



Guilherme Nobrega Martins

**Concepção e Modelagem de Objetos Educacionais para
Compreensão da Dinâmica de Motocicletas/Bicicletas em
Projetos de Engenharia**

Tese de Doutorado

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Orientador: Marco Antonio Meggiolaro

Rio de Janeiro, outubro de 2016



Guilherme Nobrega Martins

**Concepção e Modelagem de Objetos Educacionais para
Compreensão da Dinâmica de Motocicletas/Bicicletas em
Projetos de Engenharia**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Marco Antonio Meggiolaro, Ph.D.

Orientador
PUC-Rio

Profa. Ana Maria Beltran Pavani, D.Sc.

PUC-Rio

Prof. Fernando Ribeiro da Silva, D.Sc.

CEFET

Prof. Francisco José da Cunha Pires Soeiro, Ph.D.

UERJ

Prof. José Alberto dos Reis Parise, Ph.D.

PUC-Rio

Prof. Mauro Speranza Neto, D.Sc.

PUC-Rio

Prof. Nival Nunes de Almeida, D.Sc.

UERJ

Prof. Marcio da Silveira Carvalho, Ph.D.

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 03 de outubro de 2016

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e dos orientadores.

Guilherme Nobrega Martins

Graduado em Engenharia de Controle e Automação pela PUC-Rio em 2002, Mestre em Engenharia Mecânica pela PUC-Rio em 2005.

Ficha catalográfica

Martins, Guilherme Nobrega

Concepção e Modelagem de Objetos Educacionais para Compreensão da Dinâmica de Motocicletas/Bicicletas em Projetos de Engenharia / Guilherme Nobrega Martins. ; orientador: Marco Antonio Meggiolaro. – Rio de Janeiro : PUC-Rio, Departamento de Engenharia Mecânica, 2016.

262 f. : il. (algumas color.) ; 30 cm

Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica.

Inclui referências bibliográficas

1. Engenharia Mecânica – Teses. 2. Dinâmica de motocicletas/bicicletas. 3. Modelagem e controle. 4. Fluxo de Potência e Grafo de Ligação. 5. Educação em engenharia. 6. Módulos/objetos educacionais. 7. Aprendizagem Baseada em Projeto. I. Meggiolaro, Marco Antonio. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Engenharia Mecânica. III. Título.

Dedico estas páginas ao meu filho, que mesmo ainda a caminho foi capaz de me encher de ânimo para defender as ideias aqui escritas.

Agradecimentos

À minha companheira de vida, de aventuras e de grandes e pequenos projetos,
Theane Neves Sampaio Martins

À minha amada mãe, por todo amor e carinho.

Ao meu amado pai, pelas orientações acadêmicas e conselhos de vida.

Aos meus dois amados sobrinhos João Antônio e Helena, pelos momentos felizes.

A toda a minha amada família, pelo apoio e carinho.

Aos meus queridos amigos, pelo apoio nos momentos difíceis e pela companhia nos momentos prazerosos.

Ao Marco Antonio Meggiolaro, pelas orientações.

Ao Mauro Speranza Neto, pelas orientações e amizade.

A Rosely Ribeiro de Almeida Martins, por toda a assistência e paciência.

Para o CNPq e para a FAPERJ, pelo apoio financeiro sem o qual esta pesquisa não seria possível.

Resumo

Martins, Guilherme Nobrega. **Concepção e Modelagem de Objetos Educacionais para Compreensão da Dinâmica de Motocicletas/Bicicletas em Projetos de Engenharia.** Rio de Janeiro, 2016. 262p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A concepção e modelagem de objetos educacionais para compreensão da dinâmica de motocicletas/bicicletas em projetos de engenharia têm nesta tese dois objetivos gerais: o entendimento da dinâmica de veículos de duas rodas de bitola zero e a apresentação de solução para o problema de incompatibilidade, ainda que parcial, do perfil do formando em engenharia quando comparado ao desejado pelo mercado de trabalho. Para cumprir com o primeiro objetivo, este trabalho desenvolve a modelagem de bicicletas e motocicletas utilizando as técnicas de Grafo de Ligação e Fluxo de Potência, para em seguida descrever aparatos educacionais em desenvolvimento no LDSM (Laboratório de Desenvolvimento de Sistemas Mecatrônicos da PUC-Rio) projetados para auxiliar no entendimento desses veículos. No intuito de conseguir responder à questão que envolve o segundo objetivo geral, este trabalho apresenta um breve estudo sobre aprendizagem ativa para então, passando pela análise dos projetos pedagógicos dos cursos de engenharia mecânica e de controle e automação, propor solução para uma melhor formação do engenheiro utilizando a metodologia de aprendizagem ativa, denominada PBL. O autor emprega os conhecimentos obtidos ao alcançar o primeiro objetivo para propor a utilização de projetos criados em torno dos veículos em questão como ferramentas do processo de ensino/aprendizagem. Através de pesquisas bibliográficas e de comparação do alcance e da abrangência entre, por um lado, a organização curricular vigente e, por outro, aquela proposta utilizando a metodologia de aprendizagem ativa, o autor evidencia que esta última cumpre satisfatoriamente com o rigor da formação técnica do engenheiro. Através de pesquisas bibliográficas e experimentação em aula, ele verifica que a nova organização curricular pode ir além e cobrir também as competências não ligadas à formação técnica que a atual organização não consegue contemplar satisfatoriamente, como consciência socioambiental e ética profissional, entre outras. Por fim o

trabalho indica novos caminhos a serem seguidos, tanto na modelagem de tais veículos, como no estudo e na utilização da metodologia pesquisada.

Palavras-chave

Dinâmica de Motocicletas/Bicicletas, Modelagem e Controle, Fluxo de Potência e Grafo de Ligação, Educação em Engenharia, Módulos/Objetos Educacionais, Aprendizagem Baseada em Projeto.

Abstract

Martins, Guilherme Nobrega. **Conception and Modeling of Educational Objects for Understanding of Motorcycles/Bicycles Dynamics in Engineering Design.** Rio de Janeiro, 2016. 262p. D.Sc. Thesis – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The conception and modeling of educational objects for understanding of motorcycles/bicycles dynamics in engineering design have in this thesis two general objectives: understanding the dynamics of two wheels vehicles of gage zero and resenting the solution for the incompatibility problem, even if partial, of the engineering graduate profile when referred to the profile desired by the job market. To accomplish with the first goal, this work develops the modeling of bicycles and motorcycles using the Bond Graphs and Power Flow techniques, to then describe education apparatuses developed in LDSM (Mechatronic Systems Development Laboratory of PUC-Rio) designed to aid in the understanding of those vehicles. In order to answer the question that involves the second general objective, this work presents a brief study on active learning and then, through the analysis of the mechanical and mechatronics engineering courses' pedagogical projects, proposes a solution for engineers' training using the active learning methodology, the so called PBL. The author uses the knowledge obtained in achieving the first objective to propose the use of projects created around the considered vehicles as tools to the teaching/learning process. Through bibliographical researches and through comparison of reach and inclusion among, on one hand, the current curricular organization and, on the other hand, that one proposed using active learning methodology, the author shows that this last one fulfills satisfactorily the rigor of the engineer's technical formation. Through bibliographical researches and experimentation in class, he verifies that the new curricular organization can go further and also covers the competences not linked to the technical formation that the current organization is not able to cover satisfactorily, as social- environmental awareness and professional ethics, among others. Finally, the work indicates new paths to follow, both in the modeling of such vehicles, as in the study and use of the researched methodology.

Keywords

Motorcycle/Bicycle Dynamics, Modeling and Control, Power Flow and Bond Graphs, Engineering Education, Educational Modules/Objects, Project-Based Learning.

Sumário

1	Introdução	16
1.1.	Motivação	16
1.2.	Significado e Missão dos Engenheiros	19
1.3.	Contexto Atual	27
1.4.	Estrutura do Trabalho	30
2	Modelos Dinâmicos de Bicicletas e Motocicletas para Aplicações em Análise, Simulação e Controle de Estabilidade e Trajetória	33
2.1.	Introdução	33
2.2.	Revisão Bibliográfica	33
2.3.	Estudo Preliminar da Dinâmica e Introdução ao Controle de Veículos com Duas Rodas	36
2.4.	Modelagem Matemática a partir do Modelo de Whipple para Bicicletas	55
2.5.	Modelagem Dinâmica de Bicicletas e Motocicletas por Fluxo de Potência	67
3	Concepção e Modelagem de Aparatos para Compreensão e Análise do Comportamento Dinâmico de Bicicletas e Motocicletas	86
3.1.	Introdução	86
3.2.	Revisão Bibliográfica	88
3.3.	Motocicleta em Escala Rádio-Controlada Instrumentada e Autônoma	91
3.4.	Aparato para Visualização do Efeito Giroscópico em Motocicletas e Bicicletas	95
3.5.	Base Passiva para Visualização e Análise do Comportamento Dinâmico de Motocicletas	99
3.6.	Modelo de Giroscópio Virtual em SOLIDWORKS	102
3.7.	Próximos Passos	107
4	Aprendizagem Ativa e Formação Integral	109
4.1.	Métodos de Aprendizagem Ativa	111
4.2.	Aprendizado Baseado em Problemas	115
4.3.	Currículo em Espiral	142

5 Apresentação dos Cursos das Engenharias Mecânica e de Controle e Automação da PUC-Rio	147
5.1. Linhas Gerais dos Projetos Pedagógicos dos Cursos (PPC)	147
5.2. Descrição Sucinta do Percurso Acadêmico	149
5.3. Estrutura Curricular	163
5.4. Análise Comparativa	164
6 O Uso da Bicicleta/Motocicleta em Ensino e Pesquisa nas Engenharias Mecânica e de Controle e Automação	186
6.1. Concepção de Projetos em PBL	187
6.2. Sugestões de Temas para Desenvolvimento de Projetos em PBL	229
6.3. Referências dos Currículos com os Conhecimentos, Habilidades e Atitudes Desenvolvidos com estes Projetos e Temas	239
7 Considerações Finais	253
8 Referências Bibliográficas	258
8.1. Livros e Artigos	258
8.2. Teses, Dissertações e Projetos de Final de Curso	263
8.3. Teses, Dissertações e Projetos de Final de Curso em Progresso em Dinâmica de Motocicletas e Bicicletas	264
8.4. Páginas na Internet	265
8.5. Demais Referências	266

