



Universidade de São Paulo – USP
Escola de Engenharia de São Carlos – EESC



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA.

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE SISTEMAS MECATRÔNICOS
PARA MELHORIA DO DESEMPENHO DE UM VEÍCULO.**

Orientando : Joël Bafumba Liseli

nºUSP 7683537

Orientador : Profa. Dra. Maíra Martins da Silva

nºUSP 2869775

São Carlos,

Outubro de 2013

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTA TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

L769m Liseli, Joël Bafumba
Modelagem e simulação de sistemas mecatrônicos para
melhoria do desempenho de um veículo / Joël Bafumba
Liseli; orientadora Máira Martins da Silva. São Carlos,
2013.

Monografia (Graduação em Engenharia Mecatrônica) --
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo, 2013.

1. Modelagem e simulação. 2. Estabilidade. 3.
Sistemas mecatrônicos. 4. Veículos - Desempenho. I.
Título.

FOLHA DE AVALIAÇÃO

Candidato: Joël Bafumba Liseli

Título: **MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE SISTEMAS MECATRÔNICOS
PARA MELHORIA DO DESEMPENHO DE UM VEÍCULO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Escola de Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo
Curso de Engenharia Mecânica/Mecatrônica.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Adriano Almeida Gonçalves Siqueira

Nota atribuída: 10,0 (dez)

Adriano Almeida Siqueira
(assinatura)

Prof. Dr. Luiz Augusto Martin Gonçalves

Nota atribuída: 10,0 (dez)

Luiz Augusto Martin Gonçalves
(assinatura)

Profa. Dra. Máira Martins da Silva

Nota atribuída: 10,0 (dez)

Máira M. da Silva
(assinatura)

Média: 10,0 (dez)

Resultado: APROVADO

Data: 16/10/2013

Este trabalho tem condições de ser hospedado no Portal Digital da Biblioteca da EESC

SIM ☒ NÃO ☐ Visto do orientador Máira M. da Silva

SUMÁRIO

0. Introdução	10
1. Objetivos	14
2. Revisão da teoria.....	15
2.1. Modelos de sistemas.....	15
2.2. Sistemas Multiportas e Bond Graphs.....	18
2.2.1. Engenharia multiportas.....	18
2.2.2. Portas, bond e potência	23
2.2.3. Bond Graphs.....	26
2.2.4. Inputs, outputs e sinais	28
3. Estudo de alguns projetos mecatrônicos para sistemas automotivos.....	32
3.1. Suspensão ativa “Skyhook damping”	32
3.1.1. Resumo.....	32
3.1.2. Objetivos	33
3.1.3. Revisão da literatura	33
3.1.4. Desenvolvimento do controlador para o quarter car	40
3.1.5. Modelagem da suspensão usando LMS Imagine.Lab	42
3.1.6. Resultados	43
3.1.7. Conclusão	46
3.2. Electric Power Steering (EPS)	46
3.2.1. Resumo.....	46
3.2.2. Estrutura e modelagem de um sistema EPS	47
3.2.2.1. Sensor de torque	48
3.2.2.2. Modelagem do sistema	50
3.2.2.3. Lógica de controle do EPS	52
3.2.2.3.1. Lógica de controle para redução no torque de direção.....	52
3.2.2.3.2. Lógica de controle para desempenho de retorno para o centro.....	54
3.2.2.4. EPS no LMS Imagine.Lab.....	55
3.2.3. Resultados	56
3.2.4. Conclusão	61
4. Conclusão geral	62
5. Referências bibliográficas	63

LISTAS DE FIGURAS

Figura 2.1. (a) Diagrama esquemático típico; (b) diagrama de circuito elétrico típico (c) diagrama esquemático de um sistema contendo componentes mecânicos, elétricos e hidráulicos (KARNOPP, 2012).....	17
Figura 2.2. Uma coleção de multiportas (a) Motor elétrico: torque τ , velocidade angular, ω , tensão e , corrente i ; (b) bomba hidráulica: torque τ , velocidade angular ω , pressão P e vazão Q ; (c) eixo de transmissão : torque τ , velocidades angulares ω_1 e ω_2 (d) shock absorber: força F , velocidade V_1 e V_2 ; (e) transistor: tensões e_1 e e_2 , correntes i_1 e i_2 , (f) alto-falante: tensão e , corrente i ; (g) manivela e mecanismo deslizante: torque τ , velocidade angular ω , força F , velocidade V ; (h) roda: força F , velocidade V , torque τ , velocidade angular ω ; (i) motor de corrente contínuo : torque τ , velocidade angular ω , tensões e_f e e_a , correntes i_a e i_f (KARNOPP, 2012)	19
Figura 2.3. Tetraedro de estado (KARNOPP, 2012).....	22
Figura 2.3. Motor DC :(a) Esboço do motor (b) diagrama esquemático convencional (c) representação multiporta(d) representação de multiportas com convenção de sinal. (KARNOPP, 2012)	25
Figura 2.4. Sistema parcialmente montado (KARNOPP, 2012)	26
Figura 2.5. Word bond graph para o sistema da Figura 2.4 (KARNOPP, 2012).....	26
Figura 2.6 : (a) Diagrama esquemático, (b) word bond graph (KARNOPP, 2012)	27
Figura 2.7. (a) Esboço do aparelho de ensaio: (b) diagrama de blocos mostrando fluxo dos sinais de entrada e de saída: (c) Os causal strokes adicionado à representação de multiportas. (KARNOPP, 2012)	29
Figura 3.1. Norma ISO-2631[INTERNACIONAL STANDARD - ISO 2631 - 1978 (E)]	34
Figura 3.2. Resposta em frequência do filtro HRF (Human Response Filter). (SAMUEL G.B., 2006)	35
Figura 3.8. Skyhook damping no LMS imagine.....	42
Figura 3.9. Detalhes sobre a força do atuador.....	43
Figura 3.10. Montagem Experimental de um sistema EPS. (Ji-Hoon, 2002).....	48
Figura 3.11. Montagem experimental utilizada para implementar a lógica de controle EPS (Ji-Hoon, 2002).....	49
Figura 3.12. Estrutura de um sensor de torque. (Ji-Hoon, 2002).....	49
Figura 3.13. Configuração e diagrama de corpo livre de uma coluna de direção. (Ji-Hoon, 2002)	51
Figura 3.14. Modelo simplificado de caixa de direção. (Ji-Hoon, 2002)	52
Figura 3.15. Diagrama de blocos da lógica de controle para a redução no torque de direção. (Ji-Hoon, 2002).....	53
Figura 3.16. Determinação do torque de direção de referência, dependendo (a) da velocidade do veículo e (b) do ângulo do volante. (Ji-Hoon, 2002)	54

Figura 3.17. Mapa de torque proposto em três dimensões. (Ji-Hoon, 2002)	54
Figura 3.19. Torques resultando do sistema EPS	57
Figura 3.20. Ângulo do volante X torque de assistência do EPS	58
Figura 3.21.(a) Velocidade do carro	59
Figura 3.21.(b) Esquema do EPS no LMS Imagine com velocidade crescente	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Algumas quantidades de esforço e fluxo.....	20
Tabela 2.2: Variáveis de Potência e de Energia para sistemas mecânicos translacionais	23
Tabela 2.3: Variáveis de Potência e de Energia para sistemas elétricos.....	23

Abstract

Mechatronics systems have the potential to revolutionize many aspects of the automotive sector. The design of a mechatronic system provides a better comfort, safety, to mention only those that are of our interest in this work. The aim of this work is to provide a comprehensive survey of the enhancement brought by the mechatronic system over a mechanical one on the matter of comfort and safety. To do so, two systems were depicted in this paper: the Electric Power Steering (EPS) and the active suspension "Skyhook damping". For both, properties were investigated, simplified mathematical and physical model were presented and using LMS Amesim.Lab it was possible to assemble the electrical, mechanical and hydraulic (or pneumatic) system as a whole and to realize simulations showing in fact the improvements achieved.

Resumo

Sistemas mecatrônicos tem o potencial de revolucionar muitos aspectos do setor automotivo. O projeto de um sistema mecatrônico proporciona melhorias no conforto, na segurança, para citar apenas aqueles que são de nosso interesse neste trabalho. O objetivo deste trabalho é fornecer um amplo exame da melhoria que traz o sistema mecatrônico comparado ao sistema mecânico sobre a questão de conforto e segurança. Para isso, dois sistemas foram descritos: direção assistida eléctrica (Electric Power Steering - EPS) e a suspensão ativa "Skyhook damping". Para ambos, foram investigadas propriedades, os modelos matemáticos e físicos simplificados foram apresentados e com auxílio do software LMS Amesim.Lab foi possível a modelagem destes sistemas montando o sistema eléctrico, mecânico e hidráulico (ou pneumático) como um todo e realizar simulações para mostrar, de facto, as melhorias conseguidas.

0. Introdução

Desde o final do século XX, a eletricidade e a eletrônica invadiram nossas vidas diárias (robôs elétricos, computadores, telefones, etc.). Cada vez mais presentes em objetos do cotidiano, essas disciplinas estão investindo com uma intensidade crescente na indústria automobilística. Se a mutação nesta área foi bastante lenta no início, agora é acelerada, impulsionada por restrições regulatórias das leis do mercado. A eletricidade e a eletrônica automotiva já fizeram um lugar importante no veículo e abriram a porta para mecatrônica (SCHÖNER, 2004).

O tipo de sistema a ser estudado neste trabalho pode ser descrito pelo termo mecatrônico, que implica que enquanto os elementos do sistema são em geral mecânicos, um controle eletrônico será incluído para a concepção de um sistema controlado por computador. O Projeto Mecatrônico é o projeto integrado de um sistema mecânico e seu sistema de controle (van Amerongen, 2003). Nesse sentido, as ferramentas de simulação que auxiliam o engenheiro na projeção de sistemas mecatrônicos devem permitir:

- A modelagem dinâmica do sistema (tais como máquinas, veículos, manipuladores robóticos, entre outros)
- O projeto do sistema de controle (verificação do posicionamento dos sensores/atuadores, avaliação da estabilidade, geração do algoritmo de controle, entre outros)
- A avaliação do sistema ativo (avaliação do desempenho, problemas com a implementação em tempo real, entre outros)

É crucial que a dinâmica de sistemas, que trocam potência e energia de várias formas, seja cuidadosamente entendida. Portanto, métodos para a modelagem de sistemas reais serão apresentados, formas de análise dos sistemas, a fim de dar uma luz sobre o comportamento do sistema, serão mostradas, e técnicas para a utilização de computadores para simular a resposta dinâmica do sistema aos estímulos externos serão desenvolvidas.

Antes de iniciar o estudo de sistemas automotivos, vale a pena refletir um momento sobre a natureza da disciplina que é usualmente chamada “*Dinâmica do Sistema*” na engenharia. A palavra sistema é usado com tanta frequência e tão vagamente para descrever uma variedade de conceitos que é difícil dar uma definição significativa da palavra ou até mesmo para ver o conceito básico que une seus diferentes significados (KARNOPP, 2012).

Quando a palavra sistema for evocada neste trabalho duas hipóteses básicas serão levantadas:

1. O sistema é assumido ser uma entidade separável do resto do universo (o ambiente do sistema) por meio de um limite físico ou conceptual. Um animal, por exemplo, pode ser pensado como um sistema que reage com seu ambiente (umidade do ar, por exemplo) e que troca energia e informações com este. Neste caso, o limite é físico ou espacial. Um sistema de controle aéreo, no entanto, é um sistema complexo. O ambiente do sistema, além de ser constituído por um ambiente físico, inclui as flutuações da procura de tráfego aéreo, que se origina de decisões humanas sobre a viagem e o transporte de mercadorias. O elemento unificador desses dois diferentes sistemas é a capacidade de decidir o que pertence ao sistema e que representa um distúrbio externo ou comando originário de fora do sistema.
2. Um sistema é constituído por partes que interagem. Em um animal Reconhecemos órgãos com funções específicas, os nervos que transmitem a informação, por exemplo. O sistema de controle aéreo é composto de pessoas e máquinas com ligações de comunicação. Claramente, a divisão de um sistema em suas partes é algo que requer habilidade e arte, já que a maioria dos sistemas poderia ser dividida em muitas partes cuja análise seja em grande parte inundada com detalhes irrelevantes.

Na engenharia, como, aliás, em todos os outros tipos de esforço humano, tarefas associadas com projetos ou operações de um sistema são divididas em partes que podem ser trabalhados de forma isolada (KARNOPP, 2012). Numa unidade de alimentação, por exemplo, o gerador, bombas de água, turbina, caldeira e alimentos para animais são tipicamente concebido por grupos separados. Além disso, a transferência de calor, análise de tensão, dinâmica de fluidos e estudos elétricos são feitos por subconjuntos destes grupos.

Neste trabalho, a ênfase principal será em estudar os aspectos de comportamento de sistemas automotivos distinto dos aspectos dos componentes destes. Isto requer um conhecimento dos componentes de sistemas de interesse e, portanto, de algum conhecimento em determinadas áreas da engenharia que são ensinadas e, muitas vezes, até mesmo praticado em esplêndido isolamento de outras áreas. É possível, e talvez até mesmo comum, para um engenheiro de passar a maior parte de sua carreira profissional em apenas uma dessas disciplinas, apesar do fato de que bem poucos projetos de engenharia se atêm em uma única disciplina. Engenheiros de sistemas, no entanto, deve ter um conhecimento razoável de várias ciências de engenharia, bem como conhecimentos pertinentes do estudo de sistemas em si. É nesse sentido que a mecatrônica, que utiliza as tecnologias de mecânica, eletrônica, electrónica e a tecnologia da informação para fornecer produtos, será indispensável para a compreensão e o estudo dos

exemplos de projeto multidisciplinar de sistemas automotivos que foram escolhidos para este trabalho.

Embora muitos sistemas possam ser projetados com sucesso levando em conta somente o seu comportamento em regime estacionário (sistema estática) em que as variáveis do sistema são assumidas constantes no tempo, neste trabalho a preocupação principal será com sistemas dinâmicos, isto é, os sistemas cujo comportamento em função do tempo é importante. Tomando o exemplo de uma aeronave de transporte que vai passar a maior parte de seu tempo de voo a uma velocidade quase constante, a economia de combustível em velocidade constante é importante. Para a mesma aeronave, a tensão nas longarinas das asas durante o voo constante é provavelmente menos importante do que a tensão variando com o tempo durante o voo através do ar turbulento, durante manobras de emergência, ou durante pousos difíceis. Ao estudar a economia de combustível da aeronave, uma análise do sistema estático pode ser suficiente. Para previsão de tensão, uma análise do sistema dinâmico seria necessária.

É claro que nenhum sistema pode operar em um estado verdadeiramente estático ou estável, pois tanto as lentas mudanças evolutivas no sistema e os efeitos transitórios de curta duração associados, por exemplo, com inicialização e desligamento são importantes. Apesar da importância da análise em regime estacionário no estudo de um projeto, a ênfase será em análise de sistemas dinâmicos, que embora mais complexa do que a análise estática são de uma extrema importância, já que as decisões baseadas em análises estáticas podem ser enganosas. Sistemas nunca podem realmente alcançar um estado estável devido a perturbações externas ou instabilidades que aparecem quando as dinâmicas do sistema são levadas em conta (KARNOPP, 2012). Além disso, os sistemas de todos os tipos podem apresentar um comportamento contraditório quando considerado estaticamente. Manifestamente, uma boa compreensão da resposta dinâmica é fundamental para o projeto de um controlador para sistemas mecatrônicos.

Tomamos, neste trabalho, o sistema de direção do automóvel, por ser um dos subsistemas principais para o funcionamento do veículo, como exemplo. Comparamos o sistema de direção hidráulica e o EPS (Electric Power Steering) que ambos devem reduzir o esforço do condutor durante as manobras de troca de direção. Devido ao fato que o EPS depende do atrito entre o pneu e estrada para fornecer a quantidade de torque necessária para auxiliar o condutor, manter o contato pneu-estrada é crucial para um melhor aproveitamento de suas qualidades. É nesse sentido que começaremos por apresentar uma suspensão ativa que tem por objetivo

principal controlar os movimentos verticais das rodas permitindo assim que se mantenha este contato sem o qual o EPS não seria bem explorado.

Para a modelagem e simulação de sistemas mecatrônicos como o EPS, ferramentas de simulação multidisciplinar são obrigatórios. No entanto, poucas ferramentas podem cumprir este requisito, uma vez que as ferramentas comerciais mais disponíveis são altamente dedicadas a uma única área de engenharia. Na verdade, ainda há lacunas entre os softwares de simulação utilizados para avaliação de sistemas mecânicos e os softwares utilizados para o projeto do controlador (van Amerongen, 2003). Softwares de simulação 3D são usados para elementos finitos e pacotes de múltiplos corpos para avaliar as propriedades dinâmicas de sistemas mecânicos. Estes modelos podem conter um grande número de graus de liberdade. Por isso, é apenas depois de reduzir a ordem dos modelos que estes modelos podem ser utilizados para a concepção de controle do sistema.

Ferramentas multifísicas baseadas em teoria dos *Bond Graph*, como LMS Imagine.Lab AMESim, permitem a modelagem física em vários domínios físicos. Os componentes do modelo são descritos por modelos analíticos representativos do comportamento pneumático, hidráulico, eléctrico ou mecânico do sistema permitindo assim a modelagem e simulação dos sistemas mecatrônicos em estudo neste trabalho.

1. Objetivos

- Desenvolvimento de estratégias de controle de um sistema veicular para melhoria do conforto, da segurança e da dirigibilidade deste;
- Modelagem e simulação do sistema com e sem algoritmo de controle em LMS Amesim.Lab.
- Avaliação do conforto, da segurança e da dirigibilidade do sistema veicular com e sem algoritmos de controle;
- Conclusão sobre as contribuições da mecatrônica na realização do projeto do sistema escolhido para estudo.

2. Revisão da teoria

2.1. Modelos de sistemas

A ideia central envolvida no estudo da dinâmica de sistemas reais é a de modelos de sistemas. Modelos de sistemas são construções simplificadas, abstratas usadas para prever o comportamento do sistema real (KATSUHIKO O., 2011).

