permite o desenvolvimento do veículo baseado nos componentes físicos existentes em uma fábrica de carros. Com ela é possível aumentar ou diminuir a complexidade da representação de cada parte à medida que se julgar necessário, ou interessante.

Como o modelo de cada órgão componente é desenvolvido em separado, fica fácil agregá-lo ao modelo total do automóvel à medida de sua necessidade, bastando respeitar o fluxo de potência dos órgãos que vierem a ser conectados. Com isso é possível ligar ou desligar características ou comportamentos do veículo, para a proposição de leis de controle específicas, em subsistemas distintos, que permitem enfrentar diferentes situações operacionais de perda de homeostase. O responsável por esta habilitação de comportamentos é o controlador homeostático, de nível hierárquico intermediário, que, baseado nas informações contidas nas variáveis medidas em todos os subsistemas, determinará o tipo e a intensidade da ação corretiva necessária. Essa informação é passada ao controlador local que melhor se relacione com a demanda e que atua apenas em um componente, ou sistema específico, seja para gerar um estímulo adicional, que

contribuirá para o retorno à operação normal, seja para restabelecer a operação correta do próprio componente, devolvendo o automóvel à condição de homeostase. Dependendo do caso, mais de uma ação local de controle pode ser necessária para colocar o carro de volta dentro da zona de homeostase.

Esta coleção de ações locais pode ser realizada de duas formas: em paralelo quando há necessidade de tratar múltiplos problemas simultâneos, o que equivale a ter mais de um órgão com problema dentro do veículo; ou em série, quando a correção do problema de um órgão específico gera um efeito colateral indesejado, que modifica a homeostase de outro componente da dinâmica veicular, conforme observado na Figura 9 (b). No caso do corpo humano, como o médico, a partir de um diagnóstico, já conhece os possíveis efeitos colaterais, ambos os medicamentos acabam sendo prescritos. Assim, o paciente recebe remédios para desempenhar a ação de controle específica para restabelecer a homeostase, junto com os remédios para combater um efeito colateral indesejável que poderia anular o retorno ao funcionamento normal do corpo.

No veículo, como não se sabe *a priori* o tipo de comportamento que irá causar um efeito colateral, realiza-se a aplicação das ações de controle de maneira seriada, quando há a ocorrência de um efeito instabilizante em um ponto anteriormente em operação normal. Também é possível que as duas situações ocorram simultaneamente, isto é, que alguma ação regenerativa ocasione um efeito colateral, caracterizando a realização de ações locais em série, e que outras continuem a ocorrer de maneira isolada, caracterizando a aplicação de ações regenerativas em paralelo, conforme visualizado na Figura 9.

Com o controlador homeostático pretende-se garantir a manutenção da estabilidade global do veículo a partir de múltiplas ações locais de controle, que corrigem uma variável específica, sem ter que se preocupar com o sistema inteiro, nem precisar propor modelos matemáticos globais complexos, que necessitam de leis de controle gerais para garantir a estabilidade do sistema global. A atuação pontual e coordenada é a responsável por fazer com que o organismo, no caso o automóvel, retorne à sua condição de homeostase, com todos os seus sistemas componentes operando de acordo com seus limites individuais, o que garante a estabilidade global.

O controlador homeostático corresponderá, então, a um controlador intermediário, hierarquizado e auto-regulatório, que deve determinar quando e

como cada um dos controladores locais, embarcados no automóvel e conectados a componentes específicos, deve agir para restabelecer a homeostase veicular. O controlador homeostático tem capacidade de enxergar variáveis medidas diretamente nos pontos de atuação de controle local, estimar parâmetros a partir de modelos representativos, além de receber instruções, ou estratégias de funcionamento para sistemas distintos, a partir de um controlador hierárquico de mais alto nível. O controlador homeostático deverá agir para que o controlador central de mais alto nível (o que estabelece a trajetória do veículo, controla sua velocidade e distância até obstáculos) possa ser projetado de forma simples, considerando o sistema estar em homeostase (*i.e.* suas variáveis dentro da região de homeostase) – se possível mantendo o mesmo controlador mestre já utilizado em versões anteriores do veículo.