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Parâmetros de uma bicicleta	36
Figura 2.2 – Cinemática lateral de uma bicicleta em curva	37
Figura 2.3 – Comportamento lateral de uma bicicleta	38
Figura 2.4 – Plano s para $Y(s)/\delta(s)$	39
Figura 2.5 – Pêndulo invertido com base móvel	40
Figura 2.6 – Plano s para $\varphi(s)/Y(s)$	41
Figura 2.7 – Malha aberta do sistema bicicleta	42
Figura 2.8 – Plano s para $\varphi(s)/Y(s)$ do modelo completo em malha aberta	42
Figura 2.9 - Malha de controle do sistema com realimentação unitária e controlador proporcional	43
Figura 2.10 - Referenciais e variáveis	45
Figura 2.11 - LGR com velocidade longitudinal <	46
Figura 2.12 - LGR com velocidade longitudinal =	46
Figura 2.13 – LGR com velocidade longitudinal >	47
Figura 2.14 – Sistema de coordenadas $\xi\eta\zeta$ inercial	48
Figura 2.15 – Diagrama de blocos da bicicleta considerando o garfo	49
Figura 2.16 – Visão traseira da inclinação do condutor	52
Figura 2.17 – Evolução da bicicleta desde 1816 até chegar à configuração atual	56
Figura 2.18 – Modelo de Whipple	57
Figura 2.19 – Configuração e variáveis dinâmicas	60
Figura 2.20 – Autovalores de 2.3 para v até 10m/s	65
Figura 2.21 - Interação de subsistemas em uma motocicleta	68
Figura 2.22 - Motocicleta como um sistema multicorpo	69
Figura 2.23 - Referenciais, velocidades angulares e parâmetros geométricos no sistema da motocicleta	70
Figura 2.24 - Modelo para dinâmica longitudinal	71
Figura 2.25 - Modelo físico com geometria das suspensões para dinâmica vertical	73
Figura 2.26 - Modelo para dinâmica vertical	74
Figura 2.27 - Modelo para integração das dinâmica longitudinal e vertical	76
Figura 2.28 - Subsistema guidão	77

Figura 2.29 - Dinâmica lateral	78
Figura 2.30 - Grafo de Ligação para o acoplamento de corpo rígido no referencial local	79
Figura 2.31 - Grafo misto de Ligação/Fluxo de Potência do sistema da motocicleta com o acoplamento para os movimentos de rotação	81
Figura 3.1 - Quadro de divisão do trabalho dos integrantes do LDSM	85
Figura 3.2 - Motocicleta autônoma: protótipo LEGO e versão atual em escala 1:5	89
Figura 3.3 - Motocicleta DX 450 e modelo 3D do SOLIDWORKS	90
Figura 3.4 - Aparato para determinação do CM e medição no eixo z	91
Figura 3.5 - Geometria da bicicleta/motocicleta, parâmetros e sistema de referência	91
Figura 3.6 - Protótipo LEGO do AVEG	94
Figura 3.7 - Concepção 3D do 1º protótipo do AVEG no SOLIDWORKS	95
Figura 3.8 - 1º Protótipo AVEG para esterçamento, rolagem e guinada combinados	96
Figura 3.9 - Concepção 3D do 2º protótipo do AVEG no SOLIDWORKS	97
Figura 3.10 – Primeiro protótipo virtual da base de testes para motocicletas	98
Figura 3.11 - Aparato completo em SOLIDWORKS	99
Figura 3.12 – Exemplo do modelo com carga para contrapeso	99
Figura 3.13 – primeiro modelo (estrutura de “Gimbals”)	101
Figura 3.14 - Face selecionada para estudo de movimento	102
Figura 3.15 - Forças atuantes de $t=2s$ a $t=5s$	102
Figura 3.16 – Gráfico das velocidades angulares da simulação	103
Figura 3.17 – Estrutura para estudo do efeito giroscópico da roda dianteira	104
Figura 3.18 – Estrutura para estudo do efeito giroscópico de veículos de duas rodas com bitola nula	104
Figura 4.1 – Mapa conceitual para projetos de reatores	141
Figura 4.2 – Níveis de aprofundamento da unidade de bioprocessamento	142
Figura 4.3 – Currículo em Espiral da Faculdade de Engenharia Mecânica da Virginia Tech	143
Figura 5.1 – Conceitos ligados à bicicleta e às disciplinas das Engenharias analisadas	174
Figura 5.2 – Esboço de Mapa Conceitual da bicicleta	175
Figura 5.3 – Correlações dos tópicos da bicicleta com o ciclo básico	176
Figura 5.4 – Correlações dos tópicos da bicicleta com o ciclo profissional	177

comum a ambas as engenharias

Figura 5.5 – Correlações dos tópicos da bicicleta com o ciclo profissional específico da Engenharia Mecânica	178
Figura 5.6 – Correlações dos tópicos da bicicleta com o ciclo profissional específico da Engenharia de Controle e Automação	179
Figura 6.1 – bicicleta com partes em bambu	201
Figura 6.2 – Diferentes soluções para o melhor transporte de bicicletas	227
Figura 6.3 – Triciclo que se transforma em carrinho de bebê	228
Figura 6.4 – Bicicletas elétricas acopláveis	229
Figura 6.5 – Bicicleta purificadora de água	229
Figura 6.6 – Alternativas de locomoção	231
Figura 6.7 – Dispositivos que transformam uma bicicleta comum em elétrica	233
Figura 6.8 – Projetos e temas em PBL no currículo em espiral	248

1 Introdução

1.1. Motivação

*“O significado das crises
consiste exatamente no fato de que
indicam que é chegada a ocasião
para renovar os instrumentos.”*
Thomas Kuhn

Todo trabalho de pesquisa tem ou deveria ter uma forte ligação com a trajetória de seu autor. Quando o indivíduo mergulha em seus questionamentos, procurando respostas para dúvidas colocadas por si durante sua vida profissional, acadêmica ou mesmo pessoal, ele carregará consigo, durante o processo de investigação, a vontade genuína de resolver aquela questão. Ele não se satisfará em preencher requisitos mínimos exigidos, pois estará envolvido, preocupado e até ansioso para encontrar as respostas.

Estes sentimentos poderiam ser causadores de problemas. Poderiam por exemplo abrir margem a questionamentos de outrem quanto à sua visão dos fatos e ao risco de esta ser distorcida pela emoção – desconsiderando assim o desejo genuíno do autor de transpor quaisquer desafios por acreditar que, através de pesquisa fundamentada, com seu esforço, reflexão e dedicação, ele possa encontrar respostas que ajudem outros e si mesmo a abrirem caminhos possíveis.

Dito isso, no intuito de elucidar as motivações para este estudo, cabe dizer que seu autor, desde que terminou a graduação em engenharia de controle e automação, passou por grandes e renomadas empresas, sempre se questionando se realmente estava preparado para assumir as funções então propostas. Também lhe ficou evidente que, apesar do reconhecimento da excelência de ensino em sua universidade de origem, seus empregadores sempre carregaram consigo a mesma preocupação, entregando a todos os novos empregados cursos intensivos em conteúdo e extensivos em tempo.

A primeira grande empresa por onde passou o autor foi um grande conglomerado automobilístico alemão, onde foi levado a realizar um percurso de

seis meses de treinamento nos diferentes setores que envolviam a produção de câmbio de caminhão. Por conta do aumento da participação deste produto no mercado brasileiro e após análise do histórico de disciplinas cursadas foi desenvolvida uma trajetória de aprendizagem personalizada (visto que as formações do engenheiro na Alemanha e no Brasil são bem diferentes) para a adequação do então recém-formado às necessidades desta empresa. Durante este percurso não foi desenvolvida nenhuma atividade ligada diretamente à função de engenharia de produto ou de processo. Havia, no entanto, uma clara preocupação em apresentar como era o ambiente, quais eram as atitudes esperadas e como era desenvolvido o trabalho. Estavam programados mais seis meses de atividades (totalizando um ano de treinamento antes de assumir a função) somente no serviço pós-venda, setor da empresa interessado em sua contratação, mas por questões pessoais o autor preferiu retornar ao Brasil.

Poucos anos após seu retorno ao país, logo após a conclusão do mestrado no departamento de engenharia mecânica da instituição de ensino de origem, o autor foi chamado para integrar programa de especialização em engenharia aeronáutica desenvolvido pelo maior fabricante do setor na América Latina em parceria com instituto de ensino superior neste ramo da engenharia. O programa visava treinar engenheiros recém-formados (ou recém-saídos do mestrado) para que pudessem atuar na empresa em pauta. O treinamento, com nível de mestrado profissionalizante, previa uma parte teórica de dez a doze meses, seguida de um projeto conceitual de uma aeronave de duração de seis meses. A empresa dedicava um ano e meio somente na formação de sua mão-de-obra especializada e se queixava bastante da dificuldade administrativa causada pelo atraso entre a constatação da necessidade de contratação e o tempo de formação do profissional, além é claro do alto investimento financeiro.

Novamente não era esperado que os recém-contratados entrassem diretamente para atuar em suas funções, colocando-se assim todos os recém-formados em engenharia do país para passar por esta formação de um ano e meio. A única exceção era dada a engenheiros formados no instituto tecnológico que tinha parceria histórica com essa empresa, parceria esta que vem desde suas criações e é em parte a razão para a existência do instituto. Assim os cursos de engenharia do instituto já preparam os estudantes para assumirem diretamente as suas funções na empresa.