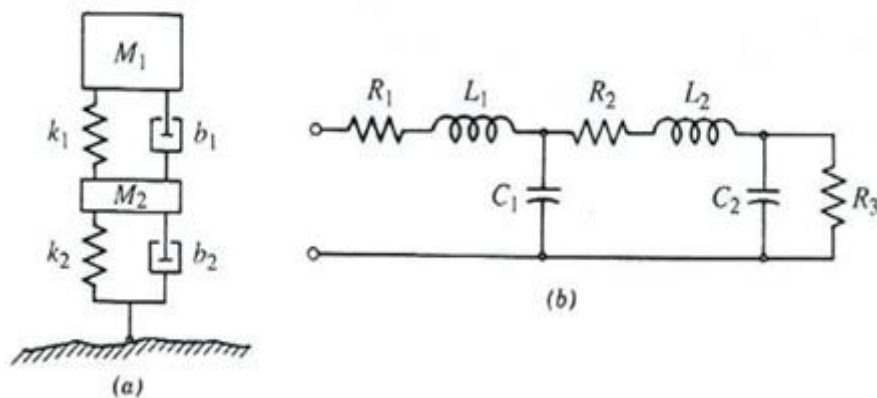
A principal característica destes modelos é que algumas, nem todas, características do sistema real são refletidas no modelo. Em um modelo de aeronave em túnel de vento, por exemplo, nenhuma tentativa é feita para reproduzir a cor ou o arranjo de assento do interior da aeronave real. Engenheiros aeronáuticos assumem que alguns aspectos de uma embarcação de verdade não são importantes na determinação das forças aerodinâmicas sobre este e, assim, o modelo contém apenas os aspectos do sistema real que se supõem ser importantes para as características em estudo.

Neste trabalho, outro tipo de modelo muitas vezes chamado de modelo matemático é considerado. Embora este tipo de modelo possa parecer muito mais abstrato do que o físico, há fortes semelhanças entre ambos. A modelagem matemática de um sistema dinâmico é um conjunto de equações que representam a dinâmica do sistema com precisão ou, pelo menos, de forma bastante aceitável (KATSUHIKO O., 2011). É importante salientar que para um dado sistema é possível mais de um modelo matemático dependendo da perspectiva que se considere. Dependendo do sistema que é alvo de interesse e das circunstâncias particulares, um modelo matemático seria mais adequado do que outro. Como um modelo deve ser uma simplificação da realidade, é exigida toda uma arte para a construção de modelos. Um modelo extremamente complexo e detalhado pode conter parâmetros praticamente impossíveis de estimar, pode ser praticamente impossível analisar e pode nubl原因 resultados importantes de uma profusão de detalhes irrelevantes se conseguirem analisar este. Do outro lado, um modelo simplificado demais não será capaz de exibir efeitos importantes. É importante, então, perceber que nenhum sistema pode ser modelado exatamente como o sistema real e que qualquer projetista de sistema competente precisa ter um processo de construção de uma variedade de modelos de sistemas de complexidade variável, de modo a encontrar o modelo mais simples capaz de responder às perguntas sobre o sistema em estudo.

A dinâmica de muitos sistemas sejam eles mecânicos, elétricos, térmicos, econômicos, biológicos etc., podem ser descrita em termos de equações diferenciais. Tais equações diferenciais podem ser obtidas utilizando-se as leis físicas que governam um sistema em

particular, como por exemplo, as leis de Newton para os sistemas mecânicos e as leis de Kirchhoff para os sistemas elétricos. É crucial lembrar que a obtenção de um modelo matemático razoável é a parte mais importante de toda a análise (KATSUHIKO O., 2011).

Modelos de sistema serão construídos utilizando uma notação uniforme para todos os tipos de sistemas físicos. É um fato notável que, aparentemente, os modelos baseados em diversos ramos da engenharia podem ser expressos utilizando a notação de **Bond Graphs** com base em energia e fluxo de informações. Utilizando a linguagem de *Bond Graphs*, podem-se construir modelos de sistemas elétricos, magnéticos, mecânicos, hidráulicos, pneumáticos, térmica, e outros, utilizando apenas um conjunto pequeno de elementos ideais. Historicamente, os esquemas para a representação de modelos de sistemas dinâmicos foram desenvolvidos separadamente para cada tipo de sistema. Por exemplo, as partes a e b da Figura 2.1, representam dois modelos típicos. Para sistemas mistos, tais como o mostrado na Figura 2.1.c, uma linguagem universal, tais como *Bond Graphs* é necessária, a fim de exibir a estrutura essencial do modelo do sistema.



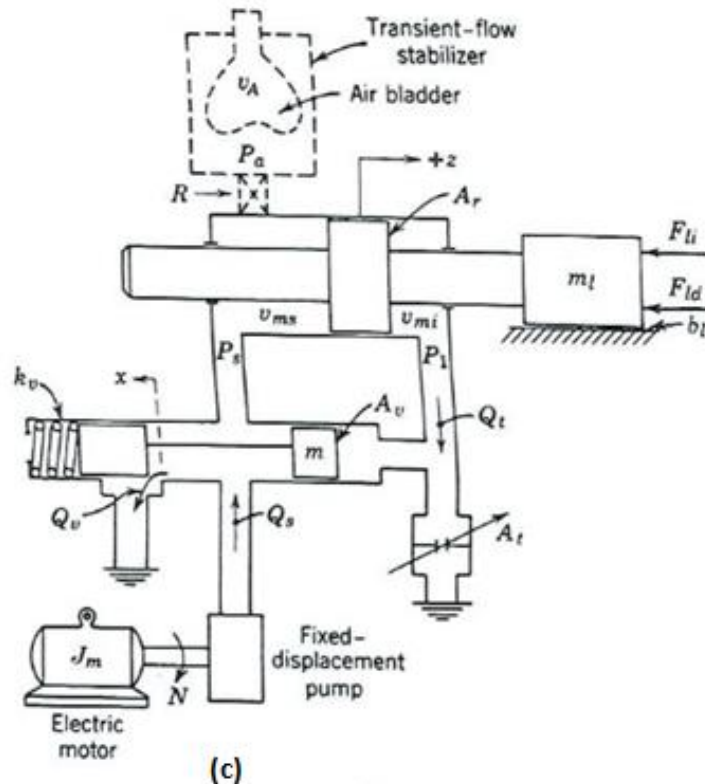


Figura 2.1. (a) Diagrama esquemático típico; (b) diagrama de circuito elétrico típico (c) diagrama esquemático de um sistema contendo componentes mecânicos, elétricos e hidráulicos (KARNOPP, 2012)

Para modelar um sistema, é necessário em primeiro lugar quebrar este em partes menores que podem ser modelados e talvez estudados experimentalmente e, em seguida, montar o modelo do sistema a partir das partes (KARNOPP, 2012)

Neste trabalho, as partes principais de um sistema serão chamadas de *subsistemas* e as partes primitivas dos subsistemas serão chamadas *componentes*. É claro que a hierarquia de componentes, subsistemas e sistemas nunca pode ser absoluta, uma vez que mesmo a parte mais primitiva de um sistema pode ser modelada com tantos detalhes que seria um subsistema complexo. No entanto, em muitas aplicações de engenharia, os subsistemas e componentes do sistema são bastante óbvios.

Basicamente, um subsistema é uma parte de um sistema que será modelado como um sistema em si, isto é, o subsistema deverá ser dividido em componentes que interagem. Um componente, no entanto, é modelado como uma unidade e não é considerado como composto de partes mais simples. É necessário saber como os componentes interagem entre si

e ter uma caracterização dos componentes, mas de outra forma um componente é tratada como uma "**caixa preta**", sem qualquer necessidade de saber por que ele age do jeito que o faz.

2.2. Sistemas Multiportas e Bond Graphs

Neste ponto, os primeiros passos para o desenvolvimento de técnicas de modelagem de sistema serão apresentados na ordem seguinte:

- Em primeiro lugar, subsistemas maiores são identificados, e os meios pelos quais estes estão interligados são estudados.
- O fato de que sistemas físicos que interagem devem transmitir energia é usado para unificar a descrição dos subsistemas interligados.
- A classificação uniforme das variáveis associadas com a potência e energia é estabelecida.
- Os **Bond Graphs** que mostram a interligação dos subsistemas são introduzidos.

Finalmente, as noções de entradas, saídas, e os fluxos de sinais puros são discutidas.

2.2.1. Engenharia multiportas

Na figura 2.2 uma coleção representativa de subsistemas ou componentes de sistemas de engenharia é mostrada. Embora os subsistemas esboçados sejam bastante elementares, eles servem para introduzir o conceito de engenharia multiporta.

Uma inspeção da Figura 2.2 revela que um número de variáveis foram colocados nos subsistemas. Estas variáveis são torques, velocidades angulares, forças, velocidades, tensões, correntes, pressões e vazão. As variáveis ocorrem em pares associados com pontos em que os subsistemas podem ser acoplados com outros subsistemas, para formar um sistema. Seria possível, por exemplo, acoplar o eixo do motor eléctrico (a) a uma das extremidades do eixo de transmissão (c) e o eixo do motor hidráulico (b) à outra extremidade do eixo de transmissão. Após o acoplamento, o torque e velocidade do motor seriam idênticos ao torque e à velocidade de uma das extremidades do eixo de transmissão. Da mesma forma, o torque e a velocidade da outra extremidade do eixo de transmissão seriam idênticos ao torque e à velocidade da bomba hidráulica. Se o eixo de transmissão não é rígido, as duas velocidades angulares, ω_1 e ω_2 , nas extremidades do eixo não seriam necessariamente iguais em todos os momentos.

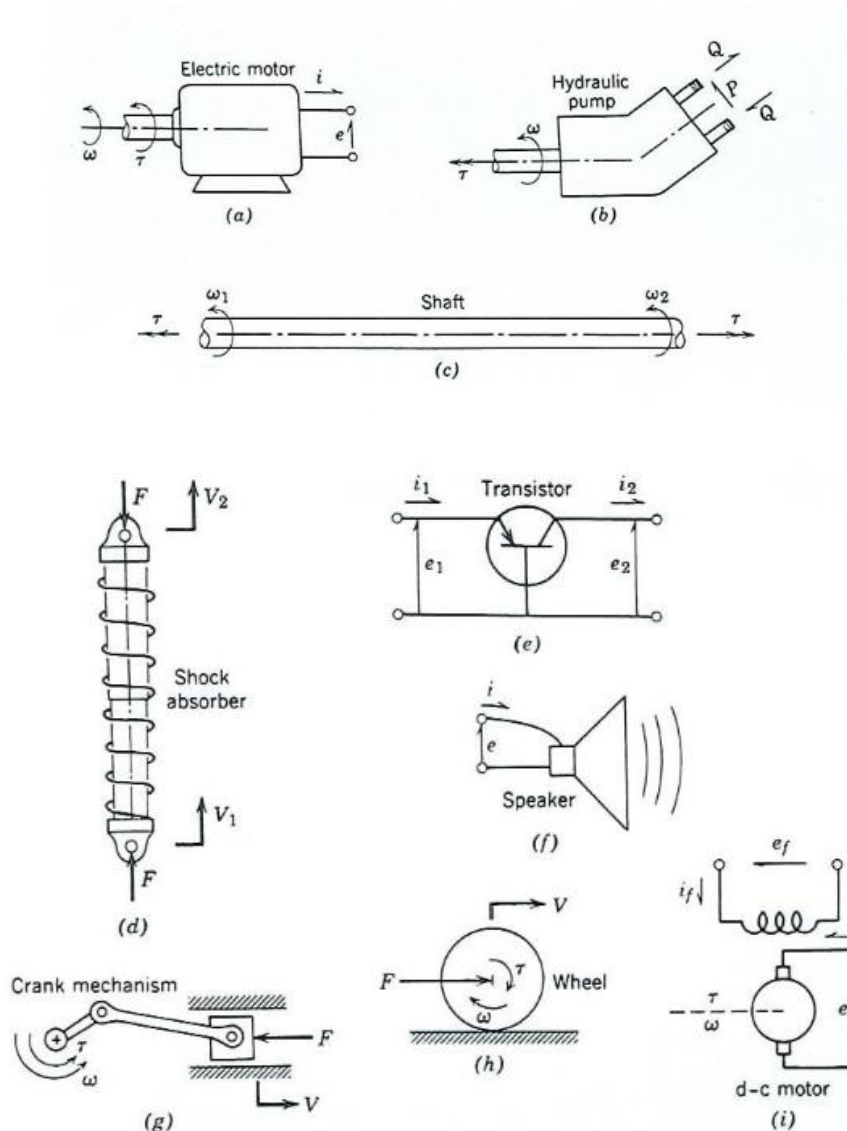


Figura 2.2. Uma coleção de multiportas (a) Motor elétrico: torque τ , velocidade angular, ω , tensão e , corrente i ; (b) bomba hidráulica: torque τ , velocidade angular ω , pressão P e vazão Q ; (c) eixo de transmissão: torque τ , velocidades angulares ω_1 e ω_2 (d) shock absorber: força F , velocidade V_1 e V_2 ; (e) transistor: tensões e_1 e e_2 , correntes i_1 e i_2 , (f) alto-falante: tensão e , corrente i ; (g) manivela e mecanismo deslizante: torque τ , velocidade angular ω , força F , velocidade V ; (h) roda: força F , velocidade V , torque τ , velocidade angular ω ; (i) motor de corrente contínua: torque τ , velocidade angular ω , tensões e_f e e_a , correntes i_a e i_f (KARNOPP, 2012)

Da mesma forma, pode-se ligar os dois terminais do transistor (e) associados e_2 e i_2 para os terminal do alto-falante (f). Após a ligação, a tensão e a corrente associadas a um par de terminais do transistor seriam idênticas à tensão e à corrente associadas aos terminais do alto-falante. Geralmente, quando dois subsistemas ou componentes são unidos fisicamente, duas

variáveis complementares são simultaneamente obrigadas a serem iguais para os dois subsistemas.

Os locais em que os subsistemas podem ser interligados são locais em que a energia pode fluir entre os subsistemas. Tais lugares são chamados de **portas**, e subsistemas físicos com uma ou mais portas são chamados **multiportas**. Um sistema com um único porta é chamado de 1-port, um sistema com duas portas é chamado de 2-port, e assim por diante. As variáveis listadas para os multiportas na Figura 2.2 e as variáveis que são forçados a ser idênticas quando dois multiportas estão ligados são chamadas de variáveis de potência, porque o produto de duas variáveis consideradas como funções do tempo fornece a potência instantânea que flui entre os dois multiportas. Por exemplo, se o motor eléctrico (Figura 2.2.a) for acoplado à bomba hidráulica (Figura 2.2.b), a Potência que flui a partir do motor para a bomba seria dada pelo produto da velocidade angular e do torque. Dado que a energia pode fluir em qualquer direção, uma convenção de sinais para as variáveis de potência será estabelecida. Do mesmo modo, a potência pode ser expressa como o produto de uma força e uma velocidade para um multiporta em que está envolvida translação mecânica, como o produto da tensão e da corrente para uma porta eléctrica, e como o produto da pressão e vazão para uma porta em que a potência hidráulica é trocado.

Já que interações de energia estão sempre presentes quando dois multiportas estão conectados, é útil classificar as diversas variáveis de potência em um esquema universal e descrever todos os tipos de multiportas em uma linguagem comum. Neste trabalho todas as variáveis de potência são chamadas de esforço ou fluxo.

Usaremos a Tabela 2.1 para mostrar as variáveis de esforço e fluxo para vários tipos de troca de energia. Como a Tabela 2.1 indica, em geral, os símbolos $e(t)$ e $f(t)$ são usados para denotar quantidades de esforço e de fluxo em função do tempo.

Tabela 2.1 Algumas quantidades de esforço e fluxo (KARNOPP, 2012)

Domínio	Esforço $e(t)$	Fluxo $f(t)$
Translação mecânica	Componente de força $F(t)$	Componente de velocidade $V(t)$
Rotação mecânica	Torque componente $\tau(t)$	Velocidade angular componente $\omega(t)$
Hidráulico	Pressão $P(t)$	Vazão $Q(t)$
Elétrico	Tensão $e(t)$	Corrente $i(t)$

O grande dilema da análise de sistema que se torna evidente quando problemas que envolvem vários domínios da energia são estudados é que é difícil estabelecer uma notação que não

entre em conflito com o uso convencional (KARNOPP, 2012). Na Tabela 2.1, por exemplo, uma força é uma quantidade de esforço, $e(t)$, apesar do uso comum da letra F que denota uma força e que poderia ser confundido com $f(t)$, que representa uma quantidade de fluxo. Estas dificuldades de notação são inconvenientes, mas não fundamentais, e não podem ser evitadas, exceto usando uma notação inteiramente nova. Por exemplo, a letra Q tem sido usada para a carga em circuitos elétricos, vazão em hidráulica e calor em termodinâmica. Neste trabalho, tanto a notação generalizada e e f e a notação física na Figura 2.2 e na Tabela 2.1 são utilizados. O contexto em que os símbolos são usados irá resolver quaisquer possíveis ambiguidades na compreensão. A potência, $P(t)$, que flui para dentro ou fora de uma porta pode ser expressa como o produto de uma variável de esforço com uma variável de fluxo, e, assim, em geral, a notação é dada pela seguinte expressão:

$$P(t) = e(t) \cdot f(t) \quad (2.1)$$

Num sistema dinâmico as variáveis de esforço e de fluxo, e, portanto a potência, flutuam no tempo. Dois outros tipos de variáveis vem a ser importante na descrição de sistemas dinâmicos. Estas variáveis, muitas vezes chamadas de variáveis de energia são o impulso $p(t)$ e o deslocamento $q(t)$ em notação generalizada. O impulso é definido como o integral do esforço no tempo:

$$p(t) \equiv \int e(t) dt \equiv p_0 + \int_{t_0}^t e(t) dt, \quad (2.2)$$

Em que tanto a integral indefinida pode ser utilizada quanto se pode definir p_0 como o impulso inicial e utilizar a integral definida de t_0 a t . Da mesma forma, uma variável de deslocamento é a integral da variável de fluxo correspondente no tempo.

$$q(t) \equiv \int f(t) dt \equiv q_0 + \int_{t_0}^t f(t) dt, \quad (2.3)$$

Mais uma vez, a segunda expressão da integral na Eq(2.3) indica que no momento t_0 o deslocamento é q_0 . Outra maneira de escrever as definições das Eqs(2.2) e (2.3), é considerando o diferencial em vez das formas integrais:

$$\frac{dp(t)}{dt} = e(t), \quad dp = e dt; \quad (2.2a)$$

$$\frac{dq(t)}{dt} = f(t), \quad dq = f dt \quad (2.3a)$$

A energia, $E(t)$, que fluiu para dentro ou fora de uma porta é a integral da potência, $P(t)$, no tempo, Assim:

$$E(t) \equiv \int P(t)dt = \int e(t)f(t)dt \quad (2.4)$$

A razão pela qual p e q são chamados de variáveis de energia é que as variáveis na Eq(2.4), edt pode ser substituído por dp ou $f dt$ por dq utilizando as Eqs. (2.2a) ou (2.3a). Assim As expressões alternativas para E são:

$$E(t) = \int e(t)dq(t) = \int f(t)dp(t) \quad (2.5)$$

Sabendo que o esforço é função do deslocamento ou que o fluxo é função do impulso, a energia pode ser expressa, não só, como função do tempo, mas também como função de uma das variáveis de energia, assim:

$$E(q) = \int e(q)dq \quad (2.5a)$$

$$E(p) = \int f(p)dp \quad (2.5b)$$

É interessante notar que os únicos tipos de variáveis que serão necessários para modelar sistemas físicos são representados pelas variáveis de potencia e de energia, e, f, p e q .