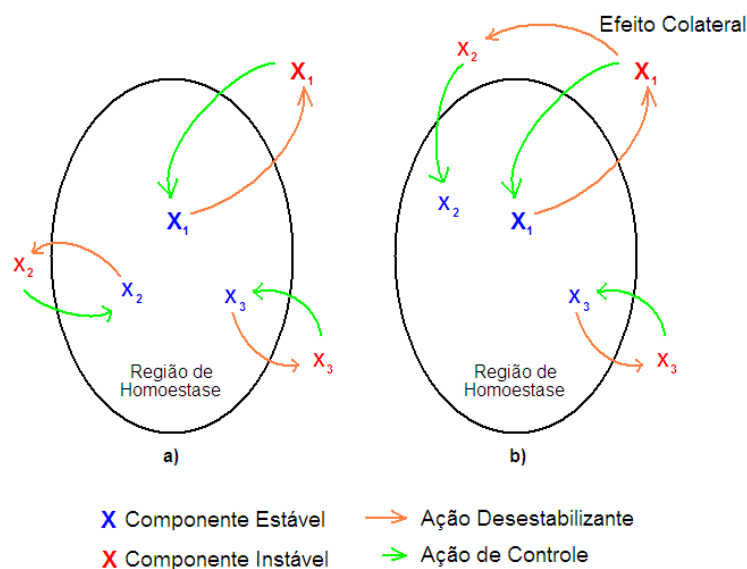


Figura 9: Homeostase veicular: a) ações locais de controle em paralelo, b) ações locais de controle em série para prevenção de efeitos colaterais.

A tarefa de controlar o veículo é feita por meio de ações de controle locais e pontuais que primeiro restabelecem as condições de equilíbrio do componente ou sistema local para, então, restabelecer a estabilidade global. Para tanto é necessário que a dinâmica veicular esteja preparada para permitir qualquer sequência de habilitações e desligamentos dos sistemas de controle locais. Uma maneira de se conseguir isto é através da segmentação da dinâmica veicular em modelos dinâmicos menores, identificados diretamente com os sistemas

componentes do veículo, que, ao serem conectados, obedecem aos princípios de conservação do fluxo de potência.

A proposta deste trabalho de tese é justamente apresentar as condições de modelagem e controle para tornar o controlador homeostático uma solução viável aos problemas de segurança ativa, presentes nos automóveis atuais.

3.2. Modelo Global versus Modelo Segmentado

Historicamente, o desenvolvimento tecnológico de veículos automotores se fez de maneira incremental, sempre para suprir uma necessidade funcional, para atender normas ou regulamentações, para reduzir custos, ou para proporcionar maior segurança aos motoristas e passageiros. O desenvolvimento do automóvel não possui uma data definida de início, mas sabe-se que já no século XVIII foram realizadas tentativas de impulsionar um veículo terrestre de maneira autônoma. Até 1885, isto era feito com máquinas de propulsão a vapor, mas com a introdução do motor de quatro tempos, de combustão interna e movido a gasolina do inventor Karl Benz, é que se passou a considerar o automóvel como uma possibilidade de veículo autopropulsionado com condições de viajar rápido, com comodidade, pouco esforço, por parte dos viajantes, e maior segurança. Como sua autonomia foi expandida, em pouco tempo o automóvel passou a ser uma possibilidade economicamente viável, tendo início a sua fabricação industrial. No entanto, neste estágio de desenvolvimento, o automóvel era bastante rudimentar, se comparado aos padrões dos dias atuais, não possuindo suspensões, volante nem carcaça. Seus sistemas de transmissão e de frenagem eram muito simples, como pode ser visualizado na Figura 10. Com tudo isso, este primeiro veículo autopropulsionado alcançava incríveis 13 km/h.

E mesmo a uma baixa velocidade, ele possuía limites de estabilidade que garantiam sua condição de homeostase. Estes limites eram muito restritos, se comparados aos padrões atuais, mas determinavam quando o carro passava de uma situação normal de operação para uma situação de acidente iminente. A falta de suspensões fazia com que as influências da pista fossem bastante sentidas pelo motorista, podendo comprometer a dirigibilidade do veículo ao atravessar um caminho bastante irregular. Também havia uma maior facilidade para que o

veículo tombasse em curva, pois o sistema de direção, por meio de alavanca ou leme, exigia do motorista uma sensibilidade bastante aguçada. Adicione à necessidade de sensibilidade a maior altura do chassi em relação ao solo, que contribuía para facilitar o tombamento do carro, pois deixava seu centro de gravidade em nível elevado. Mas a principal dificuldade deste primeiro veículo com motor de combustão interna estava atrelada aos seus pneus. Por serem muito finos e apresentarem apenas uma camada de borracha recobrindo o aro da roda, limitavam a superfície de contato com o solo a uma região muito pequena, capaz de gerar forças laterais e longitudinais muito baixas e que limitavam o movimento do veículo a baixíssimas velocidades. Com estas características é possível compreender que a zona de homeostase deste primeiro automóvel fosse muito pequena, sendo muito fácil passar de uma condição de funcionamento normal, ou saudável, para uma situação problemática.