Por último, logo depois de concluir a primeira fase desta formação, este pesquisador foi chamado a assumir um cargo na então maior empresa de energia da América Latina. Antes de poder exercer a função para a qual foi

contratado (analista de comercialização e logística), passou por um curso de formação dado na universidade corporativa da empresa. Este curso teve duração de 11 meses e trouxe não somente conhecimentos específicos da área, mas também a preocupação com habilidades e atitudes voltadas para o ambiente de trabalho. É prática desta empresa, em cargos voltados exclusivamente para engenheiros (não foi o caso citado), que haja cursos de formação de pelo menos um ano, podendo chegar a um ano e meio para os tão demandados engenheiros de petróleo, colocando ainda mais em cheque a formação dada aos engenheiros no Brasil.

Após trabalhar durante três anos na função prevista pela empresa, surgiu a oportunidade de transferência para sua universidade corporativa, onde trabalhou por pouco mais de dois anos e onde teve a chance de aprofundar o entendimento da razão da lacuna existente entre a formação que teve como engenheiro em uma das mais conceituadas universidades do país e o que desejavam três das maiores empresas do mundo.

Ficou então evidenciado que além de um conhecimento técnico bem sólido, estas empresas buscavam habilidades e atitudes que não são ensinadas em cursos de engenharia e que dificilmente são alcançadas através do método tradicional de ensino.

Ao retornar então à instituição de ensino responsável pela sua formação superior e também pelo seu título de mestre, este doutorando encontrou um grupo, de formação heterogênea, que desenvolve, em diferentes graus, pesquisas ligadas a veículos, em especial veículos de duas rodas. Este grupo tem em sua composição desde alunos que estão nos primeiros semestres de cursos de graduação desenvolvendo seus projetos da introdução à engenharia, passando por aqueles que desenvolvem seus trabalhos de final de curso, até mestrandos e doutorandos, sendo capitaneado pelos atuais orientadores desta tese, ambos com ampla experiência em controle e dinâmica de veículos.

Este fato o fez perceber que um tema como este, isto é, controle de veículos de duas rodas, pode ser paulatinamente abordado, de forma a conseguir fazer parte de todo o currículo de engenharia de controle e automação. E não só isso, mas ainda mais importante: por ser um projeto de engenharia, através dele se teria a chance de abordar, durante toda a formação dos estudantes de engenharia, temas que normalmente não são trabalhados em sala e que fizeram falta em seu percurso profissional.

Descrita esta motivação pessoal, é importante ressaltar que, depois de se fazer consciente da existência da supracitada lacuna, o autor veio a constatar,

através da leitura de diversos estudos, que esta problemática é real e está presente, em intensidades diferentes, em todo o globo. Com isso torna-se evidente a relevância deste estudo, que pretende sugerir uma dentre várias possíveis saídas, adequada às particularidades da cultura brasileira, para que futuros recém-formados estejam mais rapidamente aptos a desempenhar sua função e alcancem em plenitude as suas expectativas, assim como aquelas da sociedade e da indústria.

Apesar de diversas propostas de ensino de engenharia baseadas em projetos poderem ser encontradas na literatura, o casamento entre este método e o tema central do grupo de pesquisa citado (controle de motocicletas e bicicletas), não pôde ser identificado após busca exaustiva.

Assim, este estudo tem como aspiração principal contribuir para um futuro processo de institucionalização de métodos de ensino inovadores, propondo estar presente em todos os semestres da formação do engenheiro com projetos multidisciplinares, tendo como tema as competências¹ envolvidas em desenvolvimento de bicicletas e motocicletas.

1.2. Significado e Missão dos Engenheiros²

*“Os engenheiros são os clérigos
do desenvolvimento material”
George Morison*

Em todas as épocas e sociedades a formação e a atuação dos diferentes profissionais se encontram diretamente ligadas ao papel e à missão que deles se espera. Nesse sentido, os valores centrais dos diferentes povos e culturas sempre levaram à constituição de expectativas concretas com respeito ao papel a ser desempenhado por cada um e por cada uma em seu contexto social.

Assim foi com relação ao papel exercido pelos sacerdotes, militares e governantes tanto nas civilizações da Antiguidade, como na Europa Medieval, bem como no que diz respeito aos profissionais liberais, aos trabalhadores e à

¹ Quando o autor deste trabalho lança mão desse termo, ele se refere à definição em três dimensões (conhecimento, habilidade e atitude) de DURAND (1998).

² Este subitem foi baseado em uma série de entrevistas realizadas ao longo do ano de 2012 com o Prof. D.Sc. Roberto Cintra Martins, pesquisador de história da ciência.

classe política na Modernidade. Pode-se mesmo considerar em cada um desses contextos algumas profissões típicas ou “profissões-chave” intimamente ligadas ao nível mais profundo da vida social. Mesmo as sociedades ditas mais primitivas seriam inimagináveis sem a presença decisiva do chefe da tribo, do feiticeiro, do guerreiro, do caçador... e do patriarca ou matriarca.

Esse elo essencial entre a vida evolutiva das sociedades e o papel desempenhado por seus profissionais é a tal ponto crucial que se poderia mesmo perguntar se houve crise ou ruptura profunda em nível sociocultural sem que tenha havido também uma crise das profissões-chave de cada sociedade. Aqui um exemplo bem conhecido seria a crise do clero no início da Modernidade.

Em todo esse amplo contexto a engenharia, como se verá mais à frente ao visitar resumidamente seu histórico, enquanto uma das profissões-chave desde o período de transição para a Idade Moderna, não deve constituir exceção. De fato, se hoje se vive em um contexto de profunda crise, que não se restringe a este ou a aquele país, mas abrange todo o planeta em nível econômico, político, social e ambiental, torna-se no mínimo duvidoso postular que tal crise em nada se relacione com a crise das profissões-chave da Modernidade, dentre elas a Engenharia, e com a crise do paradigma de formação do engenheiro.

De fato, a crise atual da Modernidade é de tal forma abrangente, que já se ouve falar, não raramente, em Pós-Modernidade. Nessa transição entre “eras” não é de todo surpreendente que uma revolução se opere também no íntimo da Engenharia, da Ciência e da Técnica. De fato, essa transição se dá simultaneamente à emergência de novos paradigmas como os da Física Moderna, da Engenharia Genética e do mundo interconectado pelas telecomunicações.

Para melhor se entender o grau de risco e de oportunidade que se configura em meio a tal crise³, é necessário se debruçar sobre o quadro referencial que tem gerado as expectativas em torno do papel do engenheiro nas diferentes sociedades. Em particular, um breve caminho histórico deverá levar, ao final, a nos contemplarmos a nós mesmos, engenheiros da pós-modernidade, em face das expectativas com que somos vistos e também em face de nossa capacidade – ou incapacidade – de atendê-las. Em outras palavras, vemo-nos aqui como que perguntando a nós mesmos: o que se espera de nós, engenheiros vindos da Modernidade adentrando a Pós-Modernidade?

³ Este é ilustrado pelo ideograma chinês correspondente à palavra “crise” que incorpora as ideias de risco e oportunidade.

1.2.1. Um breve histórico

Pode-se considerar como até certo ponto consensual a imagem dos primeiros “engenheiros” como a daqueles profissionais que projetaram, desenharam e gerenciaram a construção das grandes pirâmides do Antigo Egito. Seja por terem sido os primeiros (mas não os únicos) povos da Antiguidade a erguer construções a tal ponto majestosas e monumentais, ou por terem sido os primeiros a deixar a respeito registros escritos, o fato é que até hoje a figura de Inhotep, construtor da pirâmide de Saqqārah próximo a Mênfis (cerca de 2550 a.C.) é emblemática como a do protótipo do engenheiro por excelência (cf. Encyclopædia Britannica, 1974, verbete “Engineering”).

O feito desses “primeiros” engenheiros não tem sua importância esmaecida mesmo que a bem da verdade e da justiça se mencione também os heróis anônimos dessa grande façanha, milhares de humildes escravos. Mas por outro lado também por uma questão de justiça não se pode omitir os executores de outras notáveis obras, tais como as construções ditas megalíticas do período neolítico ou mesmo outras mais modestas em aparência, tais como os primeiros abrigos, armamentos, trilhas, meios de transporte, utensílios domésticos e ferramentas. Obras notáveis estas, emergentes em época anterior às das primeiras civilizações. Estariam lá também nossos “colegas” de profissão?

O objetivo em toda esta reflexão está muito distante da pretensão de tecer um quadro da evolução histórica da Engenharia, mas se constitui tão somente em buscar referências para o entendimento do contexto crítico atual e dos caminhos que se desenharam para a formação do engenheiro do futuro. Sendo assim, é necessária e importante uma abordagem sucinta e objetiva, com foco na pessoa do engenheiro e em suas diferentes funções nas diferentes sociedades.

Nesse sentido, pode-se avançar considerando o papel do engenheiro como funcionário do Estado junto à administração imperial, desde os grandes impérios despóticos da Antiguidade até os impérios coloniais na Modernidade. Como missão típica do funcionário a serviço do poder central nesses impérios, o ato de “ingenerare” (criar), raiz latina do termo “engenharia”, é então necessariamente submetido a normas e constrangimentos claros e explícitos,

posto que a função do engenheiro em tais contextos é a de servir com suas obras à conquista e à perpetuação do poder soberano.

Além do exemplo emblemático das pirâmides (construídas não somente no Egito), coube também a engenheiros de diferentes épocas a organização e controle da construção de cidades, fortalezas, templos, palácios, estradas e aquedutos em praticamente todo o mundo antigo civilizado, como nas cidades-estado gregas, nas capitais e colônias de antigos impérios (Império Alexandrino, Império Romano), na Europa Cristã Medieval, nos impérios da Idade Moderna (na Ásia, na África e na América Latina). O Brasil colonial não é aqui exceção: nele pode-se identificar os “primeiros” engenheiros-funcionários da coroa portuguesa em terras brasileiras (obviamente “primeiros” para quem considerar os indígenas incapazes de feitos típicos da engenharia).