As quatro tipo de variáveis e, f, p e q são associadas com os vértices de um tetraedro (**tetraedro de estado**) como o mostra a figura 2.3. Usaremos as tabelas 2.2e 2.3 para tornar mais plausível a afirmação acima mencionada.

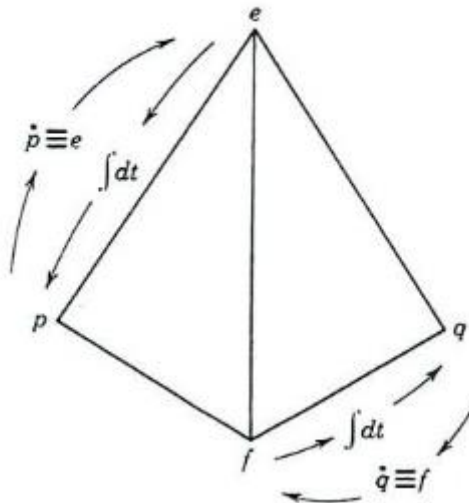


Figura 2.3. Tetraedro de estado (KARNOPP, 2012)

Tabela 2.2: Variáveis de Potência e de Energia para sistemas mecânicos translacionais (KARNOPP, 2012)

Variáveis generalizadas	Translação mecânica	Unidades (SI)
Esforço, e	Força, F	Newton (N)
Fluxo, f	Velocidade, V	Metro por segundo (m/s)
Impulso, p	Impulso, I	Newton segundo (N-s)
Deslocamento, q	Deslocamento, X	Metro (m)
Potência, P	$F(t).V(t)$	$N\ m/s$
Energia, E	$\int Fdx$, $\int VdI$	N-m

Tabela 2.3: Variáveis de Potência e de Energia para sistemas elétricos (KARNOPP, 2012)

Variáveis generalizadas	Variável elétrica	Unidades (SI)
Esforço, e	Voltagem, e	Volt (V)
Fluxo, f	Corrente, i	Ampere (A)
Impulso, p	Fluxo, λ	Volt segundo (V-s)
Deslocamento, q	Carga, q	Coulomb (C)
Potência, P	$e(t).i(t)$	Watts (W)
Energia, E	$\int edq$, $\int id\lambda$	Watts segundo (W-s)

2.2.2. Portas, bond e potência

Os dispositivos esquematizados na Figura 2.2 podem ser todos tratados como elementos multiportas com portas que podem ser ligados a outros multiportas para formar sistemas. Além disso, quando dois multiportas estão ligados, potência pode fluir através das portas ligadas e a essa potência pode ser expressa como o produto de uma variável de esforço e uma variável de fluxo, tal como indicado nas Tabelas 2.2 e 2.3

O motor de corrente contínua (motor DC) como apresentado na figura 2.3 possui três portas óbvias. As duas portas elétricas são representadas por pares de terminais de armadura e de campo, e o eixo é uma porta mecânico rotativo como esboçado na figura 2.3a. A figura 2.3b é um diagrama esquemático convencional em que o eixo mecânico é representado por uma linha tracejada, as bobinas de campo são representadas por um símbolo semelhante ao símbolo de circuito para uma indutância, e a armadura é representada por um desenho altamente esquemática de um comutador e escovas. Note-se que o diagrama esquemático não indica com detalhes o modelo interno deste subsistema ou componente. Para escrever as

equações que descrevem o motor, um analista deve decidir o quanto detalhado é necessário que seja o modelo.

A figura 2.3c representa mais um passo na simplificação da representação deste multiporta de engenharia. O nome motor DC é utilizado para representar o dispositivo, e as portas são simplesmente indicadas por linhas únicas que emanam da palavra que representa o dispositivo. Por conveniência, as variáveis de esforço e de fluxo são escritos ao lado das linhas que representam as portas. Sempre que as portas forem linhas horizontais ou verticais, é útil usar a seguinte convenção:

- Os esforços estão colocados por cima ou para o lado esquerdo das linhas de port.
- Os fluxos são colocados abaixo ou à direita das linhas de port.
- Quando linhas diagonais são utilizadas, o bom senso é requerido para a colocação do esforço e variáveis de fluxo.

Note-se que as Figuras 2.3a, b e c contêm a mesma informação, isto é, que o motor DC é um 3-port que possui como variáveis de potência: τ , ω , e_f , i_f , e_a , i_a . Na figura 2.3d uma convenção de sinais foi adicionada: A meia seta na linha de *porta* indica a direção do fluxo de potência em qualquer instante de tempo em que as variáveis de esforço e de fluxo são positivas.

Por exemplo, se ω for positivo na direção mostrada na Figura 2.3a e, se τ , é interpretado como sendo o torque no eixo do motor resultante da ligação deste a outro *multiporta*, é positivo na direção ilustrada na figura 2.3a, assim, quando τ e ω são ambos positivos (ou ambos negativos), o produto $\tau.\omega$ é positivo e representa a potência que flui a partir do motor para qualquer multiporta que seria acoplado ao eixo deste. Assim, a meia seta na Figura 2.3d aponta para fora do motor de corrente contínua. Da mesma forma, quando e_f , i_f , e_a e i_a são positivas, a energia flui para o motor vindo de qualquer multiportas que seria ligado aos terminais do campo e da armadura do motor. Assim, as meias setas associadas com as portas de campo e armadura apontam para o motor.

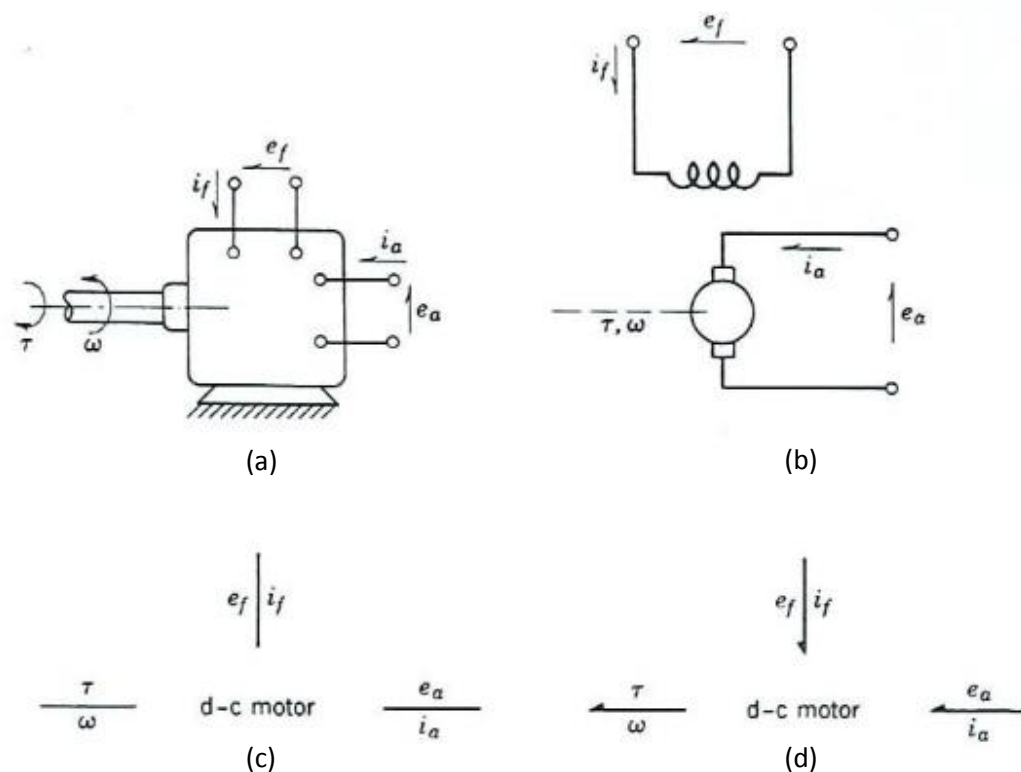


Figura 2.3. Motor DC : (a) Esboço do motor (b) diagrama esquemático convencional (c) representação multiporta (d) representação de multiportas com convenção de sinal. (KARNOPP, 2012)

Quando dois multiportas estão acoplados, de modo que as variáveis de esforço e de fluxo tornam-se idênticos, dizemos que os dois multiportas possuem um “Bond” (ligação) comum, em analogia com as ligações entre componentes de moléculas.

A figura 2.4 mostra as partes de um sistema constituído de três *multiportas* que apresenta as seguintes características :

- O motor e a bomba possuem uma velocidade angular (ω) e um torque (τ) comum quando acoplados;
- A bateria e o motor possuem uma tensão e uma corrente comum definidas nos terminais da bateria que estão conectados à armadura do motor;

Para representar este tipo de interligação de subsistema da forma que foi feita na Figura 2.3c ou d, os ports associados serão representados por uma única linha ou ligação (**Bond**) entre os multiports. O que realizamos na figura 2.5. A linha entre a bomba e o motor na Figura 2.5 indica que um *port* do motor e um *port* da bomba foram ligados, e, portanto será colocado um único torque e uma única velocidade angular que pertencem tanto à bomba quanto ao motor.

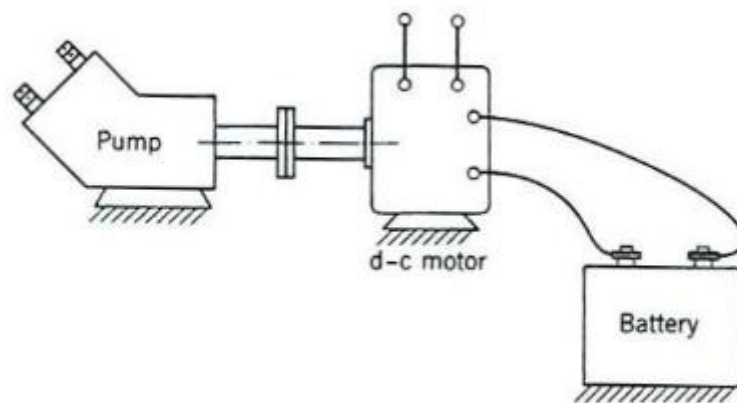


Figura 2.4. Sistema parcialmente montado (KARNOPP, 2012)

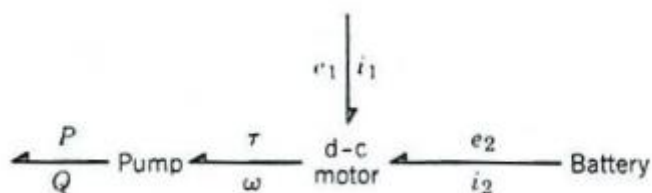


Figura 2.5. Word bond graph para o sistema da Figura 2.4 (KARNOPP, 2012)

A meia seta sobre a ligação significa que o torque e a velocidade angular são definidos de tal modo que quando o produto, $\tau \cdot \omega$, é positivo, a potência flui do motor para a bomba. Assim, as linhas associadas com multiportas isolados indicam portas ou potenciais ligações. Para multiportas interligados, uma linha representa a combinação de duas portas, ou seja, uma ligação (KARNOPP, 2012).

2.2.3. Bond Graphs

O mecanismo para o estudo de sistemas dinâmicos adotado neste trabalho é o *Bond Graphs*. Um *Bond Graphs* consiste simplesmente em subsistemas ligados entre si por linhas que representam ligações de potencia, por consequência de energia (KARNOPP, 2012), como na Figura 2.5. Quando subsistemas maiores são representados por palavras, como na Figura 2.5, o gráfico é então denominado “**Word Bond Graph**”. Esse tipo de *Bond Graph* estabelece subsistemas *multiportas*, a maneira em que os subsistemas estão ligados entre si, as variáveis de esforço e as variáveis de fluxo nas *portas* dos subsistemas, e as convenções de sinais para as trocas de energia.

O *Word Bond Graph* indica os subsistemas principais a serem considerados, e os vínculos com as variáveis de esforço e de fluxo indicados introduzem algumas variáveis que serão úteis na caracterização dos subsistemas e mais tarde na análise.

Na Figura 2.6, nota-se que as influências da posição do acelerador, da posição da articulação de embreagem e a posição do seletor de velocidades são indicadas utilizando um vínculo com uma ponta de seta cheia. Esta notação indica que a influência vindo do ambiente sobre o sistema ocorre essencialmente com um fluxo de potência nulo. No presente exemplo, o condutor do carro faz parte do ambiente do carro e pode controlar este usando o pedal do acelerador, o pedal de embreagem, e a mudança de marchas com uma energia baixa, em comparação com a força presente no *drivetrain*. Uma ligação (**Bond**) com uma seta cheia é uma *ligação ativa (Active Bond)*, e indica um fluxo de sinal com potência muito baixa. No presente caso, assume-se que os controles do carro podem ser movidos pelo motorista à vontade, e nosso modelo dinâmico não precisa preocupar-se com as forças necessárias para mover os controles. Um *Word Bond Graph* é útil para classificar as verdadeiras interações de energia das influências de sentido único de vínculo ativo (KARNOPP, 2012).

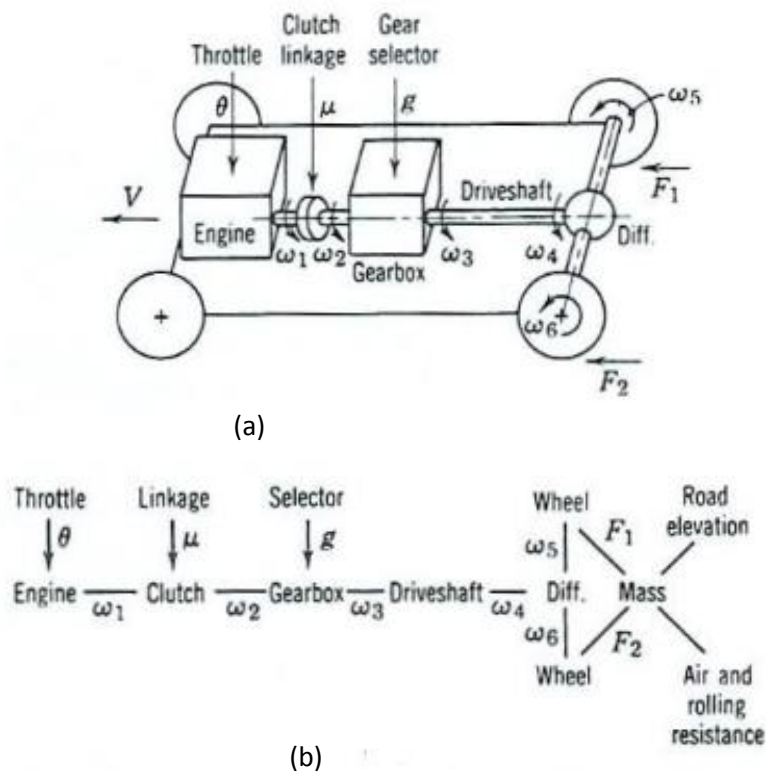


Figura 2.6 : (a) Diagrama esquemático, (b) word bond graph (KARNOPP, 2012)

A partir de um *Bond Graph* suficientemente detalhado, equações de estado podem ser derivadas utilizando técnicas padrão ou pode-se obter simulações do sistema com auxílio de

um computador. Vários programas de computador aceitam diretamente uma ampla variedade de *Bond Graph* para gerar tanto equações de estado para posteriores análises quanto previsões de resposta do sistema. Além disso, alguns tipos de análises podem ser realizados diretamente em um *Bond Graph* sem escrever as equações de estado nem uso de um computador.

2.2.4. Inputs, outputs e sinais

As características de um subsistema *Multiporta* tipicamente são determinadas por uma combinação de métodos teóricos e experimentais. Pode ser relativamente fácil de calcular o momento de inércia de um rotor, por exemplo, simplesmente conhecendo a densidade do material do qual o rotor é feito e ter um desenho da peça, mas para predizer as características da *porta* de um ventilador com bastantes detalhes por meios teóricos seria muito mais difícil do que através da medição das características deste. Na realização de experimentos em um subsistema, as noções de entrada e saída ou equivalentemente, de excitação e de resposta, surgem. Os mesmos conceitos são usados quando modelos *matemáticos* de subsistemas são montados em um modelo de sistema.

Na realização de experimentos em um *multiporta*, deve-se tomar uma decisão sobre o que deve ser feito nas *portas*, em cada *porta*, onde tanto uma variável de esforço e uma variável de fluxo existem e se pode controlar um ou outro, mas não ambas as variáveis simultaneamente (KARNOPP, 2012). Como exemplo, considere o problema de determinar as características de estado estacionário de um motor de corrente contínua, como aquele mostrado nas Figuras 2.3 - 2.5.

Figura 2.7a mostra um esboço de equipamento que pode ser utilizado para experimentar o motor. O dinamómetro é suposto ser capaz de ajustar a velocidade do motor independentemente do torque fornecido pelo motor. Esta velocidade, ω , é então, uma variável de entrada para o motor. O torque fornecido pelo motor é então medido por meio de um medidor de torque. O torque é, assim, a variável de saída do motor. Note que, em geral, não é possível ajustar o dinamómetro para ambos o torque e a velocidade. A natureza da experiência é descobrir qual o torque do motor a uma determinada velocidade.

Da mesma forma, se as tensões são fornecidas para as duas *portas* eléctricas, isto é, se as tensões são as variáveis de entrada, então o motor responde com correntes que são variáveis de saída do motor. A figura 2.7b é uma tentativa de usar linhas e setas para mostrar quais quantidades são entradas para o motor e quais são saídas. A figura 2.7b é um exemplo simples

de um diagrama de blocos, em que as linhas com setas indicam a direção do fluxo de sinais. Para um *multiporta* cada *porta* ou *Bond* tem tanto um esforço e um fluxo, e quando estes dois tipos de variáveis são representadas como sinais emparelhados, é apenas possível que um destes sinais sirva como uma entrada e a outra como uma saída.

