

6 Proposta de um Controlador Homeostático

Para iniciar a proposta de um controle homeostático sobre a dinâmica veicular é preciso, antes, entender que o veículo pode ser segmentado em unidades de controle. E que estas unidades estão diretamente relacionadas às forças que ocorrem no contato do pneu com o solo. Para melhor compreender o que ocorre nesta superfície particular repete-se a Figura 16, onde são identificadas as interações entre todos os sistemas componentes da dinâmica veicular.

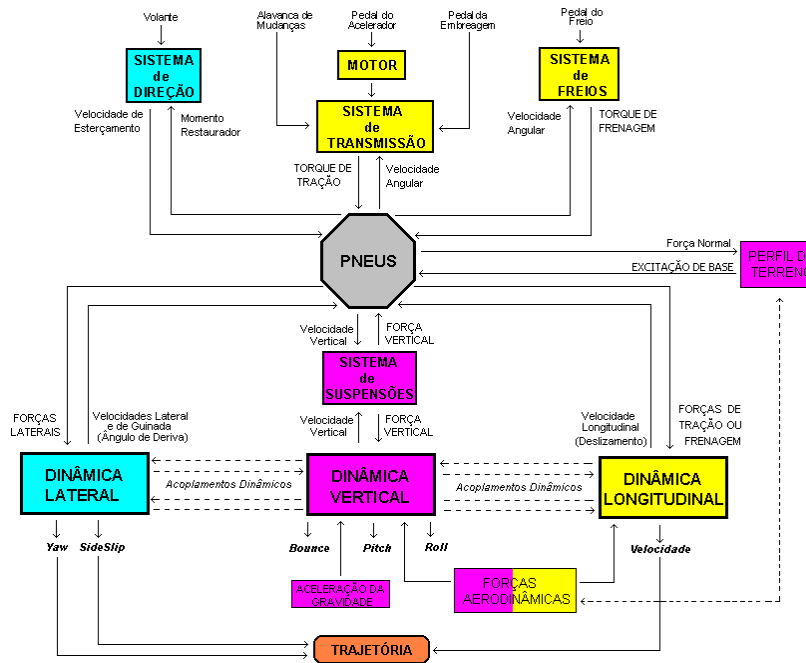


Figura 94: Integração de sistemas e a importância do pneu.

De acordo com a Figura 94 o motorista, que representa o controlador central, ou mestre, possui poucos mecanismos de atuação sobre todas as partes do veículo. Estes mecanismos correspondem ao volante, aos pedais de aceleração, de freio e de embreagem e mais a alavanca de mudanças, para o caso de veículos com câmbio manual. O controle destes mecanismos determina a influência que o motorista exerce sobre os sistemas de direção, propulsão e frenagem. Estes, conseqüentemente, irão influenciar a aderência do pneu ao solo por intermédio do

ângulo de esterçamento e dos torques de aceleração e frenagem. A conjunção destas três variáveis influenciará diretamente a geração das forças longitudinais e laterais e indiretamente na geração das forças normais, responsáveis por manter o veículo em aderência ao solo e em condição de homeostase. As forças normais possuem uma parcela estática, que é definida pelo peso e pela geometria do veículo em questão, e outra parcela dinâmica definida do movimento.

As forças longitudinais ainda podem ser subdivididas em forças de aceleração e forças de frenagem, caracterizando comportamentos distintos do automóvel que necessitam de modelos dinâmicos com particularidades específicas para realizar seu controle. Têm-se, assim, as quatro necessidades diretas de controle, que são consideradas as unidades de controle, e são identificadas como: unidade de suspensão; unidade de direção; unidade de frenagem; e unidade de propulsão. Note ainda que nesta segmentação, em nenhum momento interessa ao controlador central (motorista) saber o que acontece em cada uma destas unidades de controle. Sua preocupação consiste em determinar as coordenadas necessárias para definir direção, velocidade do veículo e distância a eventuais obstáculos localizados ao seu redor. Estas três determinações são suficientes para que o motorista, por intermédio de uma sequência, ou combinação, de atuações sobre o seu conjunto de mecanismos de controle, determine o comportamento integral da dinâmica veicular.

A função do controlador homeostático consistirá em manter estas características operacionais para qualquer controlador central que venha a dirigir o automóvel, seja ele humano ou eletro-mecânico. Ele ainda pretende garantir um melhor aproveitamento das características físicas inerentes aos componentes, mecanismos e sistemas embarcados, ao procurar utilizar suas capacidades até alcançar seus limites físicos.

Retornando à Figura 94, pode-se perceber que as forças geradas pelo pneu afetam todas as dinâmicas principais do veículo. Estas, por sua vez, determinam a trajetória que será percorrida, bem como as respostas às forças do pneu, que correspondem às derivas, longitudinal e lateral, indicando as variações na aderência dos pneus. Estas últimas informam a iminência ou o abandono da condição de homeostase, demandando do controlador que uma ação corretiva seja tomada. Mas qual controlador deve determinar esta ação? Este é o papel do controlador homeostático.

Ao observar a Figura 94 é possível compreender, sob o ponto de vista de controle, que cada ramo que chega ao pneu corresponde a um conjunto de variáveis distintas, intrínsecas a cada sistema ligado ao mesmo ramo e que deve ser controlado. Os ramos que chegam ao pneu também correspondem às unidades de controle especificadas acima, que englobam sistemas distintos da dinâmica veicular. Essa distinção de sistemas em unidades específicas permite propor uma segmentação das variáveis dinâmicas do veículo em conjuntos, de acordo com o sistema ao qual pertencem e de acordo com o tipo de informação sobre a condição de homeostase veicular que elas fornecem. Com isso a segmentação do controle veicular em unidades se expande também às variáveis dinâmicas, gerando a primeira possibilidade de tomada de decisões e proposta de ações de controle de forma local. Não há necessidade de que cada uma das unidades de controle interaja com a outra, mas apenas controle a homeostase para o subespaço a ela associado. Se for possível garantir a estabilidade das quatro unidades de controle localmente, então será possível garantir a estabilidade global do veículo.

Voltando à Figura 94, restam ainda os ramos que são gerados no pneu, que correspondem às forças longitudinais, laterais e verticais. Estas representam as ações de controle sobre as dinâmicas principais do veículo sinalizando ao controle central (motorista) se as coordenadas por ele definidas estão sendo corretamente desempenhadas, ou se existe uma necessidade de correção. No entanto, não é o controlador central quem irá atuar para corrigir alguma eventual variável que esteja fora da normalidade. O controle central irá, por sua vez, definir novas metas globais, passando-as aos controladores homeostáticos. Estes, por sua vez, também receberão as informações das dinâmicas principais e, junto com as novas coordenadas globais, definirão ações corretivas para que a homeostase local seja restabelecida.