Entre os pontos essenciais a se mencionar nesta breve síntese há um ponto – e um autor – que merecem destaque por sua aguda e apropriada análise da conduta “adequada” ao poder central em face das colônias – tema que, como acima mencionado, se relaciona diretamente ao papel esperado do engenheiro em tal contexto. No capítulo IV de sua obra clássica “O Príncipe”, diz Nicolau Maquiavel:

*“Quando se conquista um país acostumado a viver segundo as suas próprias leis e em liberdade, três maneiras há de proceder para conservá-lo: ou destruí-lo; ou ir nele morar; ou deixá-lo viver com as suas leis, exigindo-lhe um tributo e estabelecendo nele um governo de poucas pessoas que o mantenham fiel ao conquistador. A última forma de proceder explica-se porque, primeiro, tal governo sabe que, sendo filho da vontade do príncipe, não pode subsistir sem a amizade e o poderio dele, e tudo fará por fortalecer-lhe a autoridade; segundo, porque, para reter uma cidade acostumada a viver livre, o melhor meio que tem um conquistador é, se não a quer destruir, servir-se dos habitantes dela.”*⁴

Ainda que não de forma explícita tais palavras já apontam para a missão que se esperava dos engenheiros, nos primórdios da Idade Moderna⁵, qual seja, a missão de funcionários do poder colonial. Nessa mesma época, os portugueses iniciaram a ocupação do que hoje é o território brasileiro por via da

⁴ Cf. Maquiavel, N., O Príncipe,

⁵“O Príncipe” foi editado pela primeira vez em 1532 em Roma.

terceira estratégia apontada por Maquiavel, para depois passar à segunda, com a fuga da corte portuguesa em face das forças invasoras de Napoleão. E no desenrolar do drama luso-brasileiro lá estiveram presentes e atuantes os engenheiros: na construção de cidades, palácios, estradas, escolas, igrejas, fortificações e na produção de armamentos e munição. Aí surge a engenharia nacional, primeiro a militar, preocupada em consolidar a presença territorial dos portugueses e evitar a ocupação por outros povos, depois a civil, preocupada no desenvolvimento daquela sociedade. Ambas primordialmente a serviço do império e no intuito de conquista e preservação do controle colonial conforme enfatiza Maquiavel.

Assim, a imagem do engenheiro funcionário e funcional ao poder imperial mantém-se essencialmente intacta – guardadas sempre algumas exceções, por si notáveis, mas que por outro lado confirmam a regra – dos engenheiros criativos e ousados, poetas e artistas visionários, “indomáveis” como Leonardo da Vinci.

Com o crescimento e fortalecimento da burguesia e depois com a Revolução Industrial, grande parte dos engenheiros encontrou-se inserida em atividades de planejamento, organização e controle da produção, na interface entre o poder centralizador, não exatamente de um faraó ou de um imperador, mas de um grande empreendedor capitalista. Nesta nova função, de extrema importância para o desenvolvimento do capitalismo, lhe foi incumbida a missão de auxiliador, facilitador de uma nova conquista: a de mercado. Coube a ele melhorar cada vez mais os processos produtivos e de distribuição, de forma que seu novo empregador, o capitalista, conquistasse uma fatia cada vez maior do mercado.

Entretanto, é neste ponto que começa a se desenhar um sinal decisivo de mudança. Em parte por obra dos princípios fundamentais da modernidade (tão essenciais para o crescente status do capitalista) emblematicamente postulados pelas revoluções americana e francesa, bem como pelos filósofos iluministas, em parte por anseios crescentes de grandes massas das populações em especial no Ocidente, ergue-se uma nova “onda” de valores, centrados na autonomia do sujeito, na liberdade, na justiça e na dignidade. Cada ser humano, independentemente de ser ou não “fidalgo” (filho de algo) passa a poder reivindicar para si o direito de não somente viver a vida, mas de conduzir sua própria vida.

Trata-se aqui de uma autêntica ruptura de valores, na qual emerge um novo paradigma: o do cidadão consciente, ativo e participante, sujeito (não mais

objeto) da história - de sua própria história, da história de sua comunidade, de sua sociedade, de seu país, da humanidade.

O engenheiro não poderia estar distante ou incólume a essa ruptura de paradigma cultural. Ao contrário, ainda que inconscientemente, ele permanece sendo um profissional-chave, porém agora em um novo ambiente social, cultural e valorativo. Os novos valores que acenam no horizonte, típicos valores da Modernidade, passam a interpelá-lo, ainda que ele não o perceba. Liberdade, justiça, dignidade, autonomia, estão a lhe dizer: “seja livre, responsável, justo, digno! Enfrente sua vida, seus desafios, seus problemas com atitude proativa e criativa, não abra mão de seus direitos e possibilite, através dos sistemas que você mesmo irá projetar e construir, que outras pessoas tenham aumentadas suas chances de viver com liberdade e dignidade!”⁶

Ele vive com isso uma ambiguidade de valores. Enquanto seu empregador espera que ele sirva de importante instrumento para o desenvolvimento do negócio, grande parte da classe trabalhadora não o vê como colega, mas como braço direito do capitalista, visto que muitas vezes o seu esforço a favor do capital pode ir de encontro ao interesse do trabalhador. Um exemplo desta tensão pode ser visto no Movimento Ludita, quando em 1811 os trabalhadores se organizaram na tentativa de conter a crescente substituição da mão-de-obra humana por máquinas pensadas, projetadas e criadas por engenheiros. Conforme a inquietante constatação de CRUZ FILHO (2015, pág. 225) sobre esta profissão nos EUA do início do século XX: “se os engenheiros possuem algum papel na sociedade, este deve ser o de um aliado dos homens de negócios”.

Mas por outro lado, como profissional-chave dos tempos modernos, ele nasce imerso em uma cultura fortemente marcada pelos ideais de liberdade, justiça, dignidade, responsabilidade e autonomia. Deve se fazer portador desses ideais e da missão de realizá-los mediante projeto, construção e gerência de sistemas concretos com inevitável impacto socioambiental.

Assim, são por um lado nobres e elevados, por outro desafiadores e complexos, os reptos lançados em face do engenheiro da contemporaneidade e do futuro. Enfrentar os mais variados problemas, tipicamente interdisciplinares e “fora da caixa” será seu destino. Ele deverá ser sobretudo um engenheiro, artista e poeta da resolução de problemas. Problemas estes a um só tempo técnicos, sociais e econômicos.

⁶ Cf. assertiva do Prof. D.Sc. Roberto Cintra Martins, em entrevista no Rio de Janeiro, 28 de abril de 2012.

1.2.2.

A “Cabeça de Engenheiro”, a premência por uma nova formação e o aprendizado por resolução de problemas

Em um interessante artigo, SCHNAID *et al.* (2001) apresentam algumas considerações sobre características definidoras do modo de pensar e agir do engenheiro. Em uma abordagem bastante criativa ainda que um tanto personalista, os autores argumentam que tais características são encontradas com frequência nos mais diferentes contextos socioculturais, desde a Pré-História até a atualidade.

Assim, ainda que hoje a atividade transformadora das condições ambientais, em contextos anteriores à Modernidade, nem sempre pudesse ser enquadrada facilmente como “engenharia”, mesmo assim é possível identificar em seus agentes um perfil “oculto”, um modo de raciocinar, planejar e agir que muito se assemelha ao do profissional hoje denominado como engenheiro. Em uma curiosa e feliz expressão, os autores se referem aqui a uma “cabeça de engenheiro”.

Neste ponto, é marcante para este estudo o fundamento da argumentação: os autores tecem uma narrativa pertinente, que vai do homem das cavernas aos cidadãos das sociedades contemporâneas de base tecnológica pós-industrial, na qual sempre aparece a postura observadora e reflexiva, um misto de confronto com desafios, enfrentamento de novas experiências, planejamento, antecipação e execução de operações concretas, conducentes à superação de problemas. Em outras palavras, de acordo com o argumento dos autores, ao postular a atuação onipresente da “cabeça de engenheiro”, é de que esta sempre se fez necessária para resolver e superar problemas, ameaças e desafios que nunca deixaram de se apresentar diante do homem.

Trata-se aqui portanto da existência, desde tempos imemoriais, do aprendizado a partir do enfrentamento de problemas. Dito ainda de outro modo, os autores consideram, ainda que não explicitamente, que a evolução do conhecimento prático e aplicado - do conhecimento por assim dizer “engenhairístico” - sempre se deu ao longo da História (e da Pré-História) com base na resolução de problemas através de desenvolvimento de projetos. Ao se falar da evolução da engenharia, poder-se-ia aqui falar que a resolução de problemas tem sido, desde sempre, uma constante decisiva na evolução cognitiva do homem e que o método utilizado para desenvolver os projetos de

resolução de tais problemas remete à evolução de sua forma de pensar, a forma de pensar típica da “cabeça de engenheiro”.

Ainda que por si mesmas tais reflexões sejam (positivamente) bastante provocativas, os autores não se resumem apenas a elas. A partir dessa visão muito abrangente, também tecem considerações especificamente pertinentes ao contexto atual, focando nas exigências para a formação do engenheiro tendo em vista os paradigmas da sociedade pós-industrial.

Em uma postura crítica remetem à incapacidade dos atuais cursos de engenharia, em especial no Brasil, para atender a tais exigências e sugerem a necessidade de institucionalização de mudanças destinadas a reposicionar o engenheiro no contexto do desenvolvimento social e econômico do país, através de um ensino de engenharia que seja capaz de formar profissionais com as características históricas da “cabeça de engenheiro”, tais como habilidade de cálculo, objetividade, espírito prático, além de criatividade, comunicabilidade, familiaridade com a cultura do autoaprendizado, da incerteza e da complexidade.

Nestas conclusões de caráter eminentemente atual o pensamento de SCHNAID *et al.* (2001) se aproxima das proposições de NOSE e REBELATTO (2001) . Sem recorrer à narrativa histórica, estes últimos autores focam no contexto presente e, a partir da constatação das profundas transformações mundiais recentes em nível industrial e econômico, enfatizam os requisitos necessários à sustentação da competitividade das empresas no ambiente altamente competitivo da economia globalizada.