Para saber qual do esforço e do fluxo em uma *porta* é a entrada da *multiporta*, apenas uma parte de informação deve ser fornecida às Figuras 2.3c, 2.3d ou 2.5. Isto porque basta uma das duas variáveis ser a entrada para que a outra seja a saída.

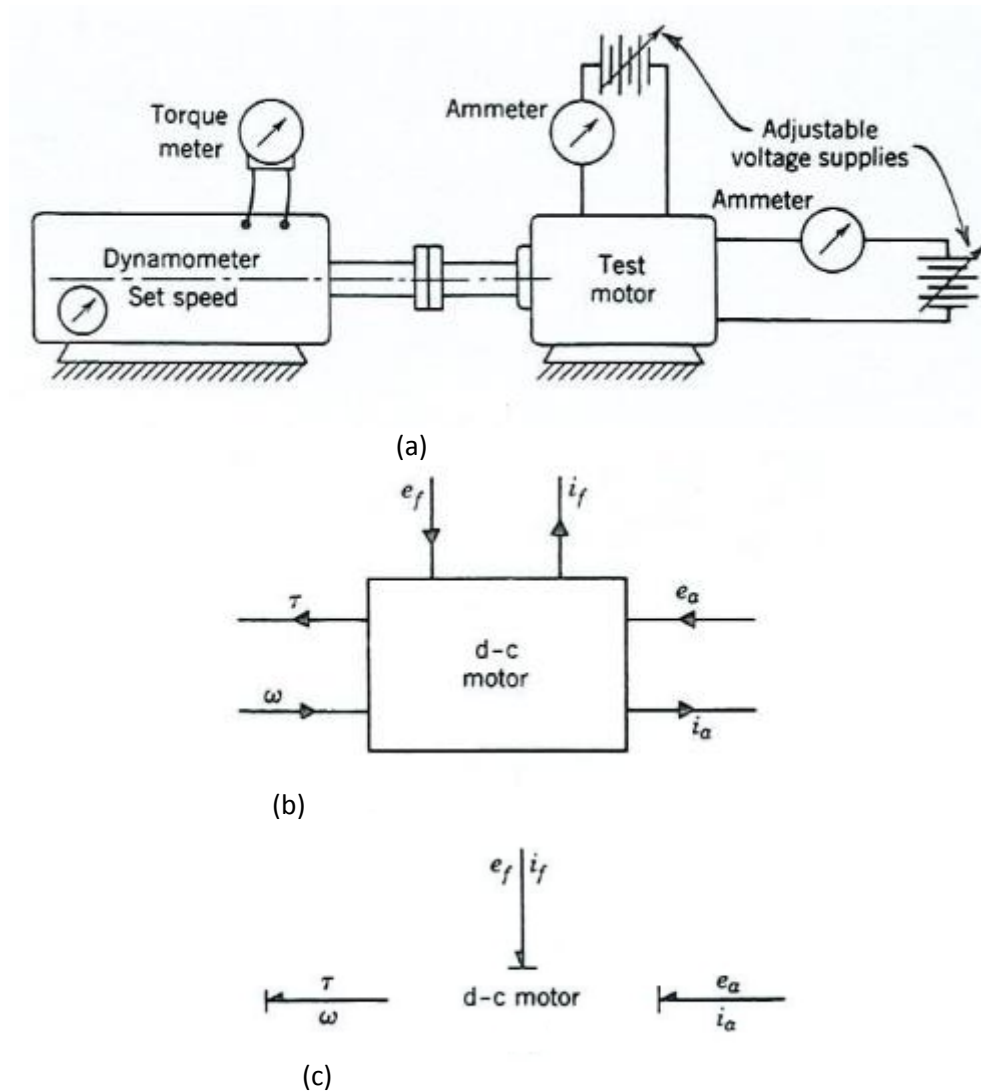


Figura 2.7. (a) Esboço do aparelho de ensaio: (b) diagrama de blocos mostrando fluxo dos sinais de entrada e de saída: (c) Os causal strokes adicionado à representação de multiportas. (KARNOPP, 2012)

Em *Bond graphs* a maneira em que as entradas e saídas são especificadas é por meio de um “causal stroke”. O *causal stroke* é uma linha curta, perpendicular que se coloca a uma das

extremidades de uma linha de porta ou de ligação (*Bond*). Ele indica a direção em que o sinal de esforço é dirigido (Implicitamente, a extremidade sem *causal stroke* é a extremidade para a qual a seta do fluxo aponta).

Finalmente, chegamos à questão de fluxo de sinal puro, ou a transferência de informação com fluxo desprezível de potência, o que foi já encontrado no exemplo da figura 2.6. Os *multiportas*, em princípio, transmitem uma quantidade de energia finita quando interligados. Isto devido ao fato de que tanto as variáveis de esforço e quanto as variáveis de fluxo existem quando dois *multiportas* são acoplados. Assim, os sistemas são interligados pela correspondência de um par de sinais representativos das variáveis de potência.

Em muitos casos, no entanto, os sistemas são concebidos de forma que apenas uma das variáveis de potência seja importante, isto é, de modo que um único sinal seja transmitido entre dois subsistemas (KARNOPP, 2012). Por exemplo, um amplificador electrónico pode ser concebido de modo que a tensão de um circuito influencia o amplificador, mas a corrente consumida pelo amplificador tem praticamente nenhum efeito sobre o circuito. Basicamente, o amplificador reage a uma voltagem, mas extrai uma potência desprezível, ao fazer isso, em comparação com o resto dos níveis de potência no circuito. Nenhuma informação pode ser realmente transmitida na potência zero, mas, em termos práticos, a informação pode ser transmitida em níveis de potência consideravelmente baixos, em comparação com os níveis de potência de outros sistemas. Todo instrumento é projetado para extrair informações de alguma variável do sistema sem perturbar seriamente o sistema no qual está ligado (KARNOPP, 2012). Um amperímetro ideal indica a corrente, sem introduzir queda de tensão, um voltímetro ideal lê uma tensão enquanto não deixa passar nenhuma corrente, um manómetro ideal lê pressão sem fluxo, um tacómetro ideal lê a velocidade angular com nenhum torque adicional, e outros semelhantes. Quando um instrumento lê uma variável de esforço ou de fluxo, mas com potência desprezível, existe uma ligação de sinal entre subsistemas, sem o efeito associado à interação potência.

O *Bond Graph*, em que cada ligação, implica a existência de ambos um sinal de esforço e um sinal de fluxo, é uma forma mais eficiente de descrever *multiportas* que são diagramas de blocos ou gráfico de fluxo de sinal. No entanto, quando o sistema é dominado por interações de sinal devidas à presença de instrumentos, amplificadores de isolamento e outros semelhantes, um sinal de esforço ou um sinal de fluxo pode ser suprimido em muitos pontos de interligação. Em tal caso, uma ligação degenera para um sinal único, e pode ser apresentado como uma ligação ativa. A notação para uma ligação ativa é idêntico ao de um

sinal num diagrama de blocos: por exemplo, $A \xrightarrow{e} B$ indica que o esforço, e , é determinado pelo subsistema de A e é uma entrada para o subsistema B . Normalmente, esta situação seria indicada por $A \xrightarrow{f} B$, em que o fluxo, f , é determinado por B e é uma entrada para A .

Quando e é mostrado como um sinal (por meio da seta cheia sobre a ligação), ou, em outras palavras, uma ligação ativa, a implicação é que o fluxo, f , tem um efeito negligenciável sobre A . Quando sistemas de controle automático são adicionados aos sistemas físicos, os sistemas de controle normalmente recebem sinais por meio de instrumentos quase ideais e afetam os sistemas através de amplificadores quase ideais. A utilização de ligações ativas para tais casos simplifica a análise dos sistemas. Note que, ao usar *Bond Graph*, sempre se assume que *multiportas* são acoplados com efeitos tanto de ida e volta de variáveis de potência, a menos que uma decisão de modelagem específica um efeito de volta insignificante.

3. Estudo de alguns projetos mecatrônicos para sistemas automotivos

Devido ao caráter multidisciplinar dos projetos mecatrônicos, para cada projeto apresentado neste trabalho, o uso do software LMS Imagine.Lab AMESim foi indispensável. LMS Imagine.Lab AMESim (anteriormente AMESim) é um software de simulação para a modelagem e análise de sistemas 1D multi-domínios. O software oferece um conjunto completo de simulação 1D para modelar e analisar sistemas multi-domínios inteligentes e prever a sua performance multidisciplinar. Os componentes do modelo são descritos usando modelos analíticos que representam o comportamento real hidráulica, pneumática, eléctrica ou mecânica do sistema.

Basicamente o LMS Imagine.Lab AMESim auxiliará estes estudos permitindo a modelagem e as simulações dos sistemas antes e depois de ter anexado um controle aos sistemas automotivos primitivos oferecendo assim uma base de comparação para se certificar da melhoria que traz o acréscimo da eletrônica e da informática nos sistemas automotivos essencialmente mecânicos.

3.1. Suspensão ativa “Skyhook damping”

3.1.1. Resumo

O objetivo do **trabalho** realizado é o de desenvolver estratégias de controle para uma suspensão ativa de veículo. Para atingir esse objetivo, foi usado o “*Quarter car*”, por causa da sua simplicidade, para simular a resposta da suspensão a diferentes perturbações (BOUAZARA, 2006). O modelo inclui elementos passivos representando o veículo, os atuadores e as diferentes leis de controle analisado.

No decorrer do trabalho, as principais estratégias utilizadas na literatura foram avaliadas a fim de salientar as vantagens e desvantagens desse modelo. Com base nesses resultados, um sistema ativo incluindo sensores de movimento de suspensão, ganhos fixos e filtros de ordem limitada foram desenvolvidos usando algoritmos **genéticos**. Os resultados obtidos mostram uma melhoria apreciável do desempenho para um sistema de *Quarter car*.

Problemática

A maioria das máquinas mecânicas está submetida a diferentes níveis de vibrações provenientes de diversas fontes. O automóvel, como todas as máquinas mecânicas, não escapa a esse fenômeno e por esse motivo que todos os automóveis são dotados de

suspensões (DONAHUE, 1998). A suspensão veicular tem por objetivo reduzir e ultimamente eliminar essas vibrações que são indesejáveis para os passageiros e para o veículo.

Visando sempre uma melhoria nesse aspecto, as suspensões veiculares tradicionais tem sido objeto de inúmeras pesquisas para aperfeiçoamento das suas performances. Nos últimos anos, vários trabalhos demonstraram que a maneira mais realista de aperfeiçoar o desempenho das suspensões modernas é acrescentando um sistema ativo. Neste trabalho, portanto, procuramos compreender melhor esse tipo de suspensão e, mais especificamente, desenvolver estratégias de controle eficazes em função de diferentes limitações relativas à área dos veículos.

3.1.2. Objetivos

O objetivo principal desta parte do trabalho é de desenvolver um sistema de controle para uma suspensão ativa veicular. Os seguintes objetivos foram determinados a fim de se alcançar as metas fixadas:

- Definir os critérios de desempenho da suspensão
- Construir um modelo analítico de uma suspensão tradicional (passiva)
- Selecionar estratégias de controle aplicáveis
- Determinar os parâmetros apropriados ou ótimos a estratégia adotada.
- Analisar os resultados obtidos para os tipos de suspensão apresentado (ativa e passiva)

3.1.3. Revisão da literatura

Imperfeição da estrada

O primeiro objetivo das suspensões veiculares é de atenuar as perturbações causadas pela imperfeição da estrada (DONAHUE, 1998). Para que a suspensão seja eficaz, é necessária a estrada sobre a qual o veículo será utilizado.

Acelerações

Durante um uso normal, um veículo sofre acelerações longitudinais e laterais. A suspensão deve atenuar os movimentos de “Pitch” e “Roll” provocados para essas acelerações (DONAHUE, 1998). Para conceber um sistema eficaz, é preciso caracterizar as acelerações às quais o veículo é sujeito.

As acelerações longitudinais são provocadas pelo condutor durante a aplicação dos gases para acelerar e durante a aplicação dos freios para desacelerar e parar. A revisão da literatura não permitiu caracterizar a aceleração longitudinal. Podemos então a hipótese que elas são restringidas a baixas frequências, pois elas são comandadas pelo condutor.

As acelerações laterais são causadas para manobras de viragem e de correção de trajetória. Como essas manobras são provocadas pelo condutor, as frequências restam limitadas e a amplitude decresce com o aumento da frequência.

Medidas de performance

- Conforto

Uma das funções principais da suspensão é de assegurar o conforto dos passageiros. A norma ISO-2631 especifica que o tempo máximo de exposição de um trabalhador às vibrações se baseando na amplitude e na frequência da aceleração vertical sofrida. A figura 3.1 foi tirada desta norma, e nos permite reparar a grande sensibilidade do homem na banda de frequência de 4 a 8 Hz.

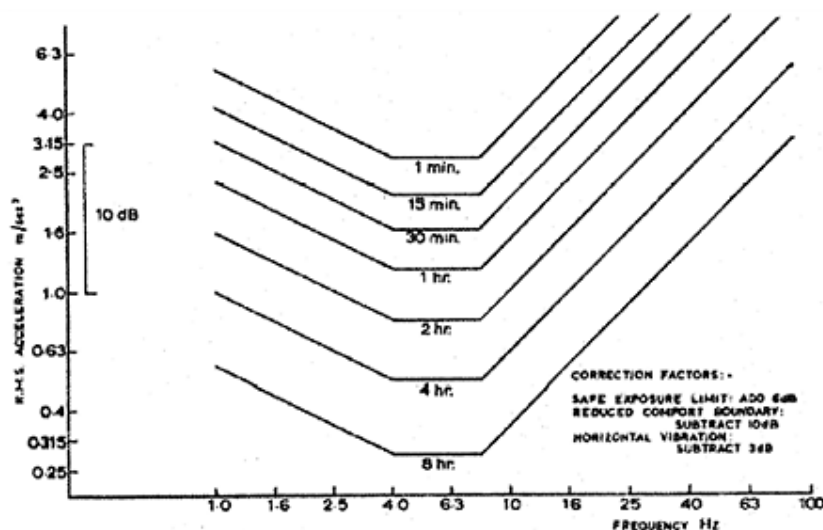


Figura 3.1. Norma ISO-2631[INTERNACIONAL STANDARD - ISO 2631 - 1978 (E)]

Com o programa TARDEC do exercito americano, um filtro nomeado HRF (Human Response Filter) foi desenvolvido para representar a sensibilidade do homem à aceleração vertical. Esse filtro é uma função de transferência entre a aceleração medida na entrada e a medida segundo a sensibilidade humana na saída.

$$T(s)_{ac} = \frac{12}{s^2 + 30.02s + 901.3}$$

Com as seguintes particularidades:

$$\begin{cases} \omega_n = 30.02 \text{ rad/s} \\ f_n = 4.78 \text{ Hz} \\ \xi = 0.5 \end{cases}$$

A figura 3.2 ilustra a resposta em frequência. Dois traços vermelhos permitem visualizar a sensibilidade do filtro na banda de 4 a 8 Hz. A sensibilidade é acentuada nesta região, de uma maneira similar à da norma ISO 2631.

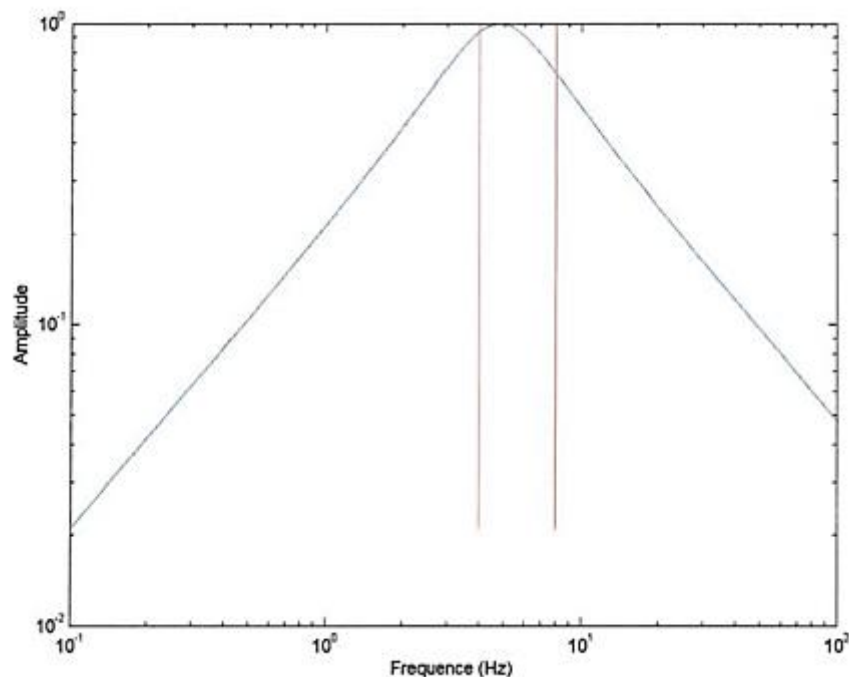


Figura 3.2. Resposta em frequência do filtro HRF (Human Response Filter). (SAMUEL G.B., 2006)

A derivada da aceleração também foi mencionada em vários trabalhos como fator de conforto do passageiro. Contrariamente à aceleração, ela deve ser calculada a posteriori derivando a aceleração medida. Para melhorar o conforto do veículo, a aceleração sofrida para o passageiro deve ser minimizada. Para os modelos em 2 ou 3 dimensões, a aceleração angular (*Pitch* e *Roll*) também deve ser minimizada.

- Dirigibilidade

A dirigibilidade representa a estabilidade de um veículo. É o pneu que gera as forças longitudinais e laterais necessárias às mudanças às correções de trajetória (CANALE, 1989). Essa força varia em função do deslizamento, do ângulo de deriva, do ângulo de curvatura e da força normal (CANALE, 1989). O deslizamento e ângulo de deriva são controlados pelo

condutor a fim de dirigir o veículo. O ângulo de curvatura varia segundo a geometria da suspensão, mas a força gerada pelo pneu varia largamente em função da força normal (SAMUEL G.B., 2006). Para assegurar uma força do pneu constante, a suspensão deve reduzir as variações da força normal aplicada sobre o pneu. Na maioria dos trabalhos de pesquisas, o pneu é modelado por uma mola linear e seu amortecimento é negligenciado. A deflexão do pneu é assim utilizada como medida representativa da dirigibilidade do veículo.