As ações corretivas são passadas, então, aos controladores, ou atuadores locais, que são os responsáveis por executar a ação corretiva sobre o sistema específico. Esta ação corretiva tem o objetivo de restabelecer a homeostase para uma variável de estado específica, constituindo uma ação pontual dentro de um subespaço do domínio de homeostase da dinâmica veicular. Como existe acoplamento entre as dinâmicas e sistemas embarcados, haverá a interseção de ações de controle a serem executadas por unidades de controle distintas. Isto será necessário para corrigir uma eventual perda de estabilidade envolvendo duas ou

mais variáveis de estado, de unidades de controle diferentes. Um exemplo desta possibilidade corresponde a corrigir uma perda de estabilidade lateral ao acionar o controle de frenagem e o controle de suspensão. A ação corretiva, por sua vez, irá modificar as forças no contato pneu-solo e, por consequência, determinará a variação do comportamento do veículo. A Figura 95 apresenta, de maneira bastante sucinta, a distribuição de tarefas na cadeia de controle, do nível hierárquico mais elevado até a atuação sobre o veículo.

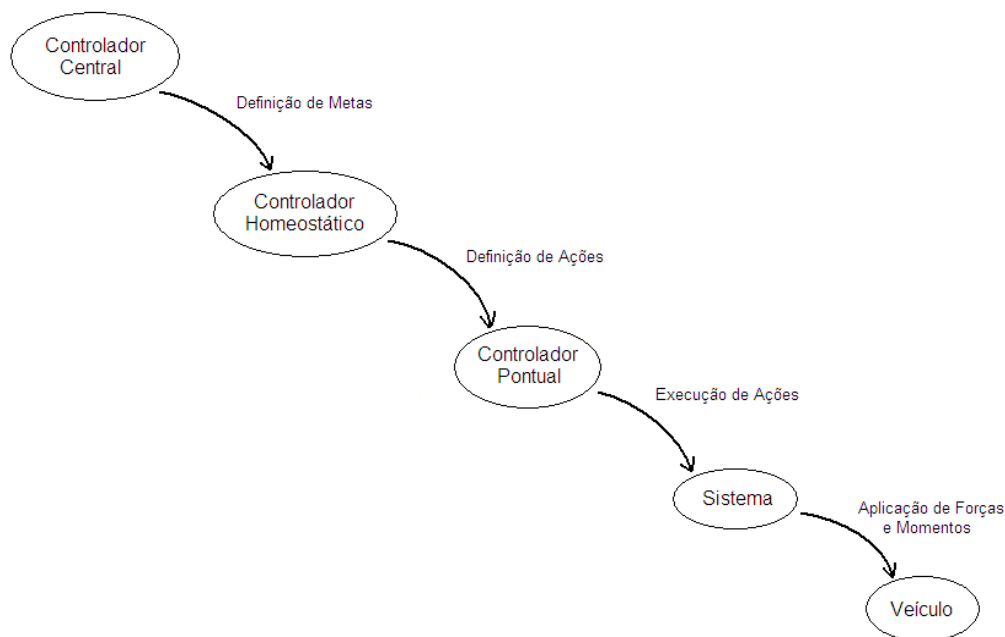


Figura 95: Agentes de controle e suas funções específicas.

É possível, a partir do exposto acima, propor uma estrutura para a implementação do controle homeostático, aplicado à dinâmica veicular.

6.1. Estrutura do Controle Homeostático

Ao propor uma nova estrutura de controle veicular os sistemas de controle que já existem e estão em uso pela indústria automotiva não podem ser abandonados. A maior parte dos elementos que os compõem pode continuar a ser utilizada. No entanto, é preciso compreender que estes elementos passarão a ser atuadores isolados, que serão acionados individualmente para restabelecer uma condição de homeostase de alguma variável distinta, dentro de uma unidade de controle específica. Assim, sistemas como *ABS*, *TCS*, *ACC* e *ESP*, entre outros,

são desmembrados para evitar a repetição de controladores para a mesma função e para permitir que a cadeia de controle consiga enxergar a dinâmica veicular integralmente.

Esta proposta de controle hierarquizado, com forte emprego de controladores locais para, ao garantir a homeostase local, garantir a homeostase global, só é possível em virtude do tipo de modelagem utilizada, baseada em subsistemas. Com a modularização é possível escolher onde posicionar um atuador capaz de corrigir a saída do sistema de sua condição de normalidade. Ao avaliar o modelo desenvolvido pode-se perceber que os sistemas que irão gerar as forças para determinar o comportamento do veículo correspondem aos sistemas de esterçamento dos eixos (considerando-se uma situação de esterçamento nas quatro rodas, ou *4WS – four wheel steering*), aos sistemas de freio de cada uma das rodas, ao controle ativo das suspensões, ao controle de torque em cada uma das rodas (considerando-se que o veículo possui tração nas quatro rodas, ou *4WD – four wheel drive*) e ao controle de torque do motor de combustão interna. A Figura 96 apresenta uma ilustração do arranjo dos níveis de controle, os pontos de aplicação possíveis e o fluxo de informações pretendido.

De acordo com a estrutura proposta, existem três níveis de controles, cada uma com funcionalidades específicas. O primeiro e mais alto nível corresponde ao controlador mestre (ou central). Este controlador corresponde ao motorista ou a um sistema de piloto automático qualquer. Este nível de controle está preocupado em controlar o veículo, sem ter que se preocupar com o que acontece com os inúmeros subsistemas que o compõem. Ele estabelece metas de operação para o veículo, que definem padrões de velocidade e/ou aceleração, de direção e a determinação de distâncias para eventuais obstáculos ao seu redor. Sua atuação está limitada aos controles tradicionais de um carro, que compreendem os pedais – aceleração, frenagem e embreagem (no caso de um carro com câmbio manual) – a alavanca de mudança de marchas e o volante. Como realimentação do próprio veículo o controlador mestre percebe informações relativas a quatro tipos de operações: aceleração, frenagem, direção e suspensão, que influenciam diretamente sua sensibilidade para determinar parâmetros para o sistema de direção. Sendo assim é bastante natural, pela percepção do controlador mestre e pela própria construção do veículo, segmentar as necessidades de controle de acordo com estas quatro características.