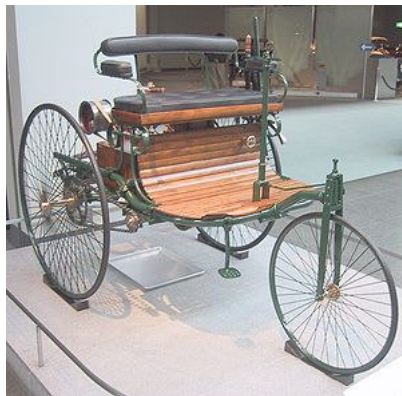


Figura 10: Primeiro automóvel a gasolina, de Karl Benz.

Com o passar do tempo inovações foram sendo desenvolvidas e agregadas ao automóvel. A suspensão semi-elíptica, por exemplo, melhorou a dirigibilidade do veículo, ao filtrar uma parcela das perturbações provenientes de irregularidades de uma pista qualquer. A evolução das suspensões continuou com o passar do tempo, resultando no acréscimo de uma mola inicialmente e, posteriormente, na incorporação de amortecedores hidráulicos. As influências do perfil da pista percorrida pelo automóvel passaram a ser muito bem filtradas e sentidas apenas na presença de grandes deformações, como buracos, desníveis acentuados ou pistas irregulares.

Essa evolução também ocorreu para os sistemas de freio. Inicialmente a ação de frenagem não era aplicada às quatro rodas, mas apenas às duas rodas traseiras, pois existia o medo de que o carro poderia capotar se fosse aplicada uma ação de frenagem nas rodas dianteiras. Com a evolução do automóvel e a verificação de maior necessidade de parada rápida, para fazer frente ao aumento de potência dos motores e, conseqüentemente de velocidade, o freio passou a ser aplicado a todas as rodas, em diferentes estratégias de frenagem.

Também houve melhorias ocasionadas pelo desenvolvimento de novos componentes. Pneus foram alargados, sua construção passou a contar com malhas de aço, melhores compostos de borracha e sulcos para escoamento de água, diminuindo os efeitos de aquaplanagem. Conseqüentemente a durabilidade dos pneus aumentou bastante com o passar das décadas. Todo esse desenvolvimento proporcionou um melhor controle da deformação do pneu durante seu funcionamento, permitindo alguma gerência da zona de contato com o solo. Com essas inovações os limites de estabilidade foram sendo alargados e a zona de homeostase aumentou, até chegar aos padrões atuais.

O automóvel moderno como o conhecemos desde a década de 70, aproximadamente, ainda possui limitações bem características quanto à sua capacidade de deslizar ao acelerar, quanto à sua capacidade de escorregar ao frear bruscamente, ou quanto à sua capacidade de deslizar lateralmente quando sujeito a uma curva abrupta. Para evitar estes problemas a indústria automotiva desenvolveu uma série de sistemas de auxílio à direção, que passaram a atuar na questão de segurança ativa do veículo e, com isso, simplificaram a direção pelo motorista. Esse desenvolvimento só foi possível graças ao aparecimento de dispositivos eletrônicos, como o transistor, que permitiu o desenvolvimento de eletrônicas embarcadas compactas, capazes de monitorar constantemente uma informação específica e, quando necessário, ativar uma ação de controle corretiva.

Um dos primeiros sistemas de auxílio à direção criado foi o sistema *ABS*, de prevenção de travamento das rodas em uma situação de frenagem brusca. Oriundo da indústria aeronáutica, o *ABS* atua para evitar o travamento das rodas, a perda de dirigibilidade do veículo e a diminuição da distância de parada. Uma funcionalidade adicional que o *ABS* possui é a de diminuir a magnitude das forças de impacto, no caso da distância necessária à parada ser maior que a distância ao obstáculo.

Outra contribuição que foi incorporada ao automóvel recentemente foi o sistema de controle de tração, ou *TCS* (*Traction Control System*). Assim como o *ABS*, o *TCS* compara a velocidade de giro de cada pneu com a velocidade do automóvel, buscando identificar a iminência do escorregamento. No entanto o *TCS* realiza esta verificação no momento de aceleração do veículo, para evitar que ele escorregue.

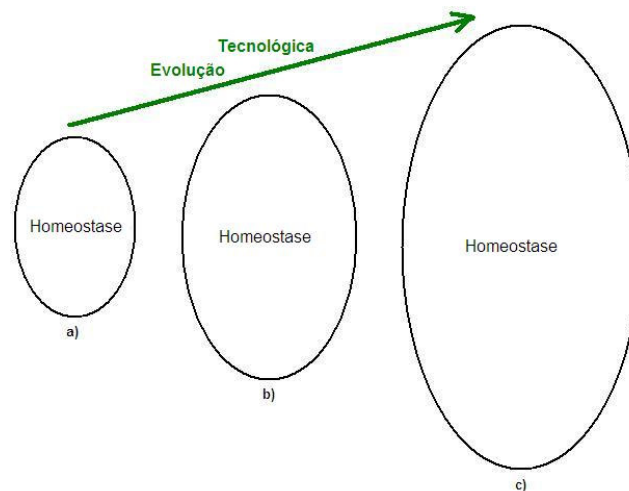


Figura 11: Expansão da condição de homeostase veicular no século XX: a) início; b) meados; c) final.