O demanda principal do artigo em pauta é o de que os profissionais dessas organizações precisam com urgência se adequar ao novo cenário e às suas exigências em termos das novas competências requeridas. Daí vêm as evidências comprovadas empiricamente da necessidade de complementar a formação técnica do engenheiro com noções e conhecimentos em diversas outras áreas como finanças, economia, *marketing*, psicologia do trabalho. Entretanto tais áreas do conhecimento ainda não são suficientes para o devido preparo do profissional. Ele também precisa desenvolver características, atitudes e habilidades para trabalhar em grupo e liderar pessoas, bem como para trabalhar com diversos tipos de conflitos e pressões.

Segundo os autores, as empresas deverão moldar o perfil do profissional ao mesmo tempo em que as mudanças e experiências da vivência profissional irão alterar seu comportamento e desenvolvimento. Todavia cabe à universidade e às demais instituições de ensino de engenharia anteciparem-se a esse processo tipicamente intraempresa, pesquisando e identificando as

principais atitudes, habilidades e conhecimentos que as organizações esperam do profissional de engenharia.

Portanto faz todo sentido desenvolver pesquisas com o objetivo de verificar em quais aspectos a universidade deve se orientar para promover uma adequação em sua estrutura curricular, de maneira a formar profissionais de acordo com as necessidades do mercado de trabalho e da sociedade como um todo.

Aqui mais uma vez pode-se “ouvir” a demanda por um novo tipo de aprendizado e de formação do engenheiro, que o prepare para encarar os problemas que de fato irão confrontá-lo em sua futura profissão e o deixe alerta e pronto para a busca de uma formação contínua, que lhe será constantemente exigida.

1.3. Contexto Atual

*“viva a certeza de que faz parte
de sua tarefa docente não apenas
ensinar os conteúdos mas também
ensinar a pensar certo.”*
Paulo Freire

Qual o lugar do engenheiro na sociedade atual? Deve ele só pensar no projeto que desenvolve, ou deveria ele analisá-lo também quanto à sua inserção, preocupando-se assim com seu impacto econômico, social, político, ecológico e ético? Pode um engenheiro nos dias de hoje atuar sem habilidades interpessoais, como comunicação, trabalho em equipe e liderança? Pode ele se furtar a dimensionar seus projetos quanto ao custo, ao prazo, à necessidade de mão-de-obra especializada e às legislações? Deve ele ser capaz de tomar decisões e estar atualizado ou lhe é permitida a obsolescência de metodologia/tecnologia?

Ao responder estas questões depara-se com um verdadeiro abismo entre o que é ensinado hoje na maioria das universidades de renome do país e o que as diversas partes interessadas esperam de um engenheiro recém-formado.

A sociedade espera hoje que um engenheiro seja capaz de enxergar as consequências de seu trabalho nos cenários econômico, social, político, ecológico e ético e com isso ajudar a sociedade em seu progresso e organização. A pergunta “Como engenheiros podem ser mais bem educados para se tornarem líderes, capazes de balancear os ganhos advindos de novas

tecnologias com as vulnerabilidades criadas pelos seus subprodutos sem comprometer o bem-estar da sociedade e da humanidade?”⁷ levantada por um estudo da NAE (Academia Nacional de Engenharia dos EUA) em 2004 sobre o engenheiro de 2020 mostra que estas preocupações já estão no centro de organizações importantes.

Quando se procura consequências destas questões na academia, encontram-se no currículo da engenharia, quando muito, disciplinas isoladas responsáveis pela árdua tarefa de tentar passar aos alunos noções de ética ou de legislação. Elas são encaradas pelos estudantes e por grande parte do corpo docente como cadeiras secundárias, sem importância e nexo com as outras disciplinas de carácter técnico. Questões reais e urgentes como estas, que deveriam acompanhar e serem levantadas em todo o percurso destes estudantes dentro das universidades, são deixadas para serem abordadas por professores com formações distintas daquelas que os jovens almejam e por isso acabam por serem encarados como pessoas que, por não fazerem parte do universo destes alunos, seriam demasiadamente idealistas e distantes da perspectiva real do ambiente de trabalho.

De acordo com o D.Sc. Claudio Starec⁸, especialista em educação corporativa, as estatísticas mais otimistas apontam que a indústria aproveita somente 30% do conhecimento deste recém-formado nas atividades que vai desempenhar. Fica a cargo da empresa ensinar os restantes 70% para que após alguns anos possa ter o profissional que deseja, o que torna o posicionamento do recém saído do mundo acadêmico muito difícil.

É possível entender que um engenheiro mecânico alocado em projetos de motores a combustão e outro alocado em manutenção de máquinas siderúrgicas necessitarão de conhecimentos distintos muito específicos de sua área de atuação, o que torna inviável cobrir durante cinco anos de curso todas as especificidades da indústria no ramo da engenharia mecânica. Mesmo assim, é difícil aceitar como satisfatório que a formação universitária será responsável por apenas um terço do que é necessário para que o profissional desta área exerça suas funções.

As empresas de hoje esperam que seus *trainees* tenham conhecimentos de gerenciamento de projetos, tomada de decisão e saibam trabalhar em equipe.

⁷Tradução livre para: “How can engineers best be educated to be leaders, able to balance the gains afforded by new technologies with the vulnerabilities created by their byproducts without compromising the well-being of society and humanity?” (pág. 2)

⁸ Cf. entrevista realizada em 3 de dezembro de 2012

Conforme KAMP (2011), engenheiros “não devem aprender somente a resolver corretamente o problema, mas também a resolver o problema correto”⁹. Nas grandes escolas de engenharia do país, a visão de gerenciamento de projetos não faz parte dos currículos, assim como as questões de prova não auxiliam no desenvolvimento de tomadas de decisão. Se o ferramental técnico é tão importante para equipar o aspirante a engenheiro a tomar as decisões corretas, a falta de exposição a um cenário realista torna precária a transposição deste conhecimento para a prática.

Outra barreira que em muito atrapalha o recém-formado em sua adaptação ao mundo corporativo é a diferença entre as formas de trabalho em sua graduação - em que tudo se resume ao seu desempenho individual, onde não depende da cooperação de outros para o seu sucesso e praticamente todas as formas de medir seu progresso são por meio de avaliações escritas individuais - e na empresa, onde quase sempre o resultado será advindo de um esforço coletivo, a produção e desenvolvimento nunca se dá de forma isolada e onde importam avaliações subjetivas e oriundas de impressões de outras pessoas, por vezes seus pares, outras vezes superiores e outras ainda subordinados à sua pessoa.

Como enfatiza FELDER *et al.* (2000), “pesquisa após pesquisa, representantes da indústria colocam comunicação e trabalho em equipe no topo da lista de habilidades desejadas nos engenheiros recém-formados”¹⁰, sendo características decisivas para uma carreira bem-sucedida. A inteligência linguística (utilizando aqui a definição de GARDNER - 2002), junto com as inteligências interpessoal e lógica, é hoje bastante valorizada em empresas de engenharia, pois se espera que um líder seja capaz de se expressar bem (por escrito e oralmente) e tenha alta sensibilidade para entender pontos de vista alheios, características da inteligência linguística. E por fim, como diz DE OLIVEIRA (2015, pág. 2): “*Só a postura de estudo e aprimoramento permanente torna possível a sobrevivência profissional em um mundo de economia e conhecimentos globalizados*”.

O método tradicional adotado, aquele em que o professor (detentor do conhecimento) dá uma aula expositiva sobre o tema e esclarece dúvidas, não mais responde aos anseios da sociedade, da indústria e nem mesmo do poder

⁹Tradução livre para: “...have not only to learn to solve the problem right, but also to solve the right problem.” (pág. 4)

¹⁰Tradução livre para: “In survey after survey, representatives of industry place communication and teamwork at the top of their lists of desirable skills for new engineering graduates.” (pág. 12)

público. Ele não ensina habilidades como comunicação e liderança; e nem atitudes, como a preocupação com o impacto socioambiental, ética e aprendizagem continuada, citadas em BANKEL *et al.* (2003) como habilidades e atitudes primordiais no profissional do século XXI. Para agravar ainda mais, as gerações atuais de alunos estão cada vez mais alinhadas às novas tecnologias e por isso se tornam mais facilmente enfiadas pela forma maçante com a qual o conhecimento é passado. Enquanto há trinta anos os alunos tinham um mesmo recurso (o livro) como meio (no sentido de *media*) onde pesquisar o conhecimento, tanto na universidade como fora dela, hoje os recursos são vastos e de difícil domínio daquele professor que se atém a uma aula expositiva.

A metodologia tradicional de ensino acumulou durante as últimas décadas um enorme volume de informações que assustam os alunos de engenharia de tal forma que hoje, de acordo com o censo da educação superior realizado pelo INEP (Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira) em 2013, os índices de desistências alcançam mais da metade dos estudantes, a maior parte desta antes mesmo do ciclo profissional.

Utilizando coerentemente a forma de pensar e agir característica de um engenheiro, após diagnosticado este contexto como acima descrito, cabe ir além da crítica, sugerindo soluções viáveis e consistentes, para sua superação. Este trabalho se insere nesta corrente visando apresentar uma possível resposta.

Neste sentido, apresentar-se-á a modelagem de bicicletas e motocicletas, para em seguida descrever aparatos educacionais desenvolvidos para auxiliar no entendimento desses veículos. Depois o leitor será levado a um breve estudo sobre aprendizagem ativa para então, passando pela análise dos cursos de engenharia mecânica e de controle e automação, ser apresentado às propostas de novas soluções educacionais criadas em torno dos veículos.

1.4. Estrutura do Trabalho

Este trabalho está organizado de tal forma que o leitor seja conduzido pelos seus dois objetivos gerais, quais sejam, a modelagem da dinâmica de veículos de duas rodas de bitola zero e a apresentação de solução para a obsolescência do método de ensino tradicional, passando pelos temas que os permeiam e os conectam. Com isso espera-se clarificar a motivação que levou à escolha destes dois temas, que a princípio poderiam parecer um tanto distantes,

mas que se complementaram de forma a possibilitar o trabalho aqui desenvolvido.