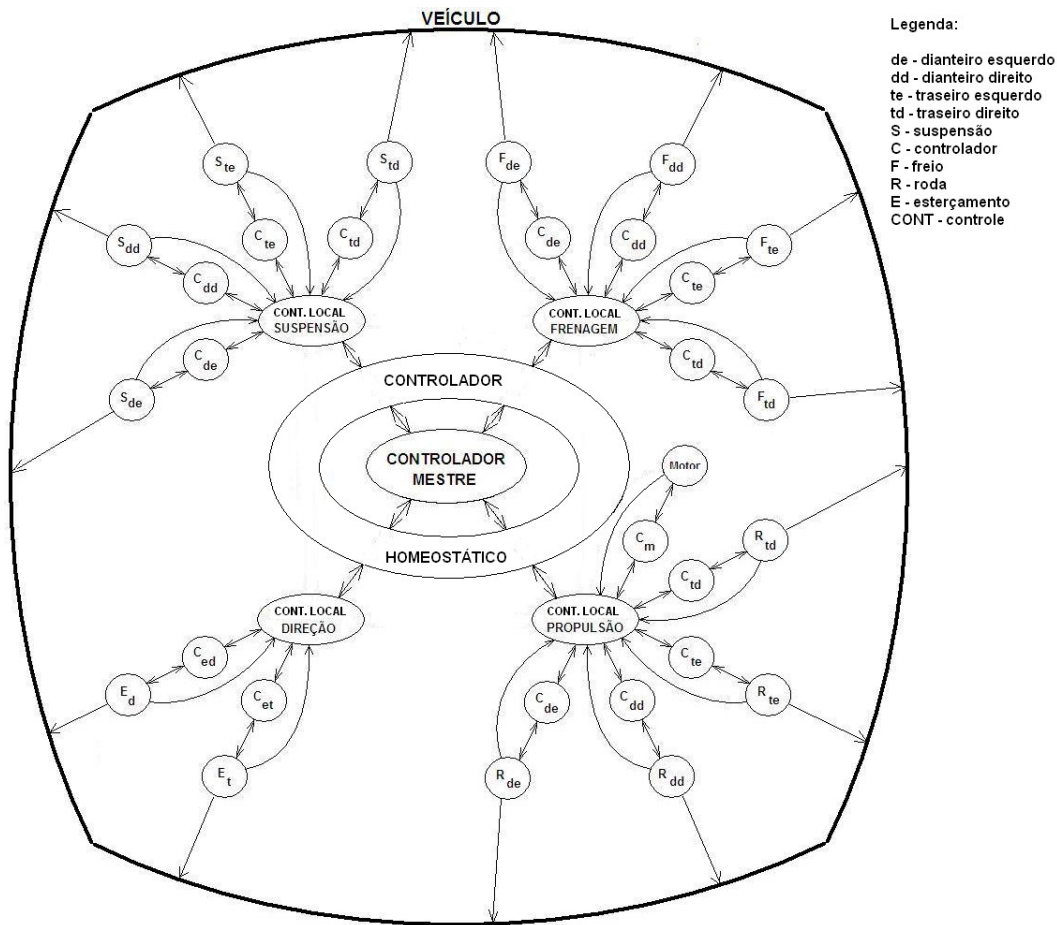


Figura 96: Fluxo de informações e estrutura da 1ª versão do Controle Homeostático.

Um segundo nível de controle corresponde ao controlador homeostático. Este nível de controle é caracterizado pela segmentação do domínio de estabilidade do veículo e pelo agrupamento de suas variáveis dinâmicas em quatro regiões distintas, coincidentes aos quatro tipos de operação, percebidas pelo controlador mestre. A partir desta segmentação, o problema de controle para o controlador homeostático se transforma em um problema de controle local, cujas variáveis de interesse terão, cada uma, seu sistema de controle pontual. Este segundo nível de controle é formado, então, por um controlador homeostático, que constantemente observa as mudanças na condição de homeostase do subconjunto de variáveis que compõem os sistemas de cada uma de suas unidades de controle. O controlador homeostático possui a função de determinar e alterar valores de referência para os controladores locais individuais, especificando doses de ações corretivas. Ele também deve comandar o acionamento dos controladores locais. O controlador homeostático recebe informações a respeito das variáveis que

pertencem ao um domínio específico e troca informações com o controlador local e com o controlador mestre, procurando sempre manter os dois níveis de controle adjacentes atualizados sobre as alterações no subdomínio de variáveis. O controlador homeostático deve ser capaz de se comunicar com diferentes controladores simultaneamente, para a determinação de ações de controle conjuntas, quando a situação envolver mais de uma unidade de controle. Para que isso seja possível deve existir uma rede de dados comum a todos os controladores, que disponibiliza as informações a respeito da condição de homeostase local para cada uma das unidades de controle. Quando alguma variável abandona a homeostase essa informação deve ser disponibilizada para que o controlador homeostático possa agir, em caso de necessidade.

O último nível de controladores, nesta extensa e complexa malha de controle, corresponde aos sistemas de controladores individuais, de implementação simples e que se preocupam com uma única função apenas. Exemplos deste nível de controlador podem ser encontrados no sistema de atuação do freio, onde existe um circuito hidráulico que leva a pressão, inserida pelo pedal de frenagem, a acionar um conjunto de válvulas proporcionais, para o controle da distribuição do torque de frenagem. Da mesma forma, em cada uma das unidades de controle, existem atuadores individuais, que consistem em válvulas proporcionais, motores, ou a combinação de componentes em sistemas eletromecânicos, específicos para a realização de uma tarefa de controle singular.

6.2.

Controladores Locais: Um Exemplo de Aplicação

A primeira etapa na definição dos controladores locais consiste em definir o que se deseja controlar, em cada sistema componente da dinâmica veicular. Como foi definida anteriormente, a dinâmica veicular foi dividida em quatro grandes grupos de controle, que foram combinados de acordo com sua funcionalidade. Uma primeira funcionalidade consiste no controle das forças verticais que são passadas ao chassi, no ponto de acoplamento com as suspensões do veículo, para evitar que irregularidades de pistas, ou desequilíbrios geométricos e/ou dinâmicos provoquem condições favoráveis para o surgimento de instabilidades. Assim, deseja-se controlar a força que as suspensões exercem sobre o chassi, durante os

diversos tipos de movimento que o veículo pode realizar. Uma aplicação imediata seria a diminuição da variação do ângulo de arfagem, durante a aceleração do veículo, visando balancear o desequilíbrio dinâmico, motivado por assimetrias geométricas e de distribuição de peso. Com essa medida o motorista deixaria de sentir quaisquer variações de posicionamento do chassi, passando a percorrer uma trajetória de maneira bastante suave.

Uma segunda funcionalidade consiste em realizar o controle da propulsão em cada uma das rodas, para evitar que alguma delas deslize durante uma aceleração. Para que isso seja possível é necessário o acompanhamento constante das velocidades de giro nas rodas e da velocidade longitudinal do veículo. Além disso, é preciso que haja uma capacidade para modificar o torque fornecido a cada roda, seja atuando nos diferenciais, ou nos próprios eixos e semi-eixos. Ainda, também é necessário acompanhar o funcionamento do motor, para garantir que ele consiga fornecer a potência necessária a todas as rodas, mais os demais sistemas que fazem uso da energia que ele entrega.

Uma terceira funcionalidade diz respeito ao controle de frenagem em cada uma das rodas, para evitar que haja qualquer travamento, resultando em um deslizamento do pneu e um conseqüente acidente. Para tanto, há necessidade de verificação constante das velocidades de giro nas rodas e da velocidade longitudinal, as mesmas informações necessárias ao controle de propulsão. A ação de controle se faz diretamente no circuito hidráulico do sistema de freio, por intermédio da variação do torque de frenagem disponível. Assim como no sistema de propulsão, há uma limitação de torque de frenagem disponível, o que dificulta a ação de controle e define a existência de um limite físico máximo para qualquer ação de frenagem.

A última funcionalidade corresponde ao controle do ângulo de esterçamento, no sistema de direção. Para determinar seu correto funcionamento a velocidade longitudinal e a lateral em cada uma das rodas devem ser monitoradas constantemente para, então, inferir o ângulo de deriva e determinar se alguma ação corretiva na direção do movimento se faz necessária. Se o movimento envolver baixos valores para o ângulo de deriva então a atuação deve ser feita diretamente no sistema de direção, com o auxílio de um atuador qualquer para gerar o esterçamento extra. Quando o ângulo de deriva for considerável, o que implica a existência de uma força lateral alta pode haver a necessidade de uma

ação anterior do sistema de frenagem, ou do sistema de propulsão para restabelecer uma condição aceitável para a atuação do sistema de direção.