Ao analisar o funcionamento dos dois sistemas sob o ponto de vista da elipse de aderência, pode-se observar que ambos os sistemas procuram agir de maneira preventiva ao deslizamento, para evitar que uma situação de emergência ocorra, podendo até provocar um acidente. Apenas para relembrar, a elipse de aderência corresponde a um gráfico que relaciona as forças longitudinais com as forças laterais em cada um dos pneus do automóvel. O limite máximo de aderência dos pneus estabelece, neste gráfico, uma curva de formato elipsóide, originando o nome de elipse de aderência. Ela determina, então, o limite físico aceitável a partir do qual o pneu se encontra em deslizamento puro. Para o *ABS* e o *TCS*, os sensores de velocidade passam ao módulo de controle as informações necessárias continuamente, para que ele seja acionado a partir de um limiar específico. Um atuador passa a agir, então, freando cada uma das rodas individualmente, no caso do *ABS*, ou direcionando mais torque a cada uma delas, no caso do *TCS*.

Quando o veículo está sujeito a movimentos em curva, passa a haver a possibilidade de escorregamento lateral, quando o ângulo de deriva lateral ultrapassa seu valor limítrofe, causando a diminuição da região de contato do pneu com o solo e o consequente escorregamento. Para evitar que este fenômeno aconteça, a indústria desenvolveu mais um sistema de controle local, o controle de estabilidade lateral, conhecido por alguns nomes e funcionalidades diferentes (*Electronic Stability Program, Electronic Stability Control, Dynamic Yaw Control, Vehicle Dynamic Control*, etc), mas que desempenham a mesma tarefa: evitar que o veículo perca a estabilidade lateral e derrape, rodando, ou saindo da pista. Assim como os sistemas *ABS* e *TCS*, o controle de estabilidade lateral também trabalha para evitar que os limiares físicos de escorregamento, definidos pela elipse de aderência, sejam ultrapassados. Ao observar a Figura 12 pode-se visualizar qualitativamente o que acontece na operação destes três sistemas de auxílio à direção.

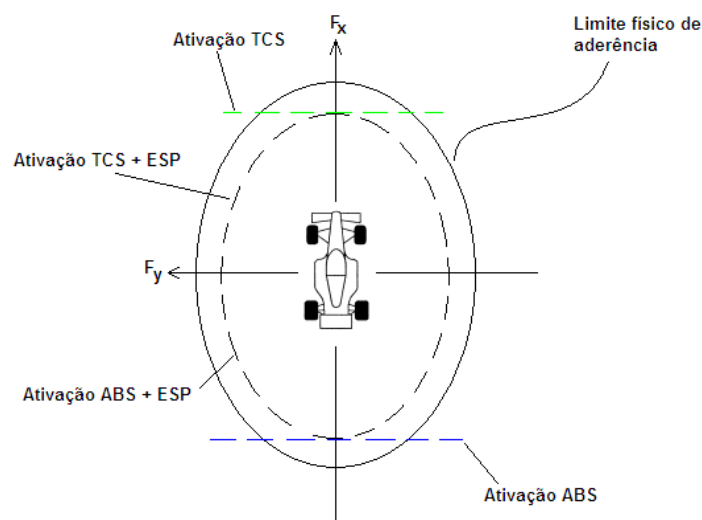


Figura 12: Ativação de sistemas de auxílio à direção, como *ABS*, *TCS* e *ESP*.

A partir de um limiar específico, definido empiricamente como resultado de testes operacionais, os sistemas de auxílio à direção são ativados, para evitar que o limite físico de aderência seja alcançado. A consequência imediata desta ativação dos sistemas de auxílio à direção a partir de um limiar específico se reflete em uma diminuição da região considerada como região de homeostase. Passa a haver uma ação preventiva que busca sempre deixar o sistema local dentro de sua condição normal de operação. Mesmo assim, a condição de perda de estabilidade

ainda continua a poder existir e, dependendo da intensidade do movimento, ela pode começar a ocorrer mais cedo, já que os limites de estabilidade foram decrementados.