- Outros critérios

A fim de reduzir a altura do centro de gravidade e evitar o impacto das oscilações, é importante minimizar a deflexão da suspensão. No caso de uma suspensão ativa, uma força é aplicada sobre as massas suspensas e não suspensa por um atuador. A potência requerida para o atuador deve igualmente ser minimizada.

Para resumir, no caso de uma suspensão ativa, quatro critérios de desempenho diferentes devem ser minimizados para maximizar as performances:

1. Aceleração vertical sofrida pelo passageiro;
2. Deflexão do pneu;
3. Deflexão da suspensão;
4. Força do atuador.

- Estratégia de controle

A adição de elementos ativos controlados por sistemas eletrônicos permite de melhorar sensivelmente as performances da suspensão. Bem que sejam mais eficazes do que suspensão passiva, tais sistemas são mais complexos, pois um número maior de parâmetros deve ser ajustado. A concepção de tal sistema requer o desenvolvimento de uma estratégia de controle adaptada e eficaz.

Trabalhos realizados sobre suspensões ativas, como a maioria dos sistemas de controle, utilizam equações lineares e a formulação dos variáveis de estados para representar a dinâmica do sistema. Para uma entrada de controle u e uma perturbação z , as matrizes, A , B e L representam a dinâmica do sistema.

$$\begin{cases} [\dot{X}] = [A].X + [B].u + [L].z & [01] \\ [Y] = [C].X + [D].u + [F].z & [02] \end{cases}$$

Onde :

u : entrada de controle

z : perturbação devido ao perfil da estrada

- Modelo de veículo

A maioria dos artigos tratando das suspensões ativas utiliza um modelo de *Quarter-car* de veículo com dois graus de liberdades (GDL) como ilustrado na figura 3.3. Assim para esse trabalho adotamos a hipótese de um movimento vertical do veículo. A simplicidade deste modelo facilita a otimização e a análise (SAMUEL G.B., 2006).

A entrada do sistema é o movimento vertical da roda sob o pneu Z_r . O modelo é composto de duas massas distintas. A massa não suspensa m_u representa a massa do pneu. A massa suspensa m_s representa a massa do chassi suportado pela roda. O pneu é modelado por uma mola linear de constante k_t localizado entre a massa não suspensa e a roda. O amortecimento do pneu é considerado desprezível. A suspensão propriamente dita é composta de uma mola em paralelo com um amortecedor linear de constante k_s e C_s localizados entre a massa suspensa e não suspensa. A literatura contém vários exemplos de valor para os componentes do modelo, adotamos os seguintes:

$$\begin{cases} m_s = 250 \text{ kg} \\ m_u = 30 \text{ kg} \\ k_s = 20\,000 \text{ N/m} \\ k_t = 200\,000 \text{ N/m} \\ C_s = 1000 \text{ Ns/m} \end{cases}$$

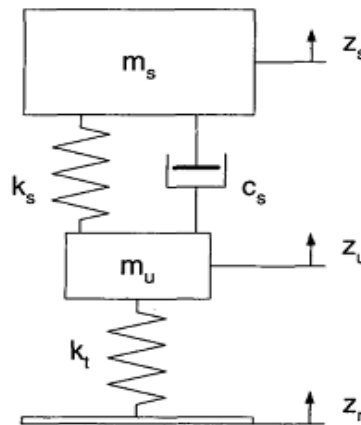


Figura 3.3. Modelo de Quarter car (SAMUEL G.B., 2006)

Modelo de Quarter car de veículo ativo

Esse modelo é similar ao do modelo passivo, mas inclui um atuador tal que ilustrado na figura 3.4. O atuador aplica uma força F_a entre as massas suspensas e não suspensas. Para formular a dinâmica do sistema em função de variável de estado, nós começamos definindo o vetor x .

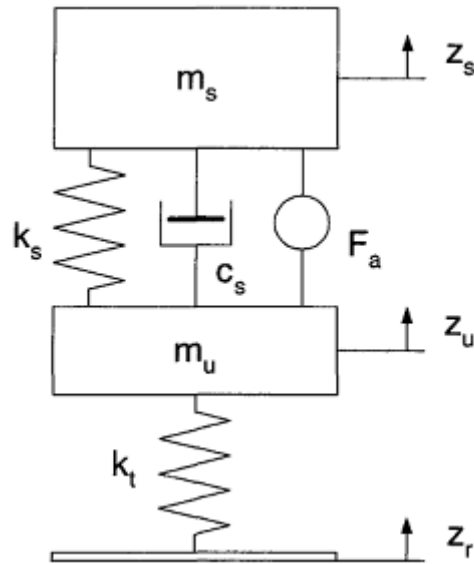


Figura 3.4. Modelo de quarter de veículo de 2 GDL com suspensão ativa. [SAMUEL G.B. 2006]

$X_1 = Z_s - Z_u$ (Deflexão da suspensão)

$X_2 = \dot{Z}_s$ (velocidade da massa suspensa)

$X_3 = Z_u - Z_r$ (deflexão do pneu)

$X_4 = \dot{Z}_u$ (Velocidade da massa não suspensa)

As forças de molas e amortecedores são dadas por:

$$F_{ks} = -k_s \cdot (Z_s - Z_u) = -k_s \cdot X_1$$

$$F_{cs} = -C_s \cdot (\dot{Z}_s - \dot{Z}_u) = -C_s \cdot (X_2 - X_4)$$

$$F_{kt} = -k_t \cdot (Z_u - Z_r) = -k_t \cdot X_3$$

Aplicando a segunda lei de Newton às duas massas do modelo, temos:

$$F_{ks} + F_{cs} + F_a = m_s \cdot \ddot{Z}_s \quad [03]$$

$$F_{kt} - F_{ks} - F_{cs} - F_a = m_u \cdot \ddot{Z}_u \quad [04]$$

Em seguida, as equações são decompostas em função do vetor de estado x , da entrada do controlador F_a e da entrada não controlada Z_r . O resultado é um sistema de 4 equações da forma:

$$[\dot{x}] = [A][x] + [B][F_a] + [L][Z_r] \quad [05]$$

Reescrevemos com as respectivas matrizes:

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & -1 \\ -\frac{k_s}{m_s} & -\frac{c_s}{m_s} & 0 & \frac{c_s}{m_s} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_s}{m_u} & \frac{c_s}{m_u} & -\frac{k_t}{m_s} & -\frac{c_s}{m_u} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{m_s} \\ 0 \\ -\frac{1}{m_u} \end{pmatrix} \cdot F_a + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot z_r$$

- Skyhook damping

O sistema “*skyhook damping*” é uma estratégia de controle simples e eficaz. O conceito é relativamente simples: o atuador simula a presença de um amortecedor entre a massa suspensa e o céu [SAMUEL G.B. 2006]. A presença desse amortecedor reduz a amplitude da ressonância da massa suspensa, o que melhora as performances.

Como atuador simula o amortecedor, a força aplicada é uma função da constante do amortecedor simulado e da velocidade da massa suspensa.

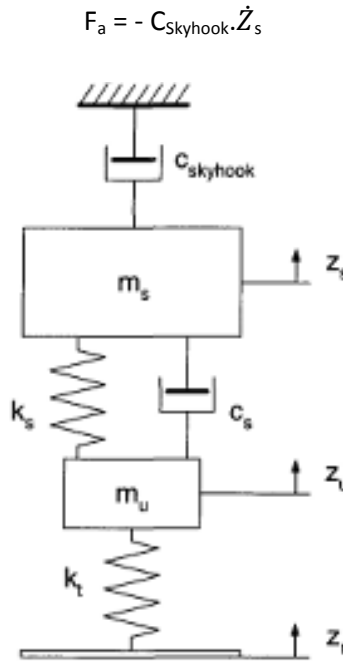


Figura 3.5. Conceito do Quarter car com Skyhook damping (SAMUEL G.B., 2006)

Substituindo o valor de F_a na equação [5], obtemos:

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & -1 \\ -\frac{k_s}{m_s} & -\frac{c_s + c_{\text{skyhook}}}{m_s} & 0 & \frac{c_s}{m_s} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_s}{m_u} & \frac{c_s + c_{\text{skyhook}}}{m_u} & -\frac{k_t}{m_s} & -\frac{c_s}{m_u} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot z_r$$

3.1.4. Desenvolvimento do controlador para o quarter car

O controle por “*skyhook damping*” é realizado de uma maneira bem simples utilizando uma única entrada, seja a velocidade da massa suspensa (HONG Li, 1999). A força aplicada pelo atuador é dada por:

$$F_a = -C_{\text{skyhook}} \cdot \dot{Z}_s$$

Adotando a formulação de variáveis de estado temos:

$$F_a = -C_{\text{skyhook}} \cdot x_2$$

O desempenho do sistema completo é avaliado em função dos diferentes critérios de performance estabelecidos acima. O índice de performance é dado pela equação :

$$J = \frac{1}{T} E \left[\int (\rho_1 \cdot \dot{x}_2^2 + \rho_2 \cdot x_1^2 + \rho_3 \cdot x_3^2) dt \right] \quad [06]$$

Onde :

$$\begin{cases} \rho_1 = 1 \\ \rho_2 = 10\,000 \\ \rho_3 = 100\,000 \end{cases}$$

Os valores de pesos (ρ_i) foram escolhidos para fornecer resultados realistas se baseando em outros trabalhos do mesmo tema. A ordem de grandeza dos pesos varia em consequência da ordem de grandeza de cada critério.

Uma vez que o sistema já foi modelado e a função performance definida, procedemos à otimização. Como tem-se um único parâmetro a otimizar, o gráfico da figura 6 é utilizado para determinar o valor do parâmetro C_{skyhook} , que fornece um valor mínima do índice de performance (J).

$$\frac{\delta J}{\delta C_{\text{skyhook}}} = 0$$

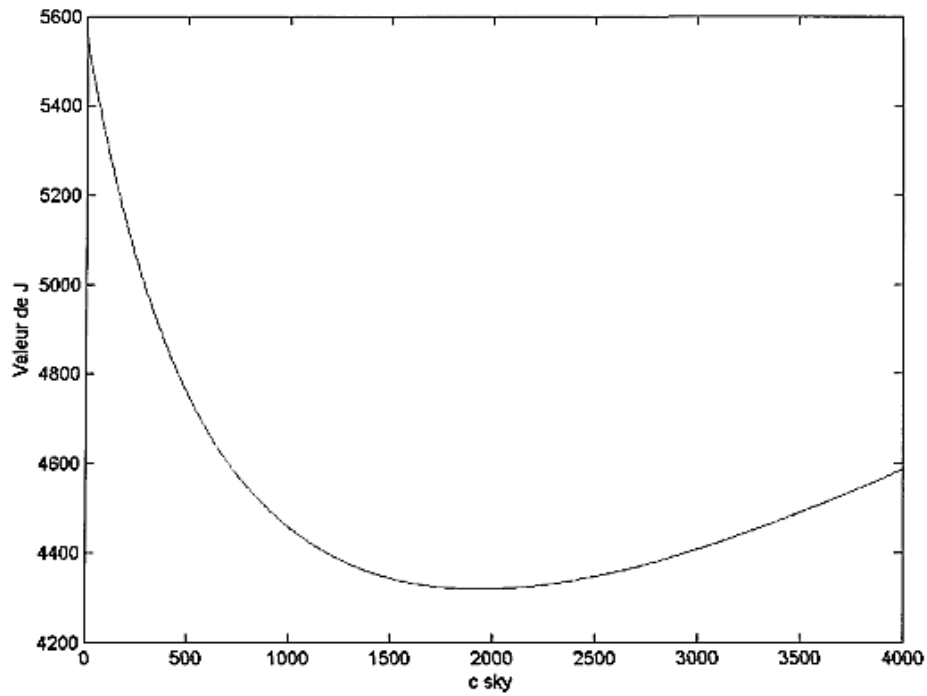


Figura 3.6. Variação do índice de performance para uma suspensão ativa do tipo skyhook.
(SAMUEL G.B., 2006)

Um valor de 2000 Ns/m é ótimo bem que uma certa faixa de valores oferece performance similar. Já que não é factível construir uma parede fixa na pratica da engenharia, a força desejada F_a deve ser criada com um atuador em paralelo com a suspensão da mola. É importante nesta consideração guardar a distinção entre a fonte que gera a força do atuador: relativa à velocidade entre a massa suspensa e não suspensa ($\dot{Z}_s - \dot{Z}_u$) e a velocidade absoluta da massa suspensa \dot{Z}_s .

Assim podemos distinguir a força F_{cs} proporcional ao amortecedor passivo C_s , e a força total F_s gerada pelo atuado da seguinte maneira:

Força do amortecedor principal

$$F_{cs} = C_s \cdot (\dot{Z}_s - \dot{Z}_u)$$

Força gerada pelo atuador

$$F_s = F_a + F_{cs} = -C_{\text{skyhook}} \cdot \dot{Z}_s - C_s \cdot (\dot{Z}_s - \dot{Z}_u)$$

A figura 3.7 apresenta o resultado final da modelagem da suspensão ativa usando *skyhook damping* como algoritmo.

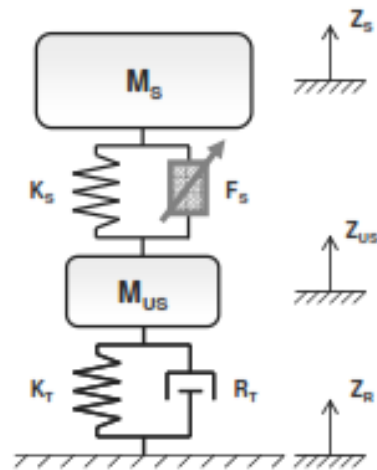


Figura 3.7. Modelagem final do skyhook damping (SAMUEL G.B., 2006)

3.1.5. Modelagem da suspensão usando LMS Imagine.Lab

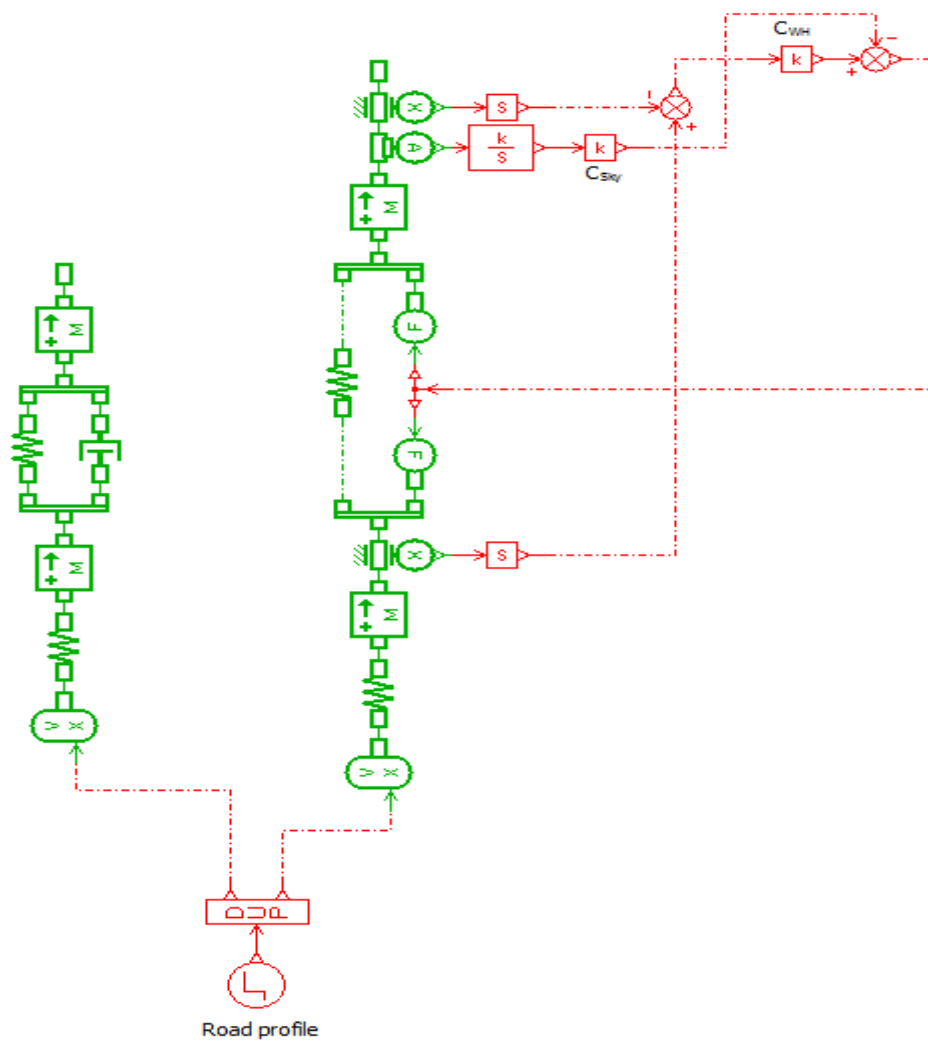


Figura 3.8. Skyhook damping no LMS imagine.

A figura 3.8 mostra o controle realizado para atenuar as vibrações causadas pelo perfil da estrada, porém não mostra a forma com que a força é gerada. Das várias possibilidades optamos para uma força de origem hidráulica pela facilidade de modelagem como o mostra a figura 3.9.