A título de ilustração de controladores, será apresentado apenas o desenvolvimento para o controle de variação da compressão das quatro suspensões, com a indicação de possibilidades de atuação do controlador homeostático.

6.2.1. Controlador Local para Suspensão

O modelo de suspensão utilizado na modelagem da dinâmica veicular consistia de uma suspensão passiva, que contava apenas com uma mola e um amortecedor. Com isso ela recebia as velocidades provenientes do chassi e do pneu, as transformava e devolvia em forma de forças. Ao agregar um sistema de controle que efetivamente ajusta a força vertical sobre o chassi, é necessário incluir mais um elemento ao modelo que compreende uma fonte de esforço extra, para compensar os efeitos dinâmicos do veículo. Esta fonte corresponde a um sistema hidráulico onde ao variar a pressão do circuito e o sentido de abertura da válvula de controle, tem-se a fonte de esforço extra ou variável de controle da suspensão, conforme indicado na Figura 97.

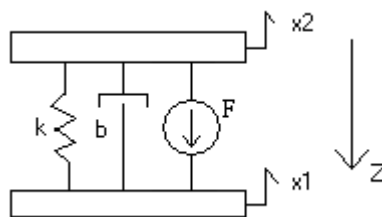


Figura 97: Suspensão semi-ativa.

Com a adição deste novo elemento atuador o grafo de ligação da suspensão sofre uma alteração, passando a ser representado pela Figura 98 a seguir.

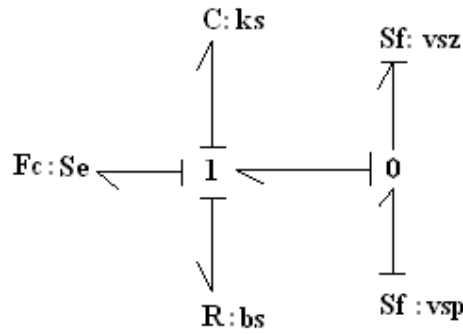


Figura 98: Grafo de ligação para suspensão semi-ativa.

No entanto, para realizar o projeto de um controlador, ou de níveis de controladores aninhados, é preciso considerar, também, outros componentes da dinâmica veicular. Adiciona-se, assim, o modelo da dinâmica vertical do pneu e um modelo que representa $\frac{1}{4}$ do corpo rígido, que representa o chassi. O modelo para sistema de suspensão, que engloba pneu, suspensão e chassi passa a ser tratado como um sistema massa-mola-amortecedor duplo, onde se deseja manter a posição da massa suspensa constante, independente da excitação de base que o sistema for submetido. A Figura 99 a seguir apresenta o grafo de ligação do modelo dinâmico correspondente e servirá de base para a realização do equacionamento.

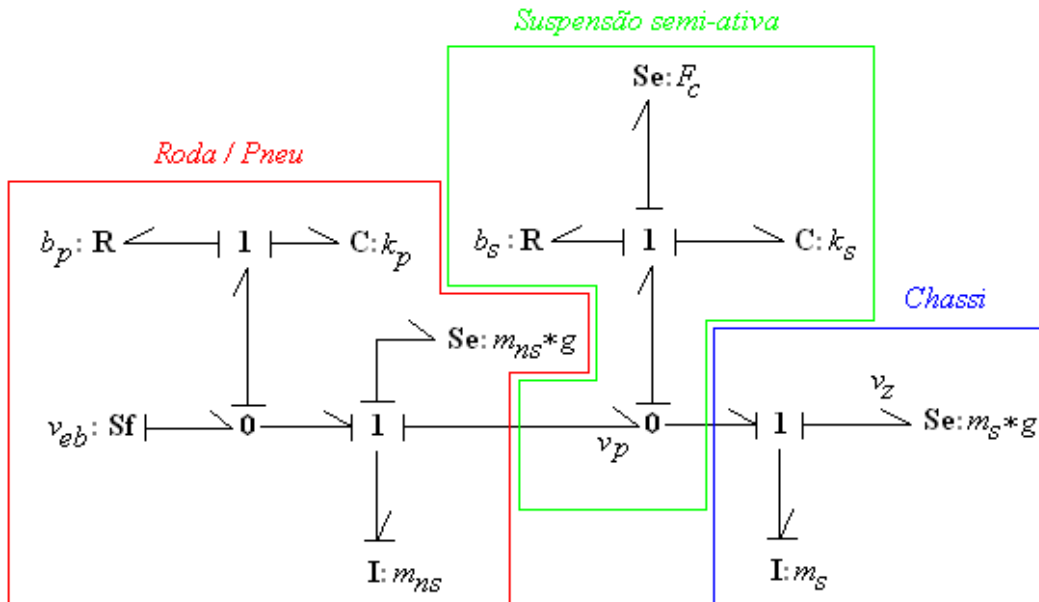


Figura 99: Modelo de dinâmica vertical para projeto de controle.

De acordo com o grafo de ligação pode-se perceber que existem quatro parâmetros de entrada, uma força de controle F_c , as forças peso das duas massas (suspensa e não-suspensa) e uma velocidade de excitação de base, v_{eb} , que retrata o perfil de imperfeições da pista onde o veículo se locomover. Em um primeiro momento só pretende-se acompanhar a variação da velocidade vertical, v_z , no chassi e, por isso, o equacionamento desenvolvido apresentará apenas esta variável como saída. O equacionamento relativo ao grafo de ligação da Figura 99 é apresentado a seguir.

$$\begin{bmatrix} m_{ns}\dot{v}_p \\ m_s\dot{v}_z \\ v_{eb} - v_p \\ v_p - v_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-(b_p - b_s)}{m_{ns}} & \frac{b_s}{m_s} & k_p & -k_s \\ \frac{b_s}{m_{ns}} & \frac{-b_s}{m_s} & 0 & k_s \\ \frac{-1}{m_{ns}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{m_{ns}} & \frac{-1}{m_s} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{ns}v_p \\ m_s v_z \\ x_{eb} - x_p \\ x_p - x_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} F_c + \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} m_{ns}g + \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} m_s g$$

$$v_z = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{m_s} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{ns}v_p \\ m_s v_z \\ x_{eb} - x_p \\ x_p - x_z \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

onde F_c representa a nova fonte de esforço com a força de controle a ser aplicada na suspensão. As duas forças peso descritas no equacionamento representam distúrbios para a planta do sistema e, para efeitos de projeto do controlador, não serão consideradas.

Uma primeira malha de controle a ser desenvolvida para o modelo de dinâmica vertical apresentado na equação (6.1) corresponde a tentar fazer o erro entre o valor de velocidade vertical do chassi medido e a velocidade desejada, ser nulo. Este esquema de controle é mostrado na Figura 100. De acordo com esta figura a planta do sistema, que corresponde à dinâmica vertical retratada na equação (6.1), é representada pela função de transferência $G(s)$, obtida a partir das matrizes de estado, de entradas e de saídas do equacionamento supracitado.