Outro ponto que indica a adoção da ação preventiva diz respeito ao tipo de modelagem que se fez (e ainda se faz) para o desenvolvimento de sistemas de apoio à direção em geral. Os modelos dinâmicos utilizados para o desenvolvimento de sistemas *ABS*, *TCS* e *ESP* consideram um modelo linearizado da dinâmica veicular e que compreende apenas alguns componentes/sistemas presentes no automóvel. Isso é bastante fácil de ser constatado, ao pesquisar diversas publicações da área, como os periódicos *Vehicle System Dynamics*, *Multibody System Dynamics*, *International Journal of Vehicle Design e Mechatronics*, os jornais da *SAE* e da *JSAE* (versão japonesa da Sociedade de Engenheiros Automotivos). Por essa razão estes sistemas de controle agem de maneira preventiva, pois conseguem garantir que o veículo permaneça dentro de suas margens de estabilidade sem considerar o veículo e todos os seus componentes, garantindo estabilidade ao veículo.

Mas por que não considerar modelos globais, representativos, com todos os sistemas componentes do veículo? Ao construir um modelo único recai-se sobre o problema da quantidade de variáveis de estado resultantes. Geralmente considera-se que um veículo seja composto de chassi, rodas, sistema de freio, sistema de direção e sistema de propulsão. E que cada sistema individual possui seus múltiplos componentes. Se considerarmos que para chassi e rodas existem 6 graus de liberdade cada e que é desejável realizar controle de velocidade e aceleração, tem-se 12 variáveis de estado para cada um dos componentes, totalizando um modelo com no mínimo 60 variáveis de estado que necessitam ser monitoradas constantemente, gerando uma massa de informação que é passada a um controlador existente. Este, por sua vez, necessita de uma lei de controle que aborde todas as variáveis de estado, mesmo que não haja ação corretiva a ser realizada. Se forem adicionados os graus de liberdade de cada um dos sistemas componentes da dinâmica veicular, este número de variáveis de estado cresce exponencialmente, chegando facilmente a mais de 200 variáveis de estado, como mencionado por *Rill* em [29]. Isso tudo sem considerar as não-linearidades intrínsecas de cada componente ou integração de componentes, o que deixaria o modelo global ainda mais complexo.

Por estes motivos a implementação computacional de modelos globais, para serem embarcados em unidades centrais de controle se torna inviável, senão impossível. A implementação física é claramente impossível, pois seria necessário supor atuadores diretos em grande parte das variáveis de estado, e sensores ou estimadores para todas elas. Esta é a razão para que vários pesquisadores tenham adotado o desenvolvimento de modelos parciais, linearizados, com um número baixo e limitado de variáveis de estado para o controle de uma função específica dentro do movimento do automóvel. Com isso inúmeros sistemas de auxílio à direção foram desenvolvidos e comercializados nos últimos 25 anos.

No entanto, com o aumento da capacidade de cálculo e de armazenamento de informações em dispositivos embarcados e com o desenvolvimento de protocolos robustos de comunicação em rede, a situação de controle embarcado em veículos terrestres começou a mudar na última década. Hoje já é possível pensar em integrar os sistemas de controle embarcados já comercializados, gerando novos sistemas de auxílio à direção, voltados exclusivamente para a segurança ativa de automóveis, motoristas e passageiros, conforme apresentado em [33]. A Figura 13 apresenta um esquemático do que aconteceu com o desenvolvimento de sistemas de segurança ativa. Inicialmente o sistema *ABS* realizava o controle apenas do sistema de frenagem. Com o desenvolvimento do sistema de controle de tração (*TCS*), alguns elementos do sistema de controle de frenagem passaram a ser empregados, refletindo uma primeira integração de duas ações de controle com objetivos específicos. O conseqüente avanço tecnológico, com a incorporação de sistemas de prevenção de escorregamento (*ESP*), permitiu a integração de ações de controle do sistema de frenagem, do sistema de aceleração e do sistema de direção do veículo, melhorando o comportamento para diferentes e distintos tipos de movimento.

Ainda existe um número pequeno de publicações sobre a integração destes sistemas, o que indica que este é um assunto que está sendo tratado no presente momento, estando na vanguarda da pesquisa de dispositivos mecatrônicos embarcados para auxílio ao funcionamento de veículos terrestres. Mas a grande maioria destas publicações está preocupada em permitir que um controlador central regule a operação de múltiplos sistemas embarcados pré-existentes, como apresentado em [10], [33] a [35]. No entanto, estes controladores centrais ainda

consideram a existência de múltiplos sistemas individuais, que interagem nada ou muito pouco entre si. E não é assim que o veículo funciona.



Figura 13: Integração crescente de sistemas de auxílio à direção do veículo.