Ainda por se tratarem de temas que são tradicionalmente abordados em separado, optou-se por colocar a revisão bibliográfica de forma paulatina, dedicando um item a esta tarefa em cada um dos próximos três capítulos. Nestes itens serão apresentados os resumos dos trabalhos relevantes que forem referentes ao tema do capítulo em que se inserem.

Assim, no próximo capítulo, intitulado “Modelos de bicicletas e motocicletas para aplicações em análise e simulação dos controles de estabilidade e trajetória”, será descrito o percurso do autor para o entendimento da dinâmica de tais veículos, percurso este que começou pelo estudo orientado com foco neste tema. Depois, ao se juntar ao grupo de trabalho de dinâmica de veículos de duas rodas da PUC-Rio, o autor fez uma revisão bibliográfica mais aprofundada (que será apresentada), chegando a um modelo mais completo. Por último, apresenta-se a modelagem desenvolvida por esse grupo, que se utiliza das técnicas de Grafo de Ligação e Fluxo de Potência.

No terceiro capítulo serão descritos aparatos educacionais existentes no LDSM (Laboratório de Desenvolvimento de Sistemas Mecatrônicos da PUC-Rio) construídos para auxiliar no entendimento desses veículos, tornando possível a visualização de conceitos de complexidade considerável. As modelagens destes dispositivos serão apresentadas, assim como suas propostas de desenvolvimento. Neste capítulo também será apresentada uma revisão bibliográfica dos trabalhos encontrados neste campo.

No capítulo seguinte será apresentado um breve estudo sobre aprendizagem ativa, discutindo à luz de seu histórico, sua importância para o aprendizado e para a fixação do conhecimento. Maior enfoque será dado à metodologia PBL¹¹, pois acredita-se que esta possa ser bem adequada como solução à problemática já levantada. No item dedicado a este método (4.2) serão apresentados seu histórico e suas características, e serão discutidos seus desafios, suas vantagens e suas restrições, assim como as premissas para sua adoção. A revisão bibliográfica desta metodologia será apresentada (em “4.2.4 - Pesquisas sobre sua implementação e eficácia”) e será fornecida uma apostila com as etapas e os papéis dos diversos envolvidos.

No quinto capítulo serão descritos os cursos de Engenharia Mecânica e de Controle e Automação da PUC-Rio, analisando seus projetos pedagógicos, as

¹¹Esta sigla recebe diversas interpretações e variações, e a sua definição dentro deste trabalho terá maior detalhamento no subitem 4.2.

disciplinas, os percursos e as estruturas curriculares. Em um segundo momento retomou-se o conhecimento sobre bicicletas, comparando-o às disciplinas desses cursos, traçando assim um paralelo do que se pode abordar em projetos nos quais esse veículo seja tema. Para alcançar tal objetivo, desenvolveram-se tabelas conectando as disciplinas às partes da bicicleta, a seu comportamento e ao que a envolve. Para melhorar a visualização do que foi colocado em tabelas, optou-se por traçar um esboço de mapa conceitual de bicicletas e ligar seus conceitos às disciplinas correspondentes. As figuras resultantes desse esforço são apresentadas ao final deste capítulo.

Coube ao sexto capítulo lançar mão dos conhecimentos desenvolvidos no segundo, utilizando-se dos aparatos apresentados no terceiro, seguindo a metodologia descrita no quarto, para sugerir soluções às questões levantadas no quinto capítulo. Assim, nesta última parte do trabalho em questão, trata-se de apresentar sugestões de projetos em PBL centrados na temática de motocicleta/bicicleta. Serão descritos três projetos em maior detalhe, onde suas relevâncias serão discutidas, seus objetivos de aprendizagem serão expostos, suas dinâmicas de aula serão propostas e seus recursos serão aconselhados. Nesses projetos exemplos de apostilas de aluno e de tutor serão dadas. Além desses projetos, outros seis temas serão sugeridos e suas possibilidades de abordagem, assim como objetivos de aprendizagem, serão discutidos. O intuito deste capítulo é indicar que é possível cobrir a maior parte dos conhecimentos, habilidades e atitudes discutidas no subitem 1.3, através de projetos dentro da metodologia PBL.

Para terminar este percurso, o capítulo de considerações finais acena para a adequabilidade do método escolhido na tarefa de atualização do ensino de engenharia no Brasil. Também são indicados novos caminhos a serem seguidos, tanto na modelagem de tais veículos, como no estudo e na utilização da metodologia pesquisada.

2

Modelos Dinâmicos de Bicicletas e Motocicletas para Aplicações em Análise, Simulação e Controle de Estabilidade e Trajetória

*“Um dia eu vou viver em teoria,
porque, em teoria, tudo vai bem.”*
Autor Desconhecido

A proposta deste capítulo é a análise de modelagens em diferentes níveis de complexidade da dinâmica de bicicletas/motocicletas, a fim de discutir suas vantagens e desvantagens. Também é objetivo do capítulo determinar a melhor modelagem na qual possa ser aplicado o controle de estabilidade, trajetória e velocidade de veículos de duas rodas com bitola nula.

2.1. Introdução

Muito tem sido desenvolvido na área de controle de veículos nos últimos anos e bicicletas/motocicletas não são exceções. Ao analisar a dinâmica e o controle de estabilidade, trajetória e velocidade deste tipo de veículo, aplica-se boa parte da árvore de conhecimento que envolve as Engenharias Mecânica e de Controle e Automação.

Ao se discutir o projeto de um veículo de duas rodas com bitola nula, entendendo sua dinâmica em diversos níveis de complexidade e depois escolhendo o mais apropriado para a aplicação do controle autônomo, tem-se a possibilidade de apresentar diversos campos do conhecimento que envolvem a formação do engenheiro (principalmente mecatrônico) de forma prática, mostrando possíveis soluções a desafios encontrados para a implantação da automação em diversos projetos da indústria para diferentes complexidades.

2.2. Revisão Bibliográfica

O desenvolvimento do entendimento das propriedades estabilizadoras de bicicletas e motocicletas, assim como de suas modelagens vem ocorrendo

gradualmente desde o século XIX até os dias de hoje. Uma revisão bibliográfica dos principais artigos na área remete a trabalhos, ainda hoje bastante discutidos, que datam da segunda metade do século XX. Progressos também podem ser encontrados nos últimos anos. Para visualizar melhor onde os avanços pretendidos neste trabalho se situam, cabe fazer aqui uma breve revisão dos principais trabalhos na área.

Além das referências que serão aqui sinteticamente apresentadas, foram utilizados os trabalhos de ASTROM et al. (2005), SPERANZA NETO (2011) e MEIJAARD et al. (2007), dando origem aos dois próximos resumos críticos. O primeiro resumo (subitem 2.3) foi baseado nas duas primeiras referências aqui citadas, enquanto o segundo resumo (subitem 2.4) foi feito a partir da terceira referência.

2.2.1. “The Stability of the Bicycle”

Neste artigo JONES (1970) discorre sobre diversas suposições que tece sobre a estabilidade de tal veículo. Ao total ele constrói seis teorias para a estabilidade dinâmica da bicicleta e as testa empiricamente, construindo para tanto bicicletas modificadas que anulam ou intensificam os efeitos a serem analisados. Apesar do trabalho não contar com quase nenhuma validação em termos de modelagem matemática ele é, por suas conclusões práticas, referência de muitos trabalhos que o sucedem. Das conclusões tiradas pelo autor, as duas principais são que o efeito giroscópio das rodas tem pouca importância na estabilidade da bicicleta, enquanto o “trail” (propriedade que será detalhada em 2.3) além de estabilizante, tem importante papel no auto-alinhamento da roda dianteira.

2.2.2. “System Dynamics and Control of Bicycles at High Speeds”

O trabalho de SURYANARAYANAN, TOMIZUKA, e WEAVER (2002) tem por objetivo apresentar controladores clássicos de velocidade de rolagem em bicicletas adaptados para duas situações distintas: de direção dianteira em altas velocidades (intervalos de 110km/h a 160km/h) e de direção traseira naturalmente instáveis, conhecidas como “Klein’s unridable bicycles”¹², em

¹²Em tradução livre: bicicletas impossíveis de se conduzir do Klein

referência ao Prof. Richard Klein, um estudioso das propriedades da bicicleta. Os autores apresentam a importância da implementação de controladores para bicicletas em altas velocidades, utilizando como argumento a incidência de fatores desestabilizantes (rajadas de ventos e ventos laterais) e a limitação do ser humano quanto ao tempo de resposta. Para o segundo tipo de veículo, sua natureza instável por si só já justifica a necessidade de aplicação de controle. Os modelos utilizados sofrem simplificações questionáveis, como utilização de pêndulo invertido simples (condutor rigidamente conectado ao chassi) e dinâmica no plano, mas os resultados das simulações parecem corroborar a utilização eficaz do controle. Os autores comentam que já estariam implementando testes experimentais para validação dos modelos, mas não foi encontrado artigo que apresentasse tais resultados.

2.2.3.

“A Bicycle Model for Education in Multibody Dynamics and Real-Time Interactive Simulation”

Utilizando-se do modelo de bicicleta de “Whipple” (apresentado com detalhes em 2.4.2) como exemplo de sistema multi-corpos, ESCALONA e RECUERO (2012) detalham sua cinemática, apresentando a escolha dos sistemas de coordenadas, seus graus de liberdade e suas restrições (holonômicas e não-holonômicas), e desenvolvendo seu equacionamento. Em seguida, através da utilização das equações de Lagrange, os autores obtêm as equações da dinâmica da bicicleta, primeiro como equações diferenciais algébricas para depois, através do *método de particionamento* das coordenadas *generalizadas*, gerar o sistema de equações diferenciais ordinárias equivalente. *Simulações computacionais e realização de experimentos reais (através de instrumentação eletrônica de uma bicicleta) são efetuadas para a validação do modelo e os resultados são satisfatórios. Por fim, são apresentados de forma breve um simulador interativo de tempo real e uma proposta de curso de dinâmica de sistemas multi-corpos baseado no comportamento de uma bicicleta.*

2.2.4.