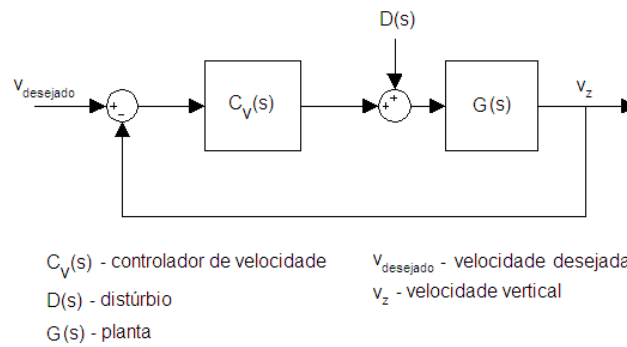


Figura 100: Malha de controle para rastreamento de velocidade vertical.

Utilizando os parâmetros do veículo apresentados nas tabelas do capítulo 5 e depois de algum desenvolvimento algébrico, encontra-se a função de transferência $G(s)$ que representa a planta do sistema e será usada como base para o projeto de um controlador de velocidade para a dinâmica vertical de $\frac{1}{4}$ de veículo.

$$G(s) = \frac{3,7 \times 10^{-3} s^3 + 24,7 s^2 + 18,5 s + 2,9 \times 10^{-8}}{s^4 + 7037 s^3 + 2,5 \times 10^5 s^2 + 9,3 \times 10^5 s + 5,6 \times 10^5} \quad (6.2)$$

Para controlar a velocidade da dinâmica vertical propõe-se um controlador PID clássico, em uma tentativa de mostrar que não será necessário fazer uso de técnicas de controle sofisticadas para o projeto dos controladores locais. Além disso, o controlador PID é conhecido por ser o mais amplamente utilizado pela indústria de um modo geral, aí incluindo a indústria automotiva. Na malha de controle o controlador PID é representado pela função de transferência $C_v(s)$, que corresponde à função descrita na equação (6.3).

$$C_v(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s = \frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{s} \quad (6.3)$$

onde K_p , K_i e K_d correspondem aos ganhos dos termos proporcional, integral e derivativo, respectivamente.

Para determinar o valor destes ganhos utilizou-se a técnica de lugar geométrico das raízes conhecida e apresentada nas referências [49] e [50]. Após um procedimento de tentativa e erro, na busca por um gráfico do lugar das raízes mais adequado ao tipo de controle pretendido, foi possível determinar os valores

para os ganhos do controlador. Estes valores correspondem a: $K_p = 2,6998 \times 10^7$; $K_i = 6,7495 \times 10^9$; $K_d = 2,6998 \times 10^4$ e a função de transferência correspondente é apresentada na equação (6.4).

$$C_v(s) = \frac{2,6998 \times 10^4 s^2 + 2,6998 \times 10^7 s + 6,7495 \times 10^9}{s} \quad (6.4)$$

Combinando as funções de transferência da planta e do controlador PID para velocidade alcança-se a malha de controle ilustrada pela Figura 100. O gráfico do lugar das raízes para esta malha fechada é apresentado na Figura 101.

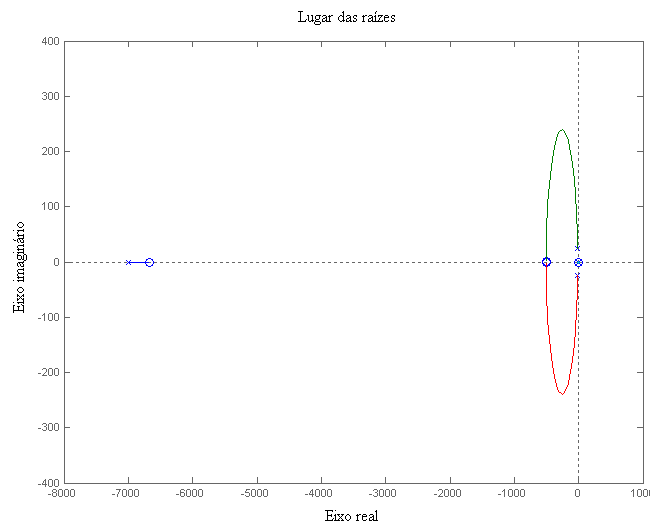


Figura 101: Lugar das raízes para malha fechada do controle de velocidade.

Pelo gráfico pode-se perceber que existem três ramos principais, sendo dois próximos à origem e um bastante distante, à esquerda. Todos os ramos permanecem no semi-plano esquerdo, caracterizando um sistema em malha fechada estável, de acordo com [49] e [50]. É possível perceber, ainda, um aglomerado de pólos e zeros na origem, ou bem próximo a ela. Ele corresponde a dois pares de pólos e zeros que se cancelam, não influenciando no desempenho do sistema. Ainda, como os ramos complexos conjugados estão próximos da origem eles são os dominantes, fazendo com que o sistema se comporte com alguma oscilação dependendo do ganho total para o sistema que tiver sido escolhido. No caso do sistema de controle de velocidade da dinâmica vertical de $\frac{1}{4}$ do veículo escolheu-se um ganho total $K = 100$, que permite que o sistema possua uma

ultrapassagem menor que 20% e um tempo de assentamento bastante rápido, conforme pode ser observado na Figura 102 a seguir.

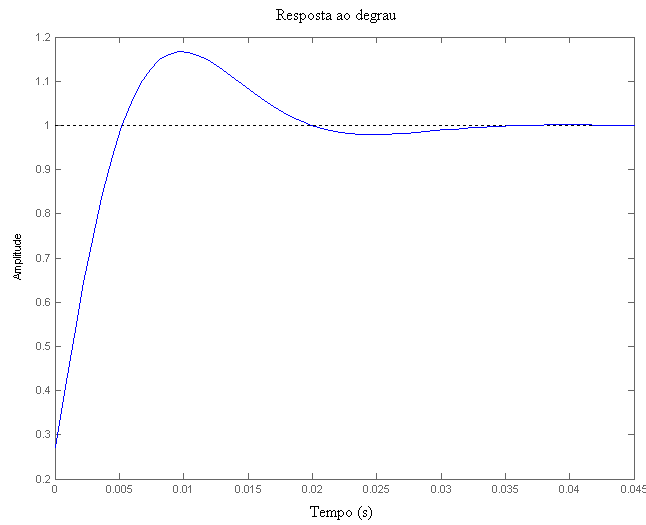


Figura 102: Resposta ao degrau para controle de velocidade.

No entanto, o objetivo do controle não é a velocidade do sistema, mas sim o posicionamento da massa suspensa, indicada pela variável x_z . Assim é preciso projetar uma nova malha de controle, externa ao controle de velocidade acima desenvolvido e que garanta o rastreamento de um valor, ou perfil, de posicionamento desejado. A nova malha do sistema de controle, agora com a verificação da posição da massa suspensa é apresentada na Figura 103.