Por que não considerar que os múltiplos sistemas e componentes interagem e influenciam o comportamento uns dos outros? Se for por causa da complexidade dos modelos necessários, então estes podem ser subdivididos em subsistemas, de fácil modelagem e rápida substituição por modelos análogos mais complexos, quando assim for necessário. Se a resposta se basear na simples modelagem de sistemas parciais, incompletos, mas que permitem o desenvolvimento de sistemas de controle preventivos à perda de estabilidade, então um equívoco pode estar sendo cometido. Pois se limita a ação do veículo a uma zona de estabilidade que não explora as reais capacidades físicas do automóvel, ao desconsiderar influências perturbadoras, provenientes de sistemas vizinhos.

3.3. Como Chegar ao Controlador Homeostático

É muito natural para o homem entender o automóvel como uma coleção de peças, que ao serem montadas em uma determinada ordem, vão formando mecanismos específicos, sistemas autônomos e, finalmente, o próprio veículo, como ilustrado na Figura 14. A história da evolução tecnológica do automóvel também mostra que o acréscimo de cada uma dessas peças foi feito de maneira incremental, sempre para agregar valores e funcionalidades às já existentes, ou

para criar outras novas. Assim aconteceu com o desenvolvimento do motor de combustão interna, por Karl Benz, com o desenvolvimento e posterior aprimoramento dos sistemas de suspensão e de freio, com o próprio sistema de propulsão e, mais recentemente, com os dispositivos eletrônicos de auxílio à direção, como os sistemas *ABS* e *TCS*, entre outros.

Também foi discutida a importância das influências que cada componente, mecanismo ou sistema exerce sobre uma peça vizinha. E como as integrações destes componentes afetam o comportamento do veículo como um todo, permitindo que seja visto como um organismo, onde todos os sistemas e mecanismos desempenham funções específicas, de importâncias semelhantes e que não devem ser ignorados no desenvolvimento de dispositivos de segurança ativa.



Figura 14: Conjunto de peças e mecanismos que compõem o automóvel.

O desenvolvimento e o embarque de novos dispositivos de auxílio à direção do automóvel requerem que todos os sistemas presentes no veículo sejam efetivamente percebidos como partes componentes de uma única dinâmica complexa. Apenas integrar os sistemas de controle atuais, em um protocolo de

rede, como proposto em [10], [34] e [35], atende às demandas mais imediatas do mercado, como uma forma de abordar o crescente número de regulamentações por melhoria da segurança dos automóveis. No entanto, apesar de ser possível monitorar múltiplas variáveis e realizar escolhas para priorizar um determinado tipo de ação de controle, os modelos utilizados para descrever as características dinâmicas continuam a considerar apenas uma parte específica do veículo. Não são levadas em consideração as influências externas geradas a partir do funcionamento de sistemas de controle vizinhos, ou do acoplamento de outras dinâmicas. Em alguns casos de controle, são inseridos ruídos externos que também representam as influências de sistemas vizinhos. Mas como todos os sistemas componentes da dinâmica veicular estão interligados, estes distúrbios passam a ser características dinâmicas que são negligenciadas.

Ao modificar a modelagem da dinâmica veicular para uma que leve em consideração as integrações entre os múltiplos sistemas, o projetista poderá continuar utilizando os sistemas de controle embarcados existentes na indústria automotiva atual. Ele conseguirá, também, expandir o limiar de ativação destes sistemas de controle para que coincida com os limites físicos de aderência do pneu. Consequentemente ele irá melhorar o limite de estabilidade e conseguir o alargamento da zona de homeostase do veículo.

Uma maneira simples de realizar este tipo de modelagem consiste em projetar os modelos dos componentes como se fossem peças encontradas em uma fábrica de automóveis. Cada componente isoladamente possui um modelo dinâmico. Ou, para não ser necessário um detalhamento excessivo, cada mecanismo, conjunto de componentes, é modelado isoladamente. Este modelo deve ser validado, por meio de testes e simulações computacionais para garantir que corresponde ao mecanismo físico real. Mas para que seja possível realizar este tipo de modelagem, tão segmentada, é necessário que o princípio de conservação de potência seja adotado. Ele garante que as variáveis de potência que partem de um componente são as mesmas que chegam ao próximo componente conectado. É o conceito de conservação de fluxo de potência.

Este tipo de modelagem possui algumas vantagens, se comparada às tentativas de se obter um modelo dinâmico global. Uma primeira vantagem corresponde à possibilidade de se substituir componentes rapidamente, à medida que se deseje aumentar a complexidade do sistema que estiver sendo

representado. Uma segunda vantagem é permitir que os componentes, isoladamente, ou em conjunto, sejam modelados o mais simples possível, mas sem perda de representatividade física. Nesta opção a complexidade é representada pela conexão entre os diversos componentes, formando o sistema global. A ferramenta de modelagem que mais se aproxima desta característica é a técnica de modelagem por grafos de ligação. Com esta técnica é possível propor modelos simplificados, mas representativos, dos componentes dos múltiplos sistemas da dinâmica veicular, determinar suas equações constitutivas e acopla-los quando necessário. A técnica de grafos de ligação já incorpora o princípio de conservação de potência para as variáveis de entrada e saída, sempre relacionadas a esforços, como forças e torques, e a fluxos, como velocidades lineares e angulares.