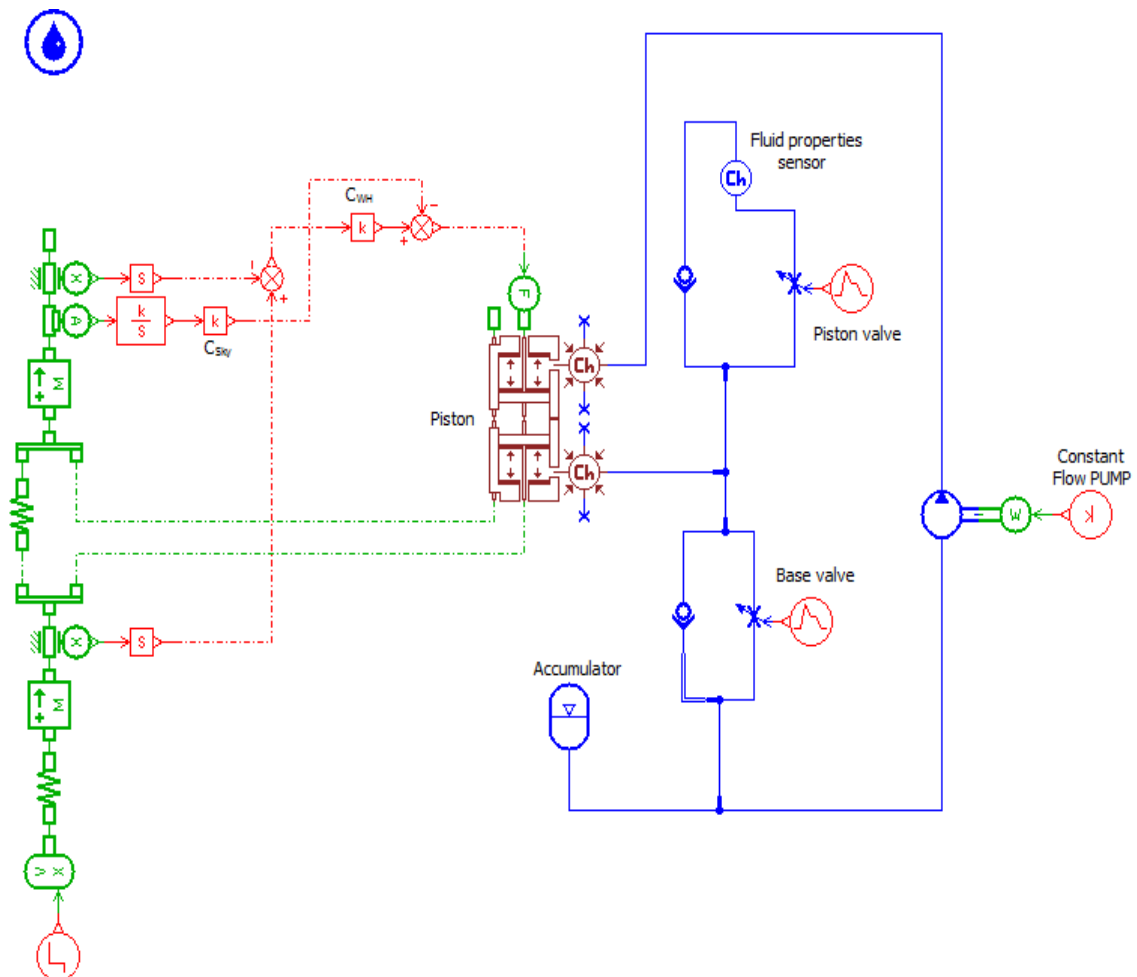
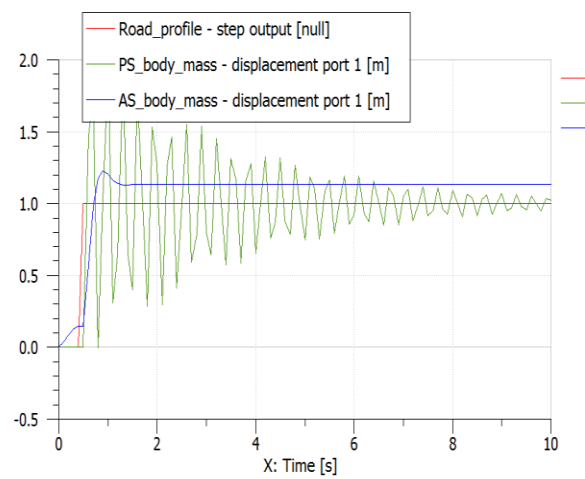
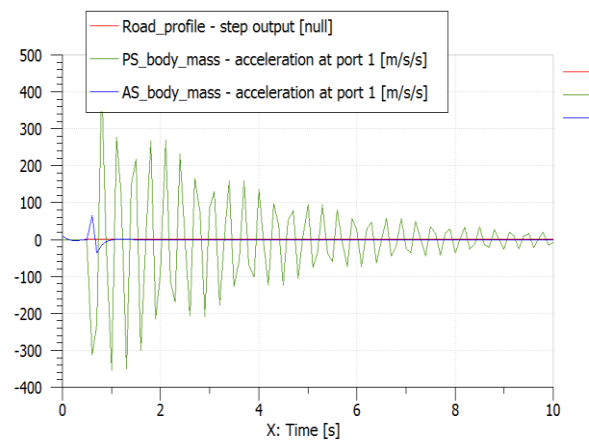
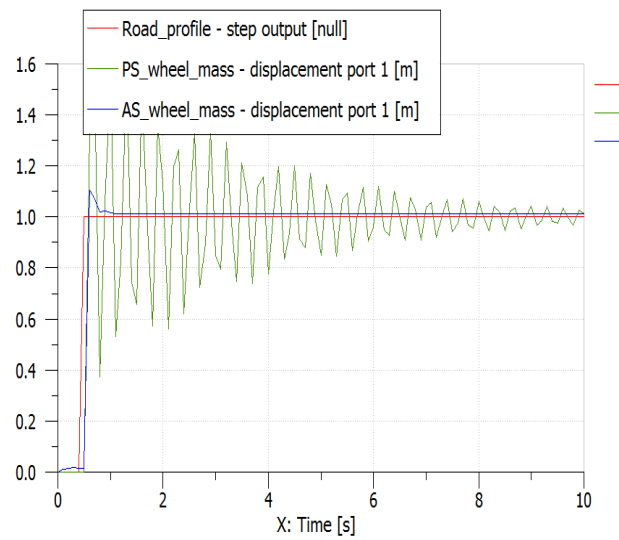


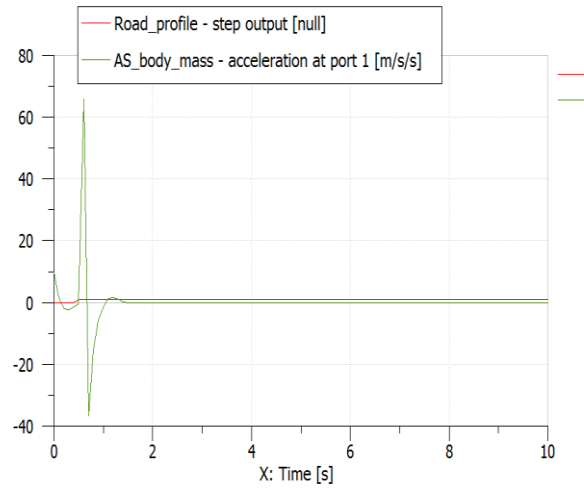
Figura 3.9. Detalhes sobre a força do atuador

3.1.6. Resultados

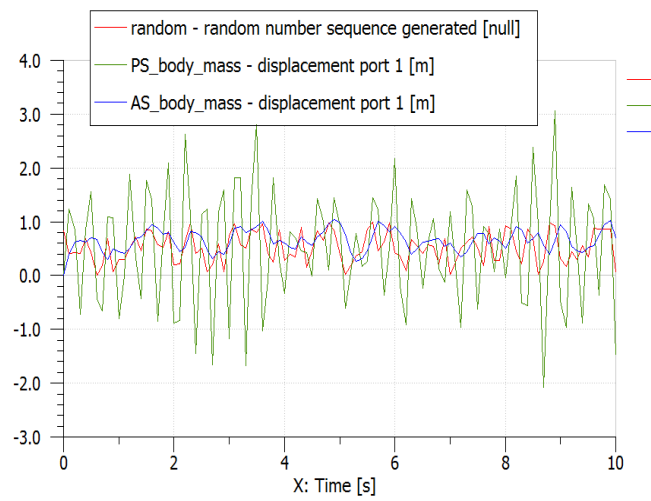
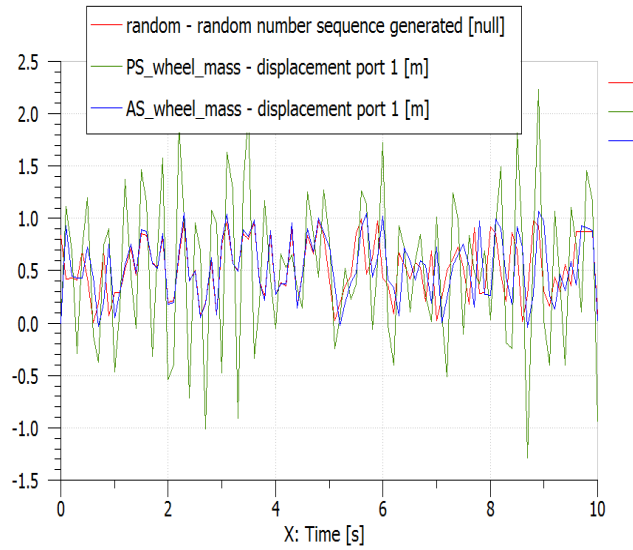
Usaremos dois perfis de estrada :

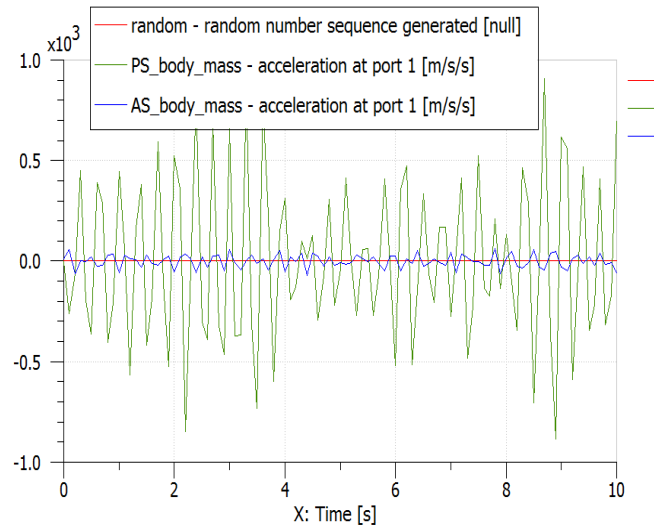
- degrau





b. Random





3.1.7. Conclusão

O objetivo principal deste primeiro exemplo do nosso trabalho foi de desenvolver uma estratégia de controle para uma suspensão ativa veicular. A revisão teórica permitiu definir critérios de performance e apresentar a estratégia de controle aplicada à suspensão ativa. O skyhook damping, uma estratégia simples que fornece bons resultados, foi a estratégia de controle desenvolvido neste trabalho e ele foi aplicado sobre um modelo de *Quarter-Car* por causa da simplicidade deste modelo e da facilidade que este proporciona na otimização e análise.

3.2. Electric Power Steering (EPS)

3.2.1. Resumo

Um sistema de direção é um dos subsistemas principais para o funcionamento do veículo. Ele gira o plano dianteiro de roda na direção desejada definida pela entrada do condutor. O EPS oferece vantagens quando comparado aos sistemas hidráulicos convencionais (Hydraulic Power Steering - HPS), reduzindo o esforço do condutor, melhorando a economia de combustível (Huaiquan Z., 2011). Além disso, algumas novas tecnologias, como a condução automática, estacionamento automático, também requer a aplicação de EPS. Quando as rodas dianteiras são viradas, um torque de restauração, que tende a voltar as rodas para a posição original surge. Embora este torque de restauração proporcione estabilidade de direção, o condutor deve fornecer um torque suficientemente grande para superar este torque para dirigir o veículo.

O sistema de direção hidráulica convencional HPS é alimentado por um motor, o que, não só diminui a eficiência do motor, mas também requer componentes hidráulicos complexos, tais

como uma bomba, uma correia de transmissão e tubos flexíveis para o seu funcionamento. Por outro lado, um sistema de EPS utiliza um motor independente para alimentação da direção, de modo que elimina a necessidade de complexas unidades hidráulicas (Ji-Hoon, 2002). Como resultado, melhora tanto a eficiência do motor e o espaço, e fornece potência da direção, mesmo quando o motor não está funcionando, Além de não causar dano ao ambiente por não utilizar fluido de trabalho.

O EPS apresenta duas funções principais:

- I. Reduzir o torque de direção e apresentar diferentes sensações na direção dependendo da velocidade. O torque de direção (ou torque do motorista) é definido como aquele que experimenta um motorista ao virar o volante. Quando um torque de assistência apropriado de um sistema de EPS é aplicado na mesma direção que a do motorista, o torque de direção exigido por um controlador de direção pode ser aliviado de maneira significativa.
- II. Melhorar o desempenho de retorno para o centro de uma roda quando, esta, está sendo virada pelo motorista. Enquanto o volante é virado e depois libertado durante as curvas, este retorna para a posição central por causa do torque auto alinhamento exercido sobre os pneus pela estrada. Já que este torque aumenta com a velocidade do veículo, em veículo com alta velocidade o volante pode apresentar um “*overshoot*” excessivo e oscilações subsequentes. O sistema EPS pode eliminar este fenômeno, fornecendo uma capacidade ativa de amortecimento e, assim, melhorar as características de returnabilidade.

3.2.2. Estrutura e modelagem de um sistema EPS

O objetivo principal deste trabalho é desenvolver um controle lógico de um sistema EPS e não o hardware. Portanto, o sistema EPS utilizado neste trabalho foi feito simplesmente modificando um sistema de direção convencional. A figura 3.10 mostra a montagem experimental.

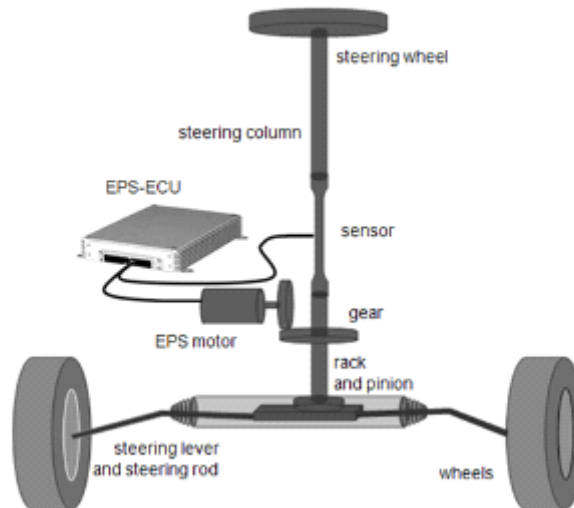


Figura 3.10. Montagem Experimental de um sistema EPS. (Ji-Hoon, 2002)

O sistema de EPS, mostrado na figura 3.10, adota a chamada “*Column type EPS system*” em que o motor de assistência ligado ao eixo de direção através de engrenagens proporciona o suplemento de torque ao eixo (Ji-Hoon, 2002). E o motor de carga ligado ao mecanismo de pinhão e cremalheira do sistema de direção fornece o torque de carga emulado incluindo o torque devido ao atrito entre o pneu e a superfície da estrada. Estes motores são controlados por unidades motoras, cujos sinais de entrada são recebidos a partir do computador, como mostra a figura 3.11, em que a lógica de controle é implementada.

Motores BLDC (brushless DC) são empregados para motores tanto de assistência que de carga. Note que motores BLDC têm as mesmas características de motores de corrente contínua (motores DC) do ponto de vista da modelagem, apesar de ter uma estrutura diferente.

3.2.2.1. Sensor de torque

A fim de medir o torque de direção T_s exercida sobre o eixo de direção pelo condutor, o dispositivo mostrado na figura 3.12 será usado. Neste sensor, as posições angulares Θ_{sw} (no volante) e Θ_{ss} (no eixo de direção) em ambas as extremidades da barra de torção, que está montado na coluna de direção, são medidos pelos codificadores ópticos 1 e 2, respectivamente.

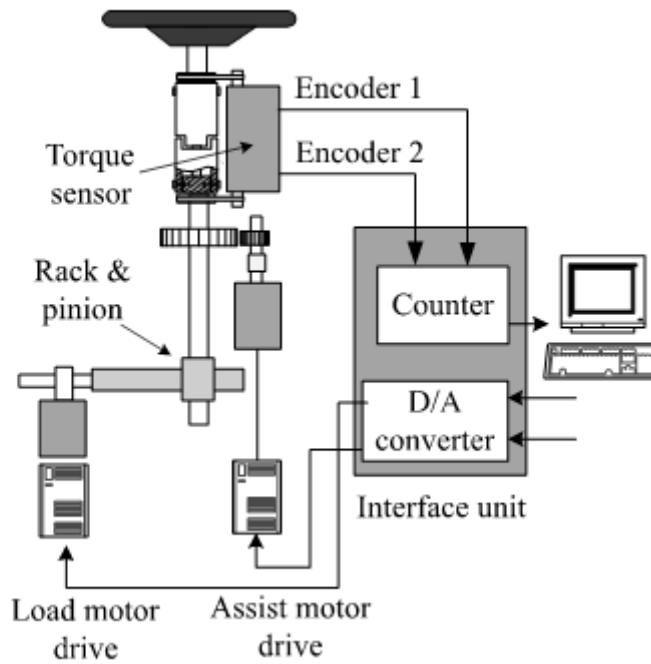


Figura 3.11. Montagem experimental utilizada para implementar a lógica de controle EPS (Ji-Hoon, 2002)

Uma vez que um deslocamento relativamente grande $\Delta\theta$ ($\Delta\theta = \theta_{sw} - \theta_{ss}$) ocorre na barra de torção delgada, e uma correia de distribuição e mecanismo de polia amplifica esse deslocamento angular, os codificadores podem medir o deslocamento angular, mesmo para um torque pequeno. O torque de direção T_s que foi aplicado sobre a coluna de direção é proporcional ao deslocamento angular como se segue:

$$T_s = k_t \cdot \Delta\theta = k_t \cdot (\theta_{sw} - \theta_{ss}), \quad [1]$$

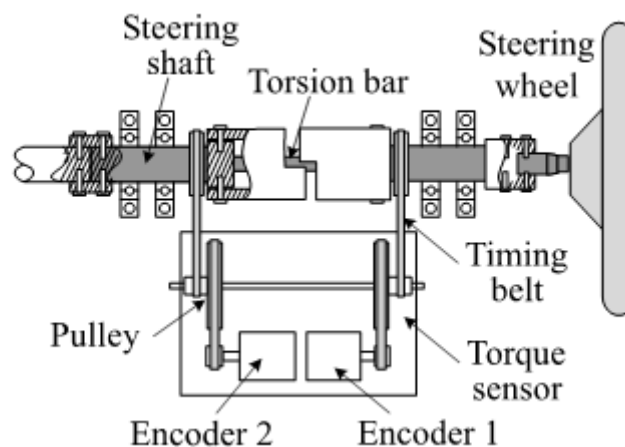


Figura 3.12. Estrutura de um sensor de torque. (Ji-Hoon, 2002)

3.2.2.2. Modelagem do sistema

Os módulos mecânicos do sistema EPS mostrados na Fig. 3.13 podem ser divididos em duas partes: a coluna de direção e o motor de assistência. Nesta figura, T_a e T_l representam o torque de assistência entregue ao eixo e o torque de carga, respetivamente. Note que o torque de carga depende principalmente do atrito entre o pneu e a estrada, da eficiência dos mecanismos de direção (engrenagens, ...), assim por diante. Embora deva se levar em conta a eficiência dos mecanismos de direção no cálculo do torque de carga real, assume-se aqui que o torque de carga é aproximadamente igual ao torque da estrada ($T_l \equiv T_r$) (Ji-Hoon, 2002).