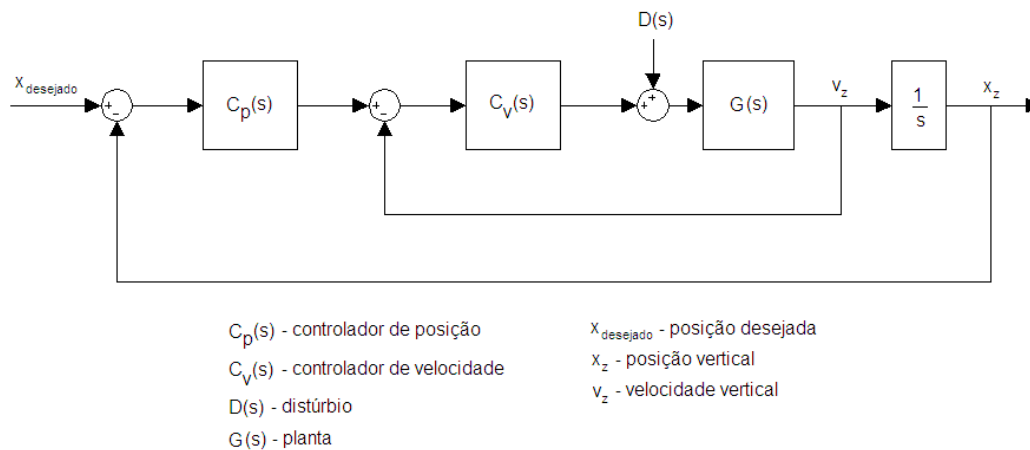


Figura 103: Malha de controle completa para suspensões.

Percebe-se que a nova malha já apresenta um integrador, que determina a posição presente do sistema e que, também, inclui um pólo na origem fazendo com que o sistema possa oscilar. Para evitar a inclusão de mais um pólo na origem, que pode até fazer com que o sistema em malha fechada venha a se instabilizar, preferiu-se adotar um controlador PD, mais simples do que o PID adotado para o controle da velocidade vertical, mas que é capaz de atender às necessidades do projeto. A função de transferência que determina o controlador PD é apresentada pela equação (6.5).

$$C_p(s) = K_{p_{pos}} + K_{d_{pos}} s \quad (6.5)$$

Assim como foi feito para a determinação dos ganhos do controlador de velocidade, para o controle de posição também foram utilizadas as técnicas de lugar geométrico das raízes. Os valores dos ganhos determinados para o controlador de posição correspondem a: $K_{p_{pos}} = 1850$; $K_{d_{pos}} = 185$. Os ganhos e a função de transferência indicam que o controlador para posição acrescenta um zero em -10, na região de estabilidade do plano imaginário o que puxa o lugar das raízes para a esquerda, deixando-o estável. Este lugar geométrico das raízes, agora com o sistema de controle completo, com a malha interna para controle de velocidade e a malha externa para controle de posição é apresentado a seguir, na Figura 104.

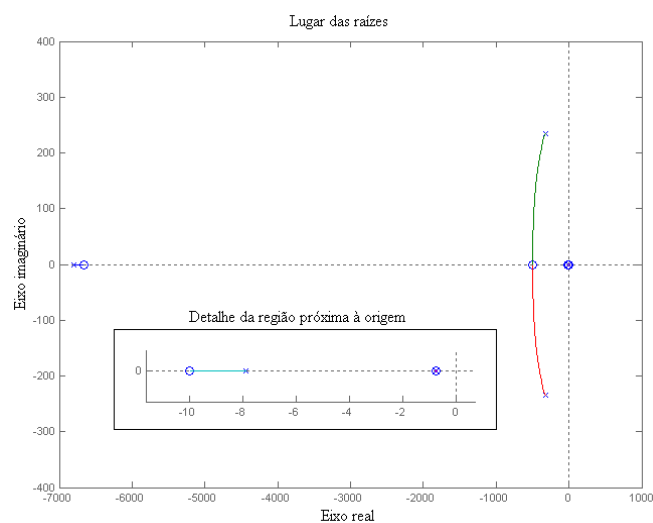


Figura 104: Lugar das raízes para sistema completo em malha fechada.

Assim como no caso do controle de velocidade, o sistema completo possui um par de raízes complexas conjugadas, que é o par dominante, dando uma característica oscilatória à dinâmica mesmo com a presença de um ramo pequeno que sai de -8 e chega a -10 , conforme visualizado no detalhe da Figura 104. Aqui também existe um par de raízes que se cancela, reduzindo a ordem do sistema final. Para o controlador de posição escolheu-se o ganho total do sistema como 50, resultando na resposta ao degrau subamortecida, mas com tempo de assentamento pequeno. Estas características podem ser observadas na Figura 105, bem como uma pequena oscilação no regime transitório do sistema.

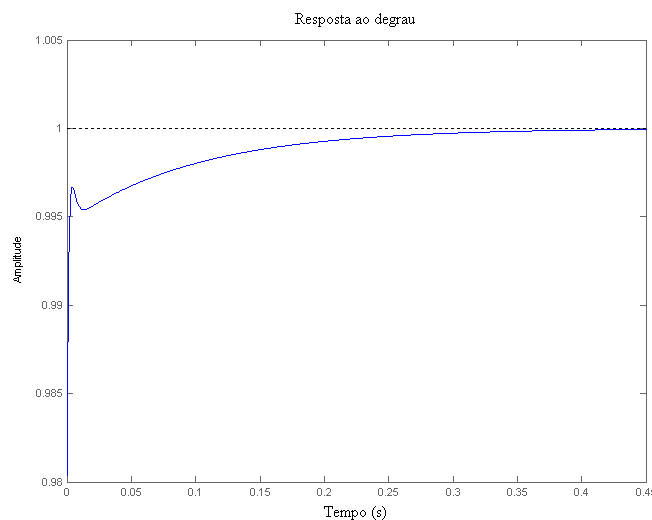


Figura 105: Resposta ao degrau do sistema completo controlado.

Com as duas malhas de controle desenvolvidas resta testar o desempenho destes controladores com o modelo global, desenvolvido ao longo do capítulo 4. Para tanto o modelo de suspensão foi alterado para que se adequasse à situação apresentada pela Figura 97. Com isso a suspensão passou a contar com uma entrada extra, representativa do sistema hidráulico de geração de força, para compensar as oscilações em função da variação dinâmica do posicionamento do veículo.

Para que fosse possível realizar uma comparação, repetiu-se o teste de aceleração máxima até a velocidade limite do veículo, com os mesmos parâmetros apresentados pelas tabelas do capítulo 5. Os resultados obtidos com a aplicação do controle são bastante promissores, pois indicam a correta manutenção de uma

altura constante do chassi do veículo por todo o período de execução do teste, conforme visto na Figura 106.

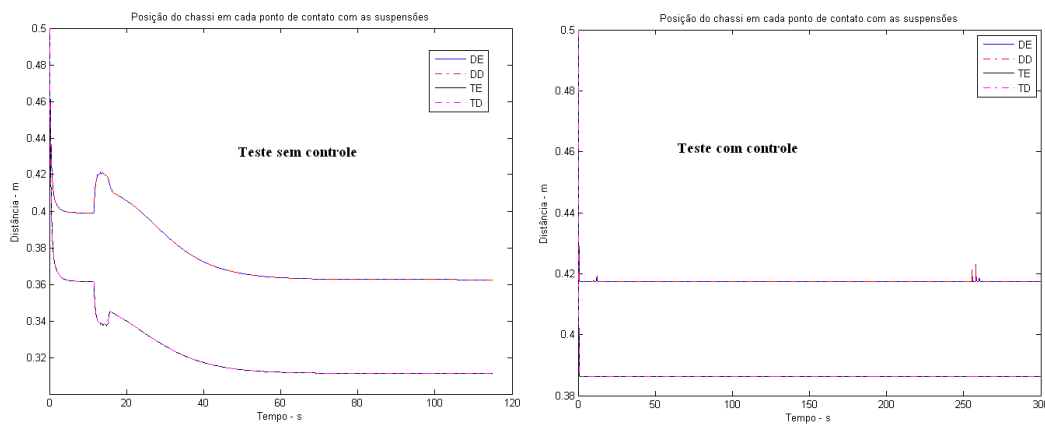


Figura 106: Variação do posicionamento vertical do chassi.