“Single-track Vehicle Modeling and Control – Bicycles, Motorcycles, and Models”

Neste trabalho de considerável amplitude, LIMEBEER e SHARP (2006) começam por apresentar o histórico do desenvolvimento de bicicletas e

motocicletas. Os autores discorrem também sobre a história da modelagem e do controle de cada um desses veículos, analisando as características dos dois principais modelos de bicicletas até hoje utilizados, quais sejam, o de Whipple (conforme apresentado em 2.4.2) e o de Timoshenko e Young, (apresentado em S. Timoshenko and D.H. Young, *Advanced Dynamics*. New York: McGraw-Hill, 1948).

Além de suas equações de dinâmica, os autores apresentam a modelagem matemática de diversos aspectos que envolvem a modelagem desses veículos, como a influência do “trail”, do efeito giroscópico, do efeito pneumático dos pneus, sistema de amortecedores, piloto, flexibilidade do chassi, entre outros. Eles fazem também a análise de estabilidade de malha aberta e fechada (através da interpretação dos polos e zeros), rodando simulações e analisando os resultados obtidos à luz do comportamento real esperado.

2.3. Estudo Preliminar da Dinâmica e Introdução ao Controle de Veículos com Duas Rodas

2.3.1. Introdução

O estudo apresentado a seguir é resultado do primeiro esforço deste autor no desenvolvimento da modelagem da dinâmica e do controle aplicado a bicicletas. Ele foi tema do relatório final da disciplina de estudo orientado que este autor cursou em 2012, sob tutela do Prof. D.Sc. Mauro Speranza Neto, que tinha como foco justamente o entendimento da dinâmica e do controle de veículos de duas rodas com bitola zero.

2.3.2. Parâmetros

Para o estudo dos fatores responsáveis pela estabilidade dinâmica da bicicleta, serão utilizados alguns parâmetros necessários ao entendimento do problema. Ao examinar a Fig. 2.1 extraída de SPERANZA NETO (2011), que é um esquemático simplificado de uma bicicleta, observam-se alguns dos parâmetros: a altura (h) do centro de massa (CM) ao solo; as distâncias entre eixos (l), e dos eixos dianteiro (l_d) e traseiro (l_t) ao centro de massa; os centros das rodas dianteira (C_d) e traseira (C_t); os pontos de contato no solo dos pneus

dianteiro (P_d) e traseiro (P_t); o ângulo do eixo de esterçamento do garfo (λ - “head”); o “trail” (t); e a projeção do eixo de esterçamento até o solo (P).

Para este trabalho o modelo será simplificado, não considerando a flexibilidade do quadro da bicicleta, o deslizamento dos pneus ou a presença de amortecimento. Também não foi levada em conta a ação aerodinâmica estabilizante, já que na faixa de velocidades normalmente desenvolvidas por bicicletas este efeito não chega a ter uma influência considerável.

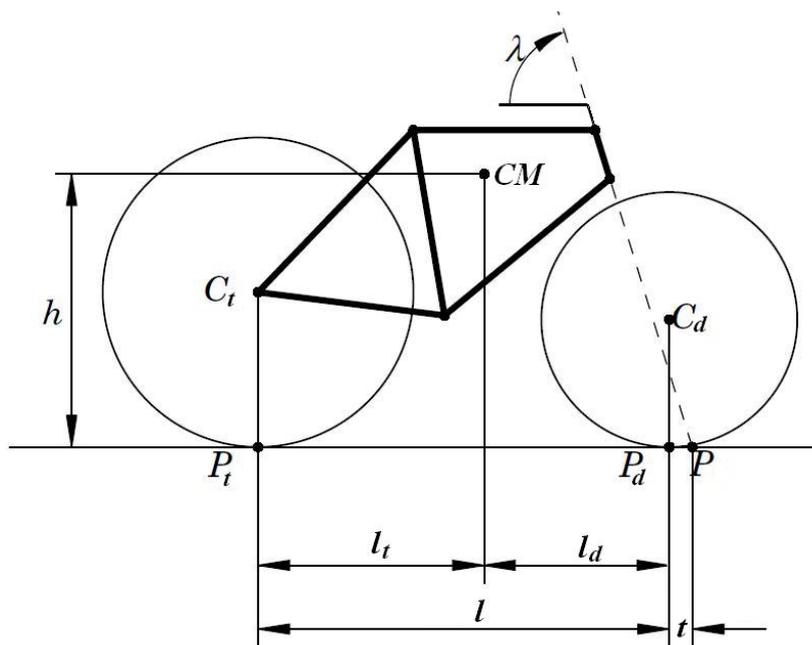


Figura 2.1 – Parâmetros de uma bicicleta - Fonte: SPERANZA NETO (2011)

Os dois modelos a seguir são um resumo de SPERANZA NETO (2011) e todas as equações e figuras foram de lá extraídas.

2.3.3. Cinemática no plano

Para facilitar o entendimento em um primeiro momento este modelo pode ser simplificado para a cinemática no plano XY, e pode ser representado como na Fig.2.2.

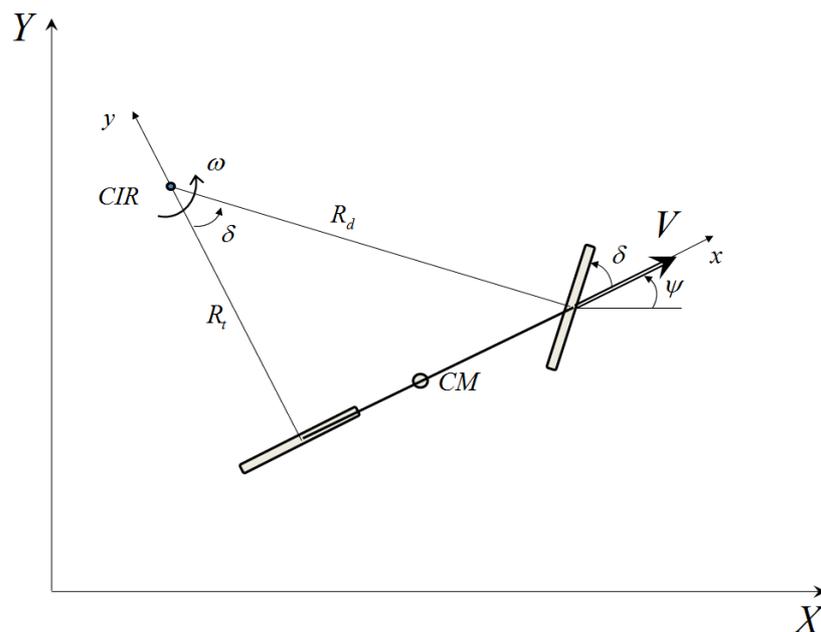


Figura 2.2 – Cinemática lateral de uma bicicleta em curva - Fonte: SPERANZA NETO (2011)

A partir da Fig. 2.2 e levando em conta a premissa de que não há deslizamento (derrapagem) lateral dos pneus, a velocidade de rotação (ω) é dada por:

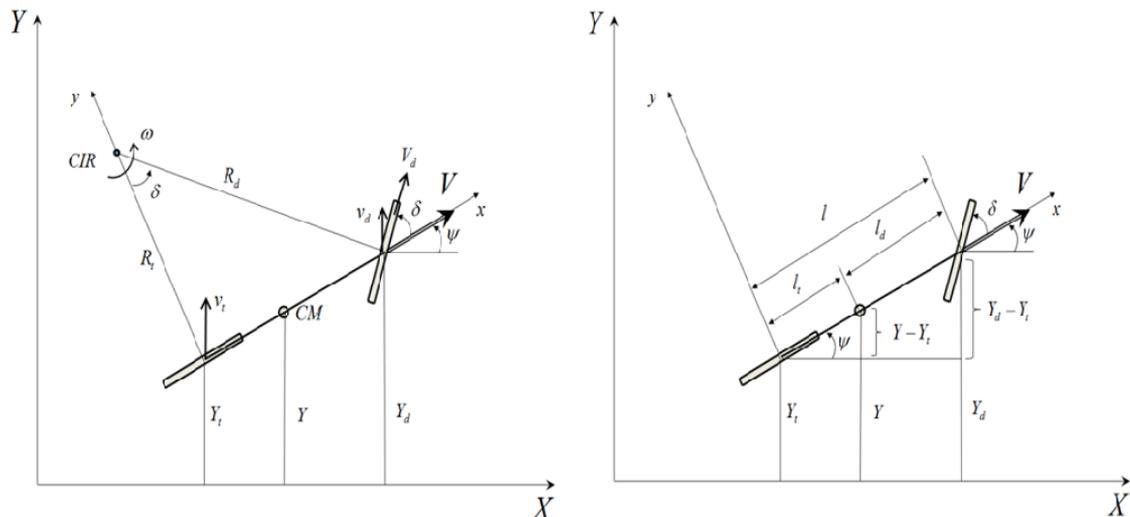
$$\omega = \frac{V}{R_t} \quad (2.1)$$

na qual V é a velocidade de translação e R_t é o raio de curvatura do eixo traseiro. Logo, sendo R_d o raio de curvatura do eixo dianteiro, e como não há deslizamento (derrapagem) lateral do pneu dianteiro, a velocidade de translação do eixo dianteiro (V_d) na direção da roda dianteira (Fig.2.3a) é:

$$V_d = R_d \omega = R_d \frac{V}{R_t} = R_d \frac{V}{R_d \cos \delta} = \frac{V}{\cos \delta} \quad (2.2)$$

Pela Figura 2.3a nota-se que as velocidades laterais (na direção Y) dos pontos de contato dos pneus dianteiro e traseiro (v_d e v_t) são dadas por:

$$\begin{cases} v_d = \frac{V}{\cos \delta} \text{sen} (\delta + \psi) \\ v_t = V \text{sen} \psi \end{cases} \quad (2.3)$$