Mas a maior vantagem deste tipo de modelagem é permitir ao controlador central mudar dinamicamente o modelo utilizado como base para o cálculo da ação de controle. O homem, enquanto motorista, não percebe todos os componentes da dinâmica veicular ao mesmo tempo. Ao contrário, ele percebe a presença de pedaços específicos da dinâmica, à medida que realiza um movimento conhecido. No entanto, ao mudar de movimento ele imediatamente percebe uma nova característica que, a partir daquele momento, passa a ser de importância para a ação que o veículo estiver desempenhando. Aqui se faz um paralelo à questão de homeostase do corpo humano, que funciona dentro de uma condição de normalidade até que um alarme seja disparado. Este alarme pode abranger desde uma informação para deixar o corpo em alerta, até mesmo ações corretivas de órgãos para vencer uma doença.

O veículo também possui uma região de homeostase, onde o movimento que foi definido pelo motorista corresponde, por uma quantidade de tempo finita, a uma condição de funcionamento normal. Ao modificar o movimento do veículo, este sinaliza ao motorista que novas condições estão presentes e precisam ser observadas, para evitar que qualquer tipo de incidente venha a ocorrer.

O controlador homeostático deve operar da mesma forma. Durante um movimento específico ele deve ter a capacidade de considerar partes específicas do veículo, mas que sejam de fundamental importância para o movimento que estiver desempenhando. Ao modificar seu padrão de funcionamento, o controlador homeostático altera o modelo do veículo a ser considerado, influenciando a

determinação da região de homeostase. No caso de situação de emergência, que exija ações rápidas para evitar uma colisão, todos os subcomponentes da dinâmica veicular são habilitados e contribuem para a determinação da melhor ação corretiva a ser tomada.

A diferença em relação aos trabalhos desenvolvidos em [10], [34] e [35] está na consideração de um modelo com capacidade dinâmica de modificação, à medida que seus múltiplos componentes forem sendo necessários. Além disso, a ação do controlador homeostático corresponde a determinar quais controladores locais, em qual sequência e com qual intensidade eles serão acionados. Na consideração de controle homeostático assume-se a possibilidade de haver efeitos colaterais a partir da aplicação de uma ação de controle local específica. Uma representação do funcionamento do controlador homeostático pode ser observada na Figura 15.

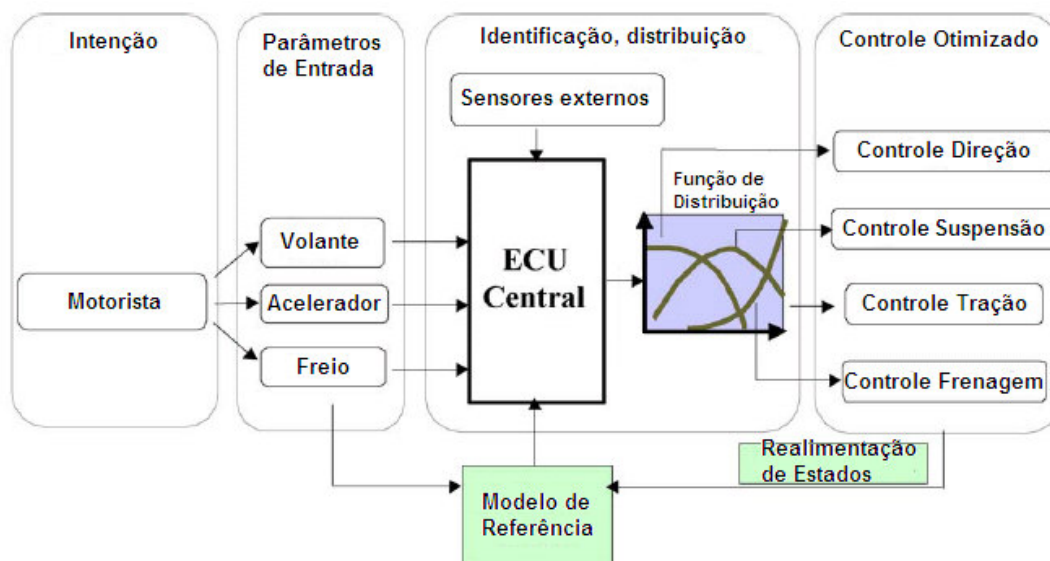


Figura 15: Representação de funcionamento do controlador homeostático.