Percebe-se que os valores mantidos no teste com o sistema controlado são próximos, porém maiores, aos valores observados no período de assentamento sob peso próprio, do teste sem controle. Esse fato pode ser explicado pela existência da força de controle extra, que atua e eleva o sistema. Percebe-se ainda, que o controlador permite que haja o assentamento do veículo e que, após essa estabilização na condição de repouso do carro é que os valores de posicionamento são mantidos.

Da mesma forma que a posição foi mantida, a variação da força normal, ao longo do teste com o sistema controlado, também foi pequena, conforme indica o gráfico da Figura 107. No entanto este dado pode ser preocupante, pois indica que a região de contato do pneu com o solo foi diretamente afetada e, com isso, toda a composição de forças longitudinais e laterais foi alterada. Essa manutenção da força normal constante indica que houve um aumento do atrito entre o pneu e o solo ocasionando uma diminuição da velocidade de giro das rodas e do veículo, conforme a Figura 108.

Este fato corresponde a um efeito colateral da aplicação de uma ação de controle, que desestabiliza outro pedaço da dinâmica veicular. Esta característica foi explicada no capítulo 3 e justifica a necessidade de um sistema de controle coordenado e integrado. A correção deste efeito é de responsabilidade do controlador homeostático. Ele, ao perceber que um dos requisitos definidos pelo controlador central (o motorista), neste caso a aceleração máxima até velocidade

limite, não foi alcançada, deveria cortar a ação do controle de suspensão até um nível aceitável de conforto. Uma possibilidade de se fazer isto é variar o valor desejado de posição da massa suspensa do veículo. Outra possibilidade seria desacoplar o controle de suspensão, temporariamente. Ou, de maneira análoga, comandaria o início de outro sistema de controle, de uma das demais unidades de controle anteriormente definidas. O controlador homeostático faria, então, a dosagem de cada controlador local, até que as especificações originais fossem alcançadas, ou restabelecidas.

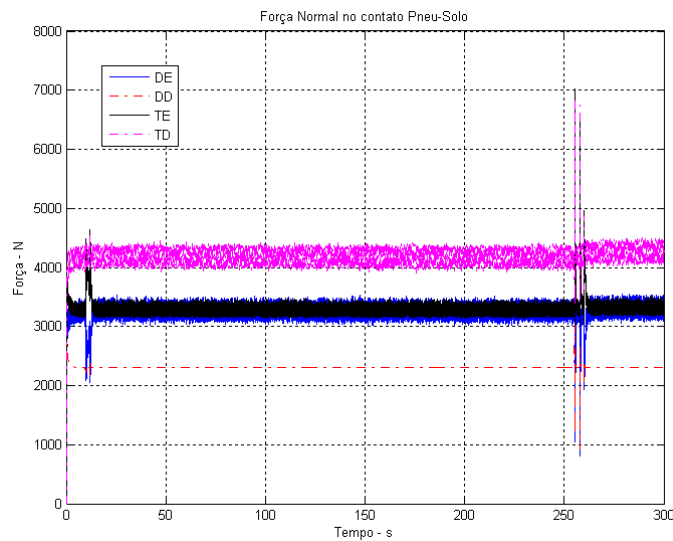


Figura 107: Variação da força normal no sistema controlado.

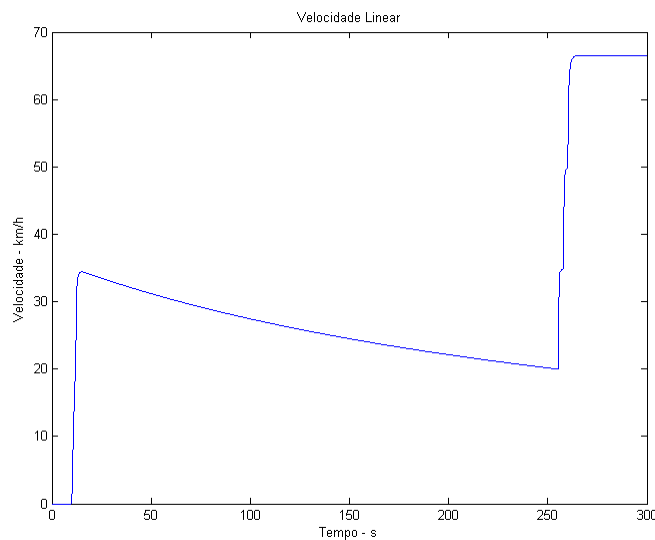


Figura 108: Variação da velocidade longitudinal com controle de suspensão.

6.3. Controlador Homeostático

O controlador homeostático corresponde ao nível intermediário do controle hierárquico empregado nesta tese. Ele é o responsável por receber informações de uma grande diversidade de sistemas do veículo e determinar ações de controle corretivas para cada controlador local, de cada sistema componente da dinâmica veicular. O controlador homeostático pode ser representado como um único controlador, que teria a capacidade de acessar todos os quatro grupos de controle da dinâmica veicular, ou, por questões de simplicidade, ele pode ser dividido em quatro controladores distintos, para operar cada um dos grupos de controle, sejam eles a direção, a suspensão, a aceleração ou a frenagem.

Mesmo considerando uma versão segmentada do controlador homeostático, algumas informações do veículo precisam estar disponíveis, independente do sistema de controle. Estas informações correspondem às forças no contato do pneu com o solo, às velocidades e deslocamentos do veículo. Mas de todas as informações, as mais importante correspondem às derivas, longitudinal e lateral. Estes são os primeiros dados indicativos de que o veículo pode estar perdendo a condição de homeostase. Relembrando, homeostase corresponde à condição de funcionamento normal de todos os sistemas componentes da dinâmica veicular.

Imagine, para efeitos de simplificação, que cada grupo de controle (direção, frenagem, aceleração, ou suspensão) é abordado de maneira isolada e que possui um conjunto de variáveis de estado que precisam ser controladas. Esse conjunto de variáveis de estado se constitui no domínio do espaço dentro do qual o sistema deve ser mantido e de forma estável. Cada estado corresponde a uma equação diferencial que, ao ser agrupado às demais equações, formam o sistema dinâmico que representa uma dada característica ou comportamento da dinâmica veicular. O somatório destes comportamentos compõe o veículo. Assim, cada grupo de controle pode ser representado como um sistema dinâmico independente, a princípio, que serão controlados individualmente, na forma

$$\dot{x} = f(x, u, t) \tag{6.6}$$

onde a lei de controle, selecionada como

$$u = g(x, t) \quad (6.7)$$

é capaz de levar o sistema a um ponto de equilíbrio, ou a um movimento estável, muito próximo de seu movimento original. Se isso acontecer e alguém fizer uma análise de estabilidade sobre cada um desses sistemas dinâmicos, seria capaz de encontrar uma função de Lyapunov que comprovaria a estabilidade do sistema, nas suas mais diversas formas, tal como apresentado em [48]. Como a análise é realizada para cada grupo de controle, que corresponde a um subconjunto das ações de controle necessárias, ter-se-ia a estabilidade local de um grupo de características, ou comportamentos.