A equação do movimento de um motor de auxilio é expressa pela relação:

$$J_m \ddot{\Theta}_m + B_m \dot{\Theta}_m = T_m - \frac{1}{N} T_a, \quad [2]$$

Onde J_m e B_m representam o momento de inércia e o coeficiente de amortecimento do motor de assistência, T_m é o torque do motor, e N é a relação de engrenagens sendo $\Theta_m = N \cdot \Theta_{ss}$. A equação eléctrica para um motor BLDC, que é idêntica à de um motor DC, é descrita pela relação :

$$R_a \cdot i_a + K_E \cdot \dot{\Theta}_m = V_a, \quad [3]$$

Onde V_a e i_a são a tensão e a corrente de armadura, R_a e K_E são a resistência da armadura e a constante da força contra eletromotriz, respectivamente. O torque do motor T_m é então dado por:

$$T_m = K_m \cdot i_a, \quad [4]$$

Onde K_m é a constante do torque do motor

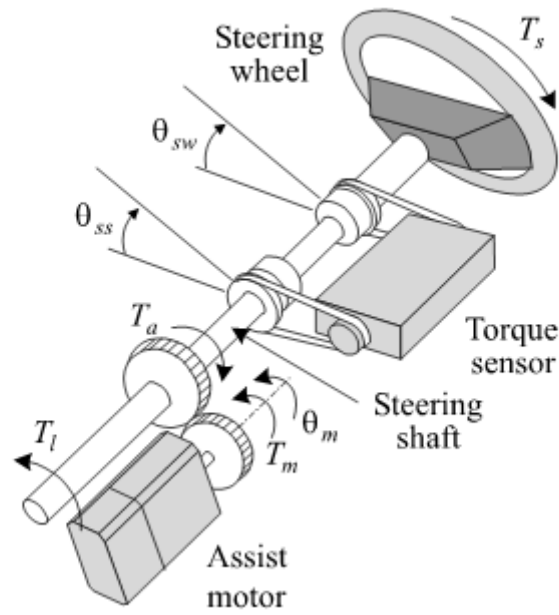


Figura 3.13. Configuração e diagrama de corpo livre de uma coluna de direção. (Ji-Hoon, 2002)

A Figura 3.14. mostra a força F_r entregue à cremalheira a partir das forças longitudinais e laterais dos pneus. O modelo de pneu Dugoff foi utilizado para determinar os componentes de F_r , a força longitudinal e lateral, que ocorrem nos pneus da seguinte maneira:

$$F_x = \frac{A.s}{1-s} K_x, \quad [5a]$$

$$F_y = \frac{A}{1-s} K_x \cdot \tan \alpha, \quad [5b]$$

Onde K_x e K_y representam a rigidez longitudinal e lateral do pneu, e A , s , α são a área do remendo (patch area) do pneu em contato com a superfície da estrada, o *slip ratio* e *slip angle*, respectivamente.

$$\text{Segue que } F_r = F_x \cdot \sin \delta + F_y \cdot \cos \delta, \quad [6]$$

Uma vez que o ângulo do volante Θ_{sw} e ângulo de deriva δ tem a relação $\Theta_{sw} = n \cdot \delta$, onde n é o "*steering ratio*", o torque da estrada T_r entregue ao eixo de direção se torna :

$$T_r = F_r \times r = \left[\frac{A.s}{1-s} K_x \cdot \sin \left(\frac{\Theta_{sw}}{n} \right) + \frac{A}{1-s} K_x \cdot \tan \alpha \cdot \cos \left(\frac{\Theta_{sw}}{n} \right) \right] \times r, \quad [7]$$

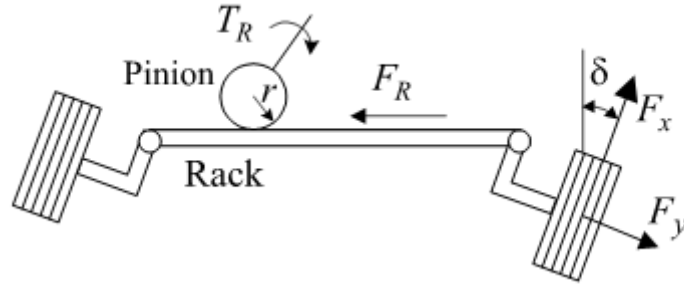


Figura 3.14. Modelo simplificado de caixa de direção. (Ji-Hoon, 2002)

3.2.2.3. Lógica de controle do EPS

Sendo que o sistema EPS possui duas funções principais, e que, estas duas funções não são obrigadas a ser ativadas ao mesmo tempo, e apenas uma função é necessário num certo instante, dois algoritmos de controle EPS serão expostas neste trabalho para cada condição de condução.

3.2.2.3.1. Lógica de controle para redução no torque de direção

Uma boa quantidade de torque de assistência deve ser fornecida pelo motor de assistência para reduzir o torque do motorista nas curvas. A figura 3.15 mostra o diagrama de blocos do sistema de EPS proposto para a geração de tal torque de assistência.

Para começar, se determina o torque de direção de referencia T_{rs} , menor do que o torque real necessário para a curva, por um mapa de torque (que determina o torque de direção de referencia T_{rs} baseado na velocidade do veículo V e no ângulo de direção do volante Θ_{sw}) com base nas condições de condução. O motor de assistência, então, gera o torque de assistência T_a apropriado para que o torque do volante T_s se aproxime de T_{rs} . É claro que o torque da carga não é mensurável em situações reais de condução, mas o torque de direção pode ser medida por um sensor de torque. Portanto, o torque de assistência é ajustado de tal maneira que o erro entre T_{rs} e T_s seja minimizado. Para se conseguir isto, o esquema de controle PI seguinte será empregado.

$$u_1 = K_1(T_{rs} - T_s) + K_2 \int (T_{rs} - T_s) dt, \quad [8]$$

Onde K_1 e K_2 são os ganhos do controlador PI. O torque de assistência T_a gerado desta maneira é entregue ao eixo de direção no mesmo sentido que o do torque de direção, aliviando assim o torque sentido pelo condutor.

Note que a velocidade do veículo desempenha um papel importante, porque o torque de direção necessário pelo condutor varia em relação a ela. Por exemplo, na condução de baixa velocidade (EX : manobras de estacionamento), é desejável que a maior parte do torque de direção seja proporcionado pelo sistema de EPS para a direção fácil. Na condução de alta velocidade, do outro lado, a sensação de direção mais sólida (e mais pesada) deve ser criada para uma condução segura.

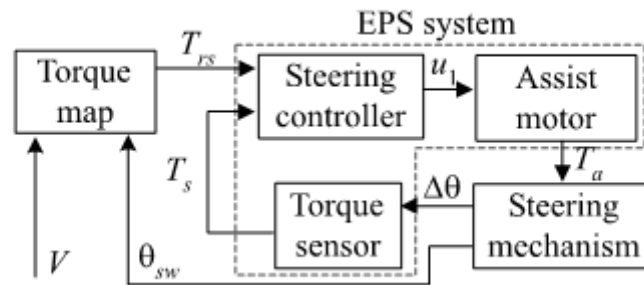


Figura 3.15. Diagrama de blocos da lógica de controle para a redução no torque de direção. (Ji-Hoon, 2002)

A figura 3.16 ilustra o esquema do mapa de torque adoptado no presente trabalho. Como mostrado na Fig. 3.16a, o torque de direção de referência quando a velocidade do veículo está nula T_0 é ajustado para um valor relativamente pequeno para a facilidade da direção a velocidades baixas, mas aumenta com a velocidade do veículo para a segurança da condução a altas velocidades. Assim, o condutor experimenta uma sensação de direção que se torna mais rígida à medida que aumenta a velocidade do veículo. No entanto, quando o veículo ultrapassa a velocidade crítica V_c , o torque de referência é saturado com o valor de $T_{s, sat}$ para impedir que este continua aumentando, de modo que facilidade da direção a velocidades elevadas possa ser assegurada. A figura 3.16b representa o torque de referência em relação ao ângulo do volante, onde o torque de direção de referência é proporcional ao ângulo do volante.

A forma tridimensional do mapa de torque proposto, que é armazenado na memória ROM na implementação real, é ilustrado na figura 8. Uma vantagem de usar um mapa de torque é que ele pode facilmente ser alterado de acordo com situações de condução ou solicitações do condutor.

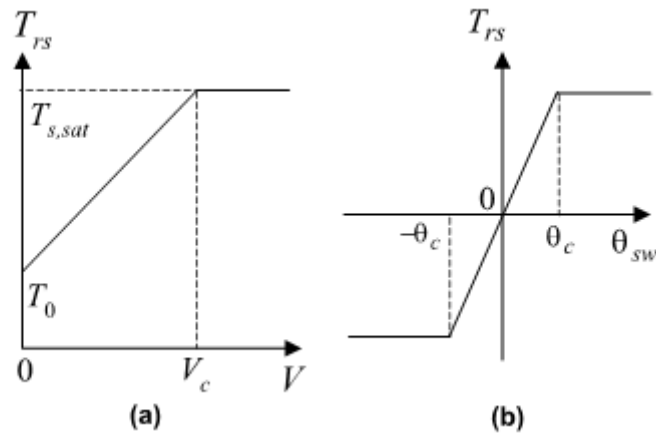


Figura 3.16. Determinação do torque de direção de referência, dependendo (a) da velocidade do veículo e (b) do ângulo do volante. (Ji-Hoon, 2002)

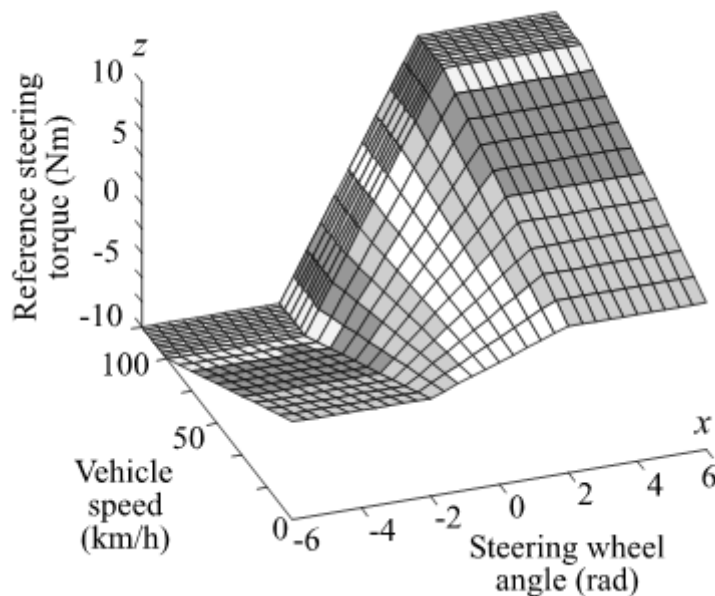


Figura 3.17. Mapa de torque proposto em três dimensões. (Ji-Hoon, 2002)

3.2.2.3.2. Lógica de controle para desempenho de retorno para o centro

Quando o volante é virado durante a condução, o torque de auto alinhamento retorna o volante para a posição central naturalmente. Esse fenômeno oferece conveniência para o motorista ao retornar o volante para o centro, mas com “overshoot” excessivo, teria efeitos nocivos sobre a condução estável (Ji-Hoon, 2002). Um sistema HPS convencional pode gerar alguns efeitos de amortecimento devido à sua inércia e ao atrito do sistema de direção em si, mas não ativamente. Enquanto num sistema de EPS, efeitos ativos de amortecimento podem ser criados por um controle adequado do motor assistência.

A estratégia de controle para desempenho de retorno para o centro pode ser dividido em dois algoritmos. Um é o algoritmo de "retorno" utilizado para trazer o volante para o centro. A função principal deste controle de retorno é voltar a roda para a posição de centro de forma rápida e precisa, e por isso é especialmente útil quando o atrito inerente impede a roda de voltar para a posição central exata. O outro é o algoritmo de “amortecimento ativo”, que permite a roda voltar para o centro de uma forma agradável amortecido e evitar as oscilações que estão normalmente presentes em altas velocidades. É desejável, portanto, que tanto o controle de retorno e o controle amortecimento ativo sejam aplicado de uma forma combinada (Ji-Hoon, 2002). Para esta finalidade, o controlador PID que se segue foi utilizada neste trabalho.

$$u_2 = K_3 \cdot \Theta_{sw} + K_4 \int \Theta_{sw} dt + K_5 \dot{\Theta}_{sw}, \quad [9]$$

Onde K_3 , K_4 e K_5 são os ganhos do controlador. Nota que a parte PI da Eq. [9] cria maior torque de assistência de restauração para maior ângulo do volante, e corresponde para devolver o controle, e a parte derivativa é utilizada para criar um amortecimento ativo que aumenta com a velocidade angular do volante (Ji-Hoon, 2002). Assim, diferentes características de retorno para o centro podem ser obtidas através do ajuste dos ganhos do controlador.

3.2.2.4. EPS no LMS Imagine.Lab

Com auxílio do LMS Imagine realizaremos algumas simulações ilustrando assim a melhoria que o acréscimo do controle trouxe no sistema de direção do automóvel.

O EPS é composto de duas partes: uma estrutura mecânica e uma unidade eletrônica. A parte mecânica inclui o volante, a coluna de direção, a barra de torção, mecanismo de engrenagens de redução, motor de direção, pinhão e cremalheira, etc; a unidade eletrônica inclui o sensor de torque do volante, os sensores de velocidade das rodas e uma ECU (unidade de controle elétrica) eletrônica, etc. O modelo físico do EPS no LMS Imagine, com todas as partes citadas acima, é o representado pela figura 3.18 onde utilizamos uma velocidade constante.

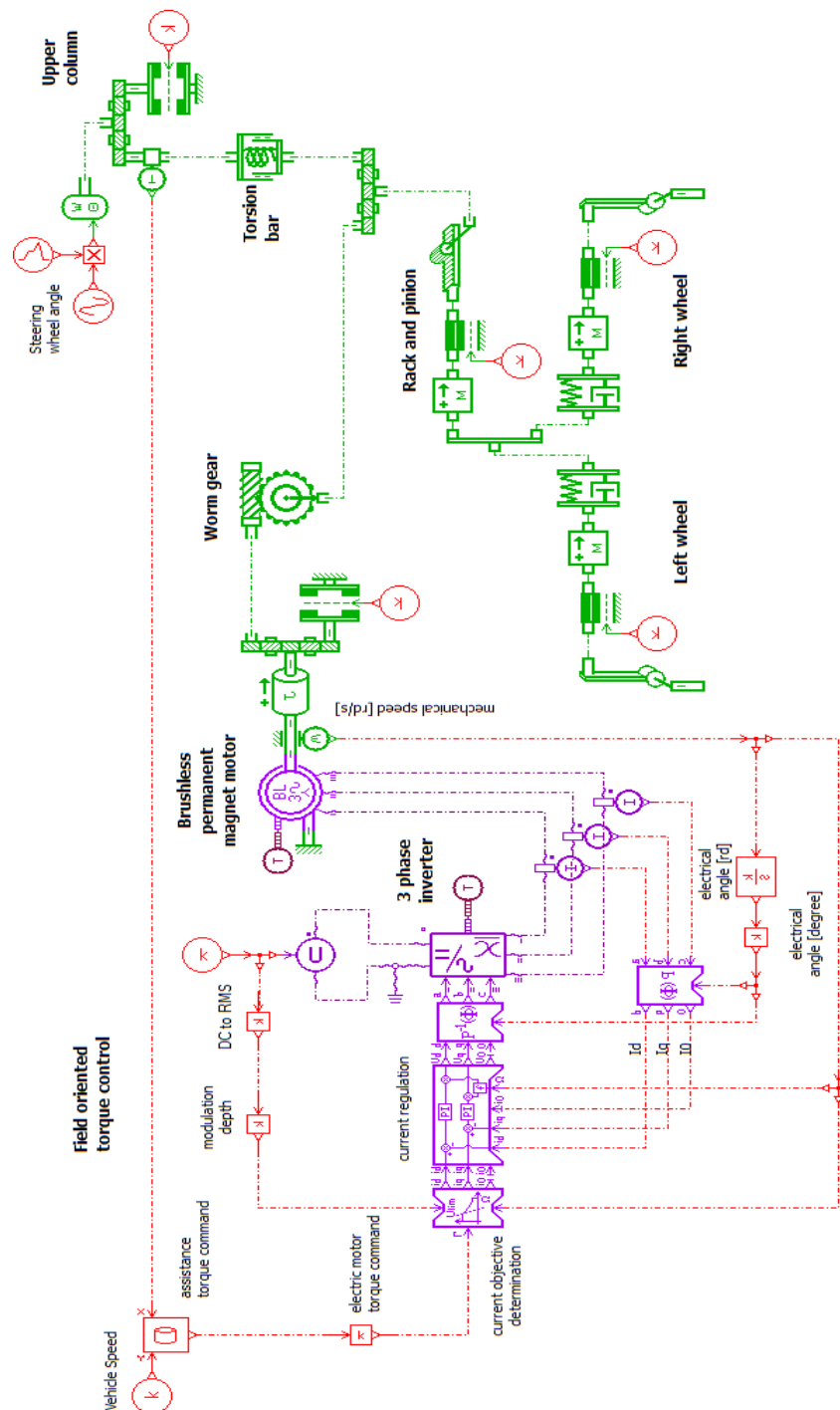
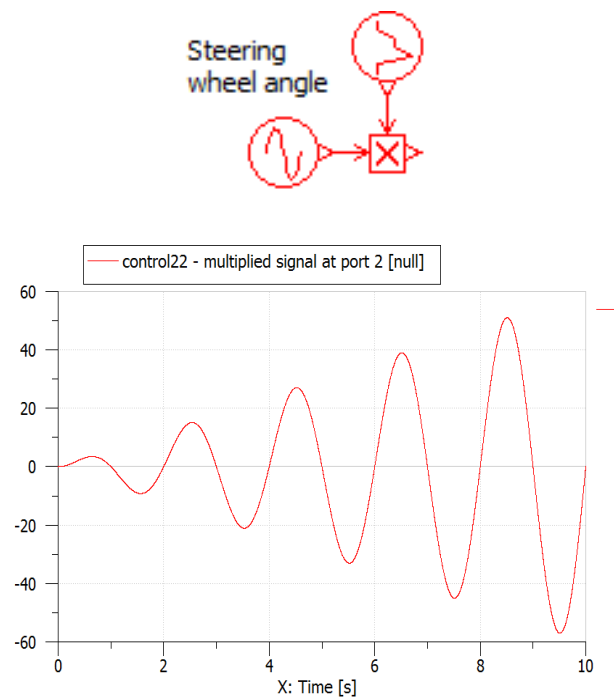


Figura 3.18. Esquema do EPS no LMS Imagine com velocidade constante.