Com base no que foi exposto até aqui, pode-se escrever as definições a seguir.

Definição 1: A homeostase veicular corresponde a uma condição de operação normal do veículo, de todos os seus sistemas e mecanismos componentes.

Definição 2: Um veículo que se desloca em relação a um referencial global fixo conhecido corresponde a um organismo complexo, formado por múltiplos sistemas e mecanismos autônomos que interagem entre si, influenciando direta ou indiretamente a condição de homeostase do automóvel.

Definição 3: Os sistemas e mecanismos componentes da dinâmica veicular podem ser utilizados em combinações diferentes para representação de um veículo, simplificando ou aumentando a complexidade de seu modelo dinâmico.

Definição 4: A região de homeostase corresponde a um conjunto de limites característicos do funcionamento do automóvel, dentro do qual o veículo se encontra em uma condição de funcionamento estável, ou em homeostase.

Com base nas definições apresentadas acima, pode-se supor algumas condições para que o ambiente necessário à operação do controlador homeostático seja criado.

Hipótese 1: Existe um conjunto Θ dentro do qual o veículo e todos os sistemas e mecanismos locais estão em condição de homeostase, garantindo-se a estabilidade global do automóvel sob a operação normal usada na Definição 1.

Hipótese 2: O acionamento de um controlador, de um sistema ou mecanismo local, apenas remete o estado deste sistema local para dentro do conjunto Θ , restabelecendo sua homeostase.

Hipótese 3: O controlador homeostático é capaz de definir e executar uma sequência de ações locais de controle para restabelecer a condição de homeostase veicular.

Com base nestas hipóteses é possível afirmar que ao garantir a estabilidade local de todos os sistemas e mecanismos componentes da dinâmica veicular, consegue-se garantir, também, a estabilidade global do veículo. O oposto, no entanto, não é verdade, pois é possível ter o veículo em condição de homeostase mesmo com alguma variável fora de sua zona de estabilidade. Um exemplo é a

capacidade do veículo em manter sua estabilidade, mesmo na presença de um pneu em deslizamento puro. É importante ressaltar, também, que o limite de atuação de cada controlador local está restrito às conexões com seus sistemas vizinhos, sobre os quais é possível gerar algum efeito colateral. A combinação de ações de controle em múltiplos sistemas consecutivos é a responsável por conseguir, ou não, levar o veículo para dentro de sua condição de funcionamento normal.

Sabendo desta limitação de atuação é possível prevenir o controlador homeostático para o caso de ocorrência de efeitos colaterais, para que sua atuação seja rápida e suave, sem comprometer a estabilidade dos demais componentes da dinâmica veicular.

A novidade apresentada por esta tese corresponde a uma nova abordagem de modelagem em conjunção com uma proposta de controlador hierarquizado. A modelagem consiste no agrupamento de múltiplos modelos dinâmicos de componentes simplificados, que são conectados a partir do conceito de conservação de fluxo de potência e baseado na utilização ampla da técnica de grafos de ligação. Isto permite a habilitação e desacoplamento de pedaços da dinâmica veicular, à medida do necessário, recriando os modelos dinâmicos específicos que servem de base ao funcionamento dos múltiplos sistemas de controle para segurança veicular ativa, como *ABS*, *TCS*, *VDC*, *ESP*, *ACC*, *DYC*, etc. Pode-se afirmar com base no que foi discutido até aqui, que a proposta de elaboração de um controlador homeostático se aproxima de uma condição geral para representação, desenvolvimento, simulação, validação e operação embarcada de sistemas de controle. Com isso a utilização dos sistemas de segurança ativa disponíveis hoje no mercado é imediata a partir desta nova abordagem de controle da dinâmica veicular. Mais do que isso, essa nova abordagem permite o desenvolvimento de novos sistemas de controle que contribuirão para descentralizar a operação dos sistemas atuais, sem aumentar a complexidade do controlador central – no caso o controle de direção e de velocidade. Um exemplo deste tipo de aplicação seria o sistema de propulsão, onde a maior parte da carga de controle de tração recai sobre o motor de combustão interna. Ao descentralizar a ação de controle, neste caso, é possível fazer com que o motor fique encarregado de fornecer a potência necessária ao veículo para se locomover e deixar aos sistemas de controle menores a tarefa de corrigir algum desvio indesejado.

O próximo capítulo apresenta a modelagem do veículo, de seus sistemas componentes, de seus mecanismos que formam estes sistemas e algumas simulações que validam os modelos desenvolvidos. Um caso de aplicação da modelagem, em conjunto com a idéia do controlador homeostático será apresentado no capítulo subsequente, validando as idéias apresentadas acima.