Uma vez que se tenha a função Lyapunov de um sistema, com sua estabilidade comprovada, parte-se para o próximo grupo de controle. Agora imagine que isso é feito para cada grupo de controle, com cada variável de estado da dinâmica veicular e que todas as análises indicam estabilidade dos estados. O resultado dessa abordagem corresponderia a ter uma família de funções Lyapunov que comprovariam a estabilidade local de cada sistema de controle presente. Se todos os estados, representados por essa família de funções Lyapunov, forem estáveis, então se conseguiu a estabilidade global do sistema.

Ainda, de acordo com a propriedade aditiva, ao somar funções positivas definidas o resultado fornece uma nova função que também é positiva definida. O mesmo vale para funções negativas definidas. Assim, seria possível determinar uma função Lyapunov global, a partir da soma das funções locais, para a totalidade de estados que representam o comportamento dinâmico do sistema sob avaliação. Essa abordagem é coerente, pois se cada função local representa uma parcela da energia do sistema global, ao somar todas as funções locais para obter uma função Lyapunov global, tem-se a totalidade da energia deste sistema.

Ao aplicar os conceitos do método direto de Lyapunov para a dinâmica veicular e, mais especificamente, para os controladores de cada um dos grupos de controle existentes, pode-se perceber uma associação direta do conceito de homeostase veicular com o conceito de domínios de estabilidade de Lyapunov. Cada comportamento da dinâmica veicular a ser controlado irá possuir uma região de estabilidade local, dentro da qual ele se encontra em operação normal, ou em condição de homeostase. No entanto, variações no comportamento da dinâmica

veicular, que correspondem às mudanças nos movimentos do veículo, situações de emergência pelas quais ele passa, irão fazer com que o veículo abandone uma trajetória estável e inicie outra, que ainda precisa ser aproximada para o movimento estável do sistema. Isto corresponde a deixar de estar em condição de normalidade, o que obriga o controlador homeostático a criar uma ação contrária e reparadora para fazer o sistema retornar para a condição de homeostase. Como a dinâmica veicular é composta por uma coleção de comportamentos, cada ação restauradora corresponderia a uma intervenção local para corrigir aquele problema específico. Mais uma vez, essa ação lembra muito bem a ação de médicos ao tratar de um paciente enfermo. O médico diagnostica a doença e, por meio de remédios, ataca cada sintoma especificamente. No caso do veículo o remédio corresponde à ação corretiva de controle, para restabelecer a condição de homeostase veicular.

Resta, então, encontrar funções Lyapunov que permitam a concretização deste controlador. Para tanto é preciso compreender, primeiro, que tipo de sistema dinâmico se deseja controlar. No caso do controlador homeostático não se trata de componentes físicos distintos, como motores ou válvulas. Mas trata-se de determinar modelos de comportamentos do veículo, que fazem uso das variáveis de estado medidas por toda a extensão do automóvel, para cada grupo de controle específico. Estes comportamentos correspondem a aceleração em linha reta; aceleração em uma curva; movimentos em velocidade constante, em retas ou em curvas; freiando em linha reta; freiando em uma curva; desviando de um obstáculo repentino; acelerando em pista com bifurcação de coeficiente de atrito com o solo; aceleração em subida de pista íngreme; freiando em subida de pista íngreme; aceleração em descida de pista íngreme; freiando em descida de pista íngreme; realizar uma curva com uma ou mais rodas deslizando; andar sobre gelo; andar em aquaplanagem; trafegar em pista arenosa; e muitos outros comportamentos que ainda precisam ser especificados. Cada comportamento, de maneira isolada, permite a elaboração de uma função Lyapunov para cada grupo de controle da dinâmica veicular. Após determinar todas essas funções e somá-las, tem-se o controlador homeostático de cada grupo de controle. No entanto, agrupar todas estas funções, de uma única vez, poderia provocar conflitos nos atuadores locais, acarretando em falhas no controlador e, conseqüentemente, um acidente. É interessante, então, utilizar a lei de controle associada a cada comportamento de

maneira isolada, a partir de uma habilitação sucessiva de comportamentos, à medida que estes forem sendo alterados. Ao fazer isso se caracteriza a capacidade de adaptação do modelo de controlador, semelhante ao que já havia sido feito para o modelo da dinâmica veicular, comprovando a maleabilidade do controlador homeostático.

Para que essa maleabilidade seja viável é necessário contar com a disponibilidade, a todo instante, das variáveis de estado medidas (acelerações, velocidades e deslocamentos) e das estimadas (derivadas longitudinais e laterais, forças e momentos). Além disso, é necessário que alguma instância superior de controle exista, para definir o tipo de estratégia que se deseja desempenhar. O responsável por estas tarefas é o controlador central.

6.4. Controlador Central

O controlador central corresponde ao mais alto nível hierárquico do controle desenvolvido para esta tese. Ele representa o motorista do veículo, seja ele um humano, ou um sistema autônomo de guiagem. O controlador central, melhor compreendido na forma do motorista, não possui a percepção de todos os sistemas componentes da dinâmica veicular. Ele percebe apenas as variações relacionadas às variáveis de estado de velocidade e deslocamento do veículo. O motorista também consegue perceber distâncias a obstáculos próximos e a iminência de situações perigosas, que servem para ativar comportamentos evasivos, quando necessários. No entanto, por mais que consiga perceber a necessidade de tomadas de ações bruscas, nem sempre o motorista está capacitado a interpretar os dados surgidos após se iniciar uma manobra de emergência. E na maioria das vezes ao retornar de uma manobra de emergência, ele acaba não tendo agilidade suficiente para combater os efeitos colaterais gerados pela dinâmica do sistema. Assim, acidentes acontecem.

Mas se o motorista for capaz, seja por um comando explícito, ou seja, a partir de suas ações, de especificar estratégias de controle para níveis inferiores de controladores, então ele pode ser capaz de conduzir o carro de volta para sua condição de homeostase, sem precisar fazer muito esforço, ou ser muito ágil. Toda

essa tarefa recairia sobre os controladores homeostáticos e locais, que atuariam pontualmente para resolver a emergência.

Assim, a função do controlador central corresponde a definir estratégias de operação para o veículo, como velocidade de locomoção, trajetória a seguir, distância a objetos próximos e comportamentos em casos de emergências. Não há a necessidade de determinação de uma lei de controle, mas apenas da definição de pontos de operação, ou tipos de movimentos. Para ser implementado em um dispositivo autônomo seria necessário instrumentar o automóvel com inúmeros sensores que o localizassem no espaço ao seu redor, bem como seria preciso ter os modelos de trajetórias a percorrer - e qual delas efetivamente percorrer - devidamente conhecidos.

O encadeamento final dos três níveis de controladores constitui o Controle Homeostático.