3.2.3. Resultados

O ângulo do volante é uma entrada para o sistema, usamos uma onda senoidal com magnitude crescente:



A figura 3.19 mostra a compensação do torque de direção pelo torque de assistência para se atingir o torque necessário para a realização da manobra desejada. Podemos reparar que no ponto marcado o torque necessário é de 29.1 Nm, o torque de direção (fornecido pelo condutor) é de 4.2 Nm e o torque de assistência do EPS de 24.9Nm, o que é bem superior ao torque de direção.

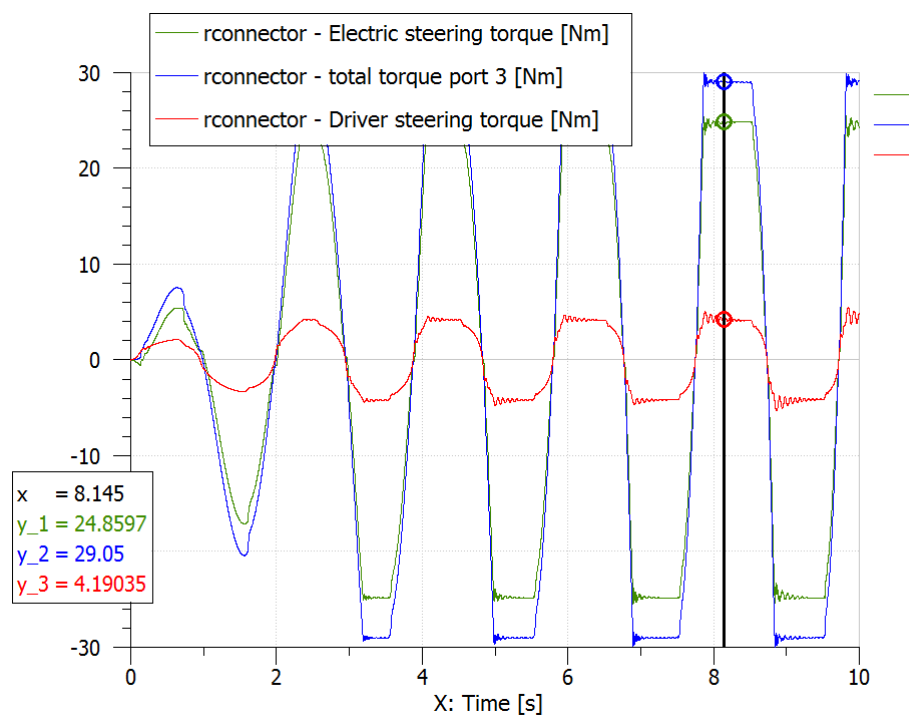


Figura 3.19. Torques resultando do sistema EPS

Comparando o ângulo de entrada do motorista com os torques de assistência, do motorista e o torque resultante da combinação dos dois precedentes, como mostra a figura 3.19, pode se perceber que:

- O torque de assistência cresce rapidamente com o ângulo do volante e se estabiliza em um valor constante depois deste ter atingido o ângulo crítico como o sugere o mapa de torque da figura 7b (torque de referencia X ângulo do volante).
- O gráfico do ângulo do volante é adiantado em relação aos torques devido à natureza antecipatória do controlador derivativo presente no PID da lógica de controle para desempenho de retorno para o centro.

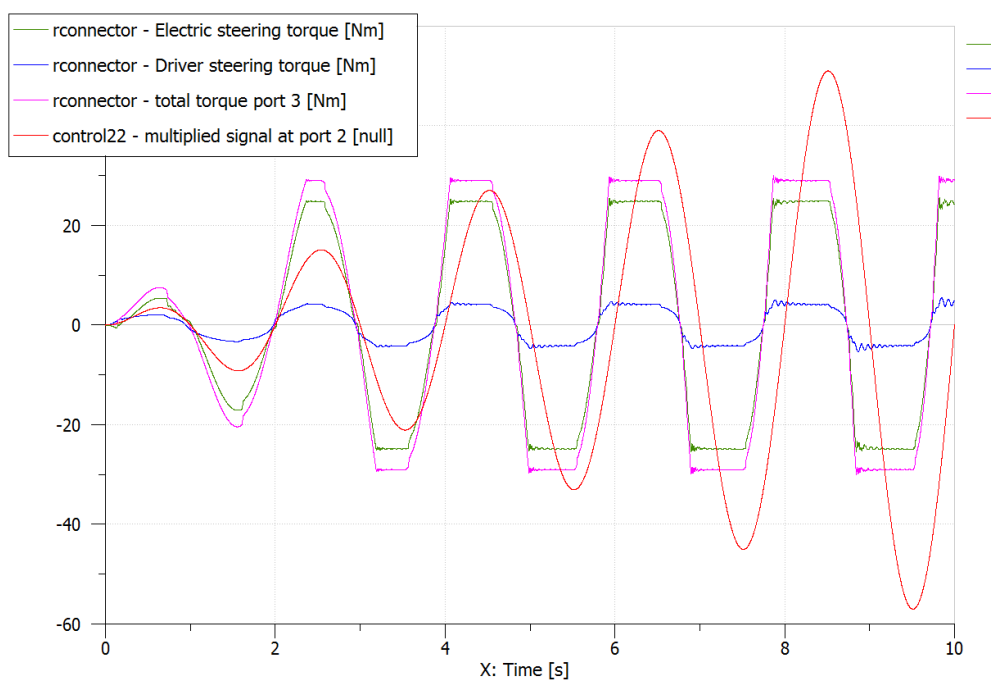


Figura 3.20. Ângulo do volante X torque de assistência do EPS

Depois de ter conferido o comportamento do EPS em relação ao ângulo do volante, veremos agora como este se comporta em relação a uma velocidade crescente. Para tal fim, o modelo adotado na figura 3.18 será usado com a única diferença que a velocidade agora será uma rampa como apresentado na figura 3.21.

Reparamos um comportamento diferente ao precedente quando se altera a velocidade. Com uma mudança do ângulo do volante, vimos que o torque de assistência do EPS crescia até um valor crítico do ângulo de entrada do motorista depois do qual ele permanecia constante. Para um aumento da velocidade, acontece que o torque de assistência aumenta num primeiro

momento e logo depois decresce permitindo um aumento na conexão direta com a estrada, maior sensação do motorista melhorando assim a segurança e a manobrabilidade do veículo.

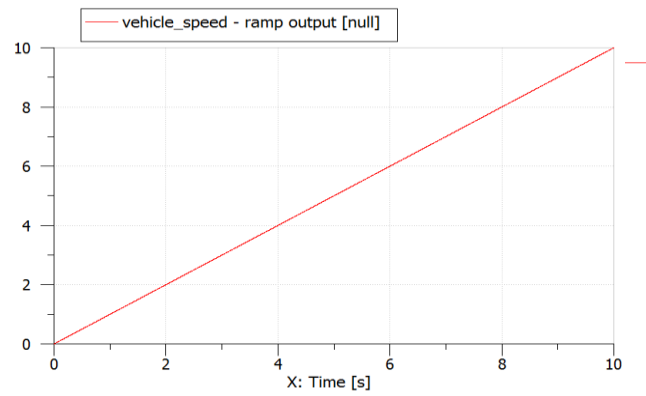


Figura 3.21.(a) Velocidade do carro

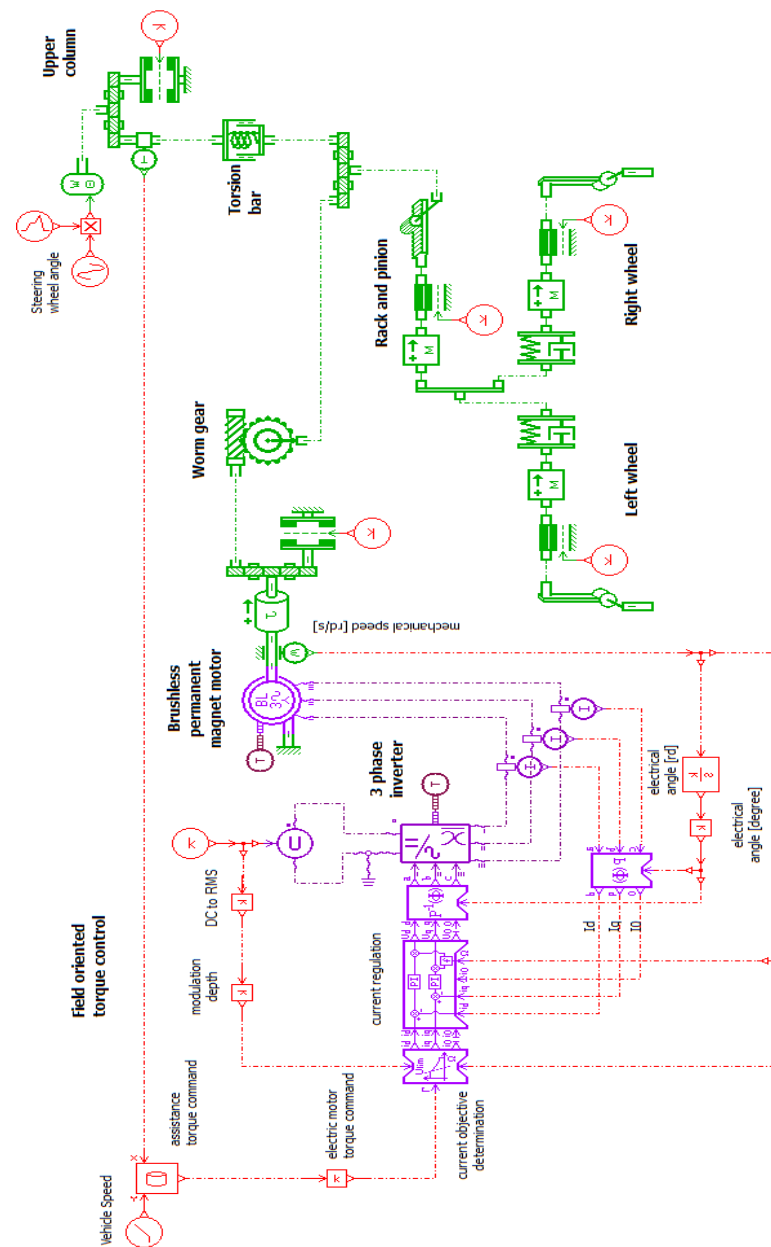
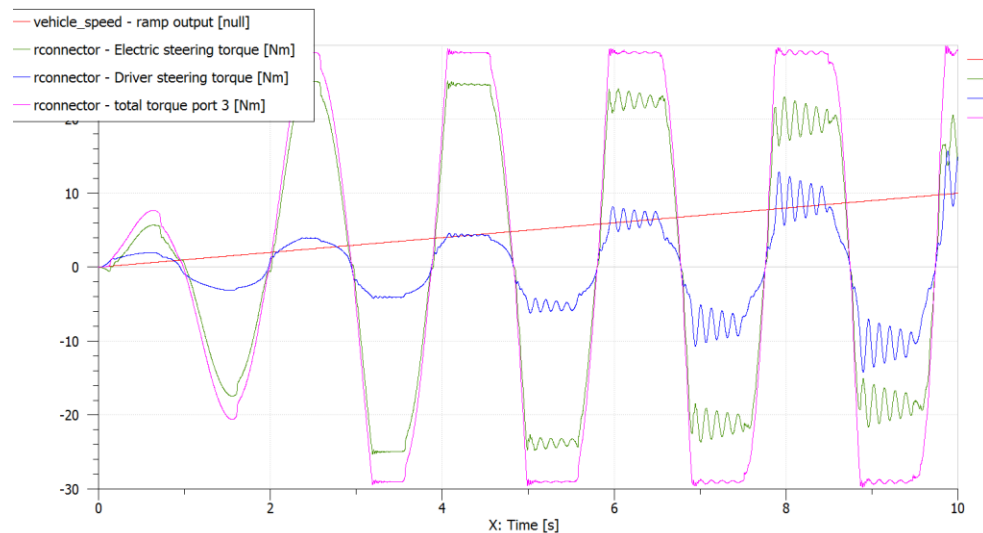


Figura 3.21.(b) Esquema do EPS no LMS Imagine com velocidade crescente



3.2.4. Conclusão

O Electric Power Steering é uma tecnologia que podemos encontrar em vários veículos. A vantagem do uso do EPS é que o motor é somente usado quando se necessita do EPS, ou durante manobras de direção. Assim quando se dirige em uma linha reta, o que acontece em 90% do tempo, o EPS não necessita de nenhum consumo de energia reduzindo assim a consumação do veículo. Em contraste às direções assistidas convencionais, o EPS não é um sistema hidráulico, mas uma solução inteligente baseado em um motor elétrico e um software pertinente.

O EPS é um sistema de direção eletromecânico com uma conexão mecânica direta às rodas. A peça central do EPS é o seu sensor de torque aplicado pelo motorista, o que é usado pelo ECU, em conjunto com outros variáveis que descrevem o estado do veículo, para gerar o torque necessário de assistência. O EPS tem por objetivo principal aumentar o controle da direção e da segurança do veículo e permitindo ao mesmo tempo uma adaptação do torque de assistência em função da velocidade do carro e do ângulo do volante.

4. Conclusão geral

As restrições legais impostas ao setor automotivo obrigaram este a proporcionar cada vez mais conforto e mais segurança para os usuários de seus produtos. Destas exigências que nasceu a necessidade da presença da eletrônica e da informática abrindo as portas para a mecatrônica na indústria automobilística que trouxe inteligência a parte mecânica, já existente, tornando o veículo mais eficiente e mais preciso. A multidisciplinaridade no qual se encontram os atuais veículos requer uma identificação das tecnologias de simulação, métodos e metodologias que têm o potencial de apoiar a indústria em seu objetivo de reduzir o ciclo de desenvolvimento do produto.

Tradicionalmente são conhecidas duas abordagens para simulação: a abordagem via Fluxo de Sinal (Signal Port) e o método MultiPortas, que envolve fluxo de potência e é derivado da técnica Bond Graph.

Na abordagem via fluxo de sinal as conexões entre os elementos do sistema são definidas via portas, nas quais devem ser especificadas as variáveis de estado do sistema, sendo que cada conexão corresponde a apenas uma variável, o que naturalmente torna mais complexa a modelagem de sistemas onde há fluxo de potência, caracterizado pela transmissão de duas variáveis, ou seja, as variáveis de potência, a saber pressão/vazão, tensão/corrente, força/velocidade, etc.

Com o objetivo de minimizar o problema da diversidade, o Bond Graphs, criado pelo Prof. H. M. Paynter, do MIT (Massachusetts Institute of Technology), em 1959 Com o intuito de simplificar a modelagem dinâmica de sistemas de potência foi o mecanismo de estudo adotado neste trabalho. A ideia central de um Bond Graph é expressar um sistema de engenharia qualquer por meio de potencia e energia permitindo assim ligar os subsistemas entre si por linhas que representam ligações de potencia. A partir de um Bond Graph suficientemente detalhado, equações de estado podem ser derivadas utilizando técnicas padrão ou pode se obter simulações do sistema com auxílio de um computador. Vários programas de computador aceitam diretamente uma ampla variedade de Bond Graph para gerar tanto equações de estado para posteriores análises quanto previsões de resposta do sistema. Neste trabalho foi usado o LMS Imagine.Lab AMESim que é um software de simulação para a modelagem e análise de sistemas multidisciplinar 1D. O uso do Bond Graph para a modelagem e as simulações realizadas para os dois casos em estudo neste trabalho demonstraram a eficácia do método e ofereceram resultados comprovando a melhoria alcançada quando se usa um sistema mecatrônica na modelagem de um sistema automotivo.

5. Referências bibliográficas

- BOUAZARA (2006). "L'influence des paramètres de suspension sur le comportement d'un véhicule" BOUAZARA, Mohamed; Maîtrise es sciences (M. Se). Québec / UniversitéLaval / 105p.
- Huaiquan Z. (2011). "Electric Power Steering Simulation Analyze Based on Fuzzy PID Current Tracking Control", Huaiquan ZANG, Shuanyong, Journal of Computational Information Systems 7:1; p 119-126.
- DONAHUE (1998). "Implementation of an Active Suspension, Preview Controller for Improved Ride Comfort", DONAHUE, Mark D., Master of science (Plan II). Boston University : Berkeley / University of California at Berkeley, 85p.
- HONG Li (1999). "Linear and non-linear skyhook damping control laws for active railway suspensions", HONG Li, ROGER M. Goodall, Control Engineering Practice 7, Loughborough University of Technology, p 843-850.
- Ji-Hoon (2002). "Control logic for an electric power steering system using assist motor", Ji-Hoon Kim, Jae-Bok Song, Mechatronics 12, Korea University,p 447- 459.
- van Amerongen (2003). "Mechatronic design", Job van Amerongen, Mechatronics 13 University of Twente, p 1045-1066.
- KARNOPP (2012). "System Dynamics: Modeling, Simulation, and Control of Mechatronic Systems", KARNOPP D., MARGOLIS D.L., ROSENBERG R.C., 5th ed, 648p.
- KATSUHIKO O. (2011). "Engenharia de Controle Moderno", KATSUHIKO Ogata, 5th Ed. 801p.
- SAMUEL G.B. (2006). "Étude d'un système de contrôle pour suspension automobile", SAMUEL Gosselin-Brisson., Maîtrise es sciences (M. Se). Québec / L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI, p 93.
- CANALE (1989). "Automobilismo, dinâmica e desempenho", CANALE, A.C. Volume 1, 150p.
- SCHÖNER (2004). " Automotive mechatronics",SCHÖNER, H.P., Control Engineering Practice 12, Daimler Chrysler Research and Technology, p 1343-1351.
- INTERNACIONAL STANDARD - ISO 2631 - 1978 (E). "Guia para avaliação da exposição humana às vibrações de corpo inteiro", 18p.