(a) velocidades e deslocamentos laterais (b) deslocamento lateral do CM e ângulo de guinada

Figura 2.3 – Comportamento lateral de uma bicicleta - Fonte: SPERANZA NETO (2011)

Observa-se pela Fig. 2.3b que o ângulo de guinada (ψ) é determinado por:

$$\psi = \text{sen}^{-1}\left(\frac{(Y_d - Y_t)}{l}\right) \quad (2.4)$$

$$\frac{(Y_d - Y_t)}{l} = \frac{(Y - Y_t)}{l_t} \Rightarrow (Y_d - Y_t)l_t = (Y - Y_t)l \Rightarrow Y_d l_t - Y_t l_t + Y_t l = Yl \quad (2.5)$$

Considerando manobras com pequenos ângulos de esterçamento ($\delta < 10^\circ$) e pequenos ângulos de guinada ($\psi < 10^\circ$), e utilizando a transformada de Laplace, tem-se que:

$$\begin{cases} \dot{Y}_d \cong V(\delta + \psi) \\ \dot{Y}_t \cong V\psi \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} sY_d(s) \cong V(\delta(s) + \psi(s)) = \frac{V^2}{l s} \left(\frac{l}{V}s + 1\right)\delta(s) \\ sY_t(s) \cong V\psi(s) = \frac{V^2}{l s}\delta(s) \end{cases} \quad (2.6)$$

Com isso a função de transferência do deslocamento lateral do CM em relação ao ângulo de esterçamento é dada por:

$$\left. \begin{aligned} \frac{Y_d(s)}{\delta(s)} &= V \left(s + \frac{V}{l} \right) \frac{1}{s^2} \\ \frac{Y_t(s)}{\delta(s)} &= \left(\frac{V^2}{l} \right) \frac{1}{s^2} \\ Y(s) &= \frac{Y_d(s) l_t + Y_t(s) l_d}{l} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{Y(s)}{\delta(s)} = \frac{V l_t}{l} \left(s + \frac{V}{l_t} \right) \frac{1}{s^2} \quad (2.7)$$

A Figura 2.4 mostra a distribuição de polos e zero desta função da transferência.

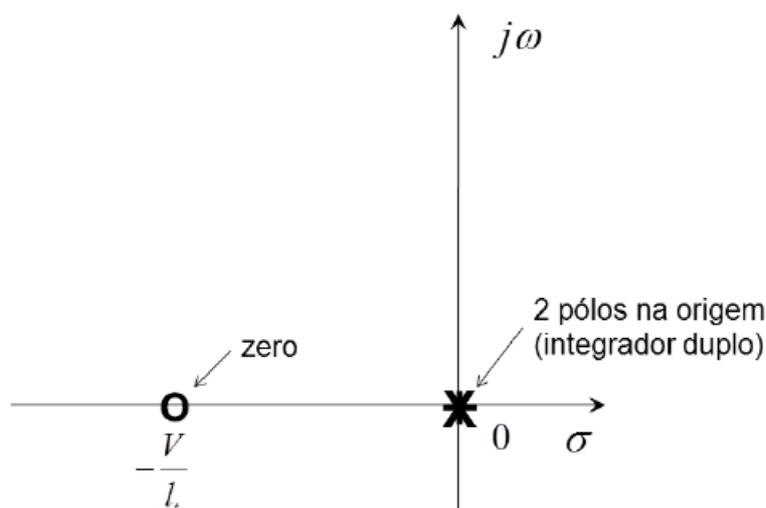


Figura 2.4 – Plano s para $Y(s)/\delta(s)$ - Fonte: SPERANZA NETO (2011)

As análises de resposta para diferentes entradas, assim como a validação deste modelo e desenvolvimento mais detalhado encontra-se em SPERANZA NETO (2011). Os resultados obtidos a partir deste modelo para diferentes entradas não descrevem satisfatoriamente o comportamento de uma bicicleta em curva visto que não consideram a sua inclinação lateral, o efeito do desalinhamento da projeção do eixo de esterçamento e o ponto de contato do pneu frontal com o solo e o efeito giroscópico. A seguir um modelo é sugerido para tratar da influência da inclinação lateral.

2.3.4. Dinâmica de um pêndulo invertido

Para modelar o comportamento de uma bicicleta em curva considerando sua inclinação lateral foi analisada a dinâmica de um pêndulo invertido com base

móvel, ilustrado na Fig.2.5 (vista frontal da bicicleta), na qual se encontram indicadas as principais variáveis e parâmetros associados ao modelo a ser desenvolvido. O deslocamento de base $Y(t)$ representa o deslocamento lateral do centro de massa determinado na modelagem anterior, e o emprego do modelo de pêndulo permitirá estabelecer o acoplamento dos dois modelos, gerando uma primeira representação para a dinâmica de uma bicicleta em curva.

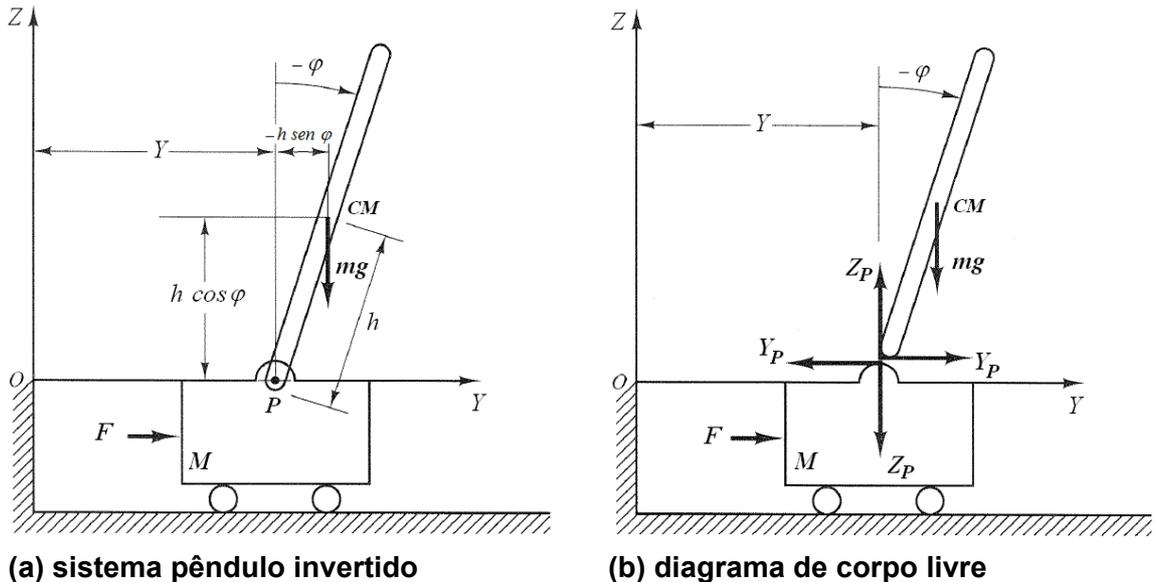


Figura 2.5 – Pêndulo invertido com base móvel - Fonte: SPERANZA NETO (2011)

As equações de movimento do pêndulo invertido com base móvel com as coordenadas do centro de massa do pêndulo no plano ZY são dadas por:

$$\begin{cases} Y_{CM} = Y - h \operatorname{sen} \varphi \\ Z_{CM} = h \operatorname{cos} \varphi \end{cases} \quad (2.8)$$

O movimento de rotação da haste do pêndulo (chassis da bicicleta com o condutor rigidamente conectado) em torno do centro de massa é descrito por:

$$\sum_{CHASSIS} M_{CM} = J_X \frac{d^2 \varphi}{dt^2} \Rightarrow J_X \ddot{\varphi} = Z_P \operatorname{sen} \varphi h + Y_P \operatorname{cos} \varphi h \quad (2.9)$$

na qual J_X é o momento de inércia do conjunto chassis+condutor. O movimento horizontal do CM do chassis+condutor é dado por:

$$\sum_{CHASSIS} F_Y = m \frac{d^2 Y_{CM}}{dt^2} \Rightarrow m \frac{d^2 (Y - h \operatorname{sen} \varphi)}{dt^2} = Y_P \quad (2.10)$$

O movimento vertical do CM da haste do pêndulo é descrito através da equação:

$$\sum_{CHASSIS} F_Z = m \frac{d^2 Z_{CM}}{dt^2} \Rightarrow m \frac{d^2 (h \cos \varphi)}{dt^2} = Z_P - mg \quad (2.11)$$

O movimento horizontal da base móvel (que no caso da bicicleta não existe, mas há o deslocamento horizontal do centro de massa) é expresso por:

$$\sum_{BASE} F_Y = M_{BASE} \frac{d^2 Y_{BASE}}{dt^2} \Rightarrow M \frac{d^2 Y}{dt^2} = F - Y_P \quad (2.12)$$

Linearizando as equações acima para pequenos ângulos de inclinação ($\varphi > 10^\circ$) e considerando no caso da bicicleta $F = 0$ e $M = 0$, tem-se que:

$$\left. \begin{array}{l} J_X \ddot{\varphi} = Z_P \varphi h + Y_P h \\ m (\ddot{Y} - h\ddot{\varphi}) = Y_P \\ 0 = Z_P - mg \end{array} \right\} \Rightarrow \ddot{\varphi} (J_X + mh^2) - mgh\varphi = mh\ddot{Y} \quad (2.13)$$

A função de transferência entre o ângulo de rolagem (ou de inclinação) e o deslocamento lateral do centro de massa será então:

$$\frac{\varphi(s)}{Y(s)} = \frac{mh s^2}{(J_X + mh^2) s^2 - mgh} = \frac{mh}{(J_X + mh^2)} \left(\frac{s^2}{s^2 - \frac{mgh}{(J_X + mh^2)}} \right) \quad (2.14)$$

Como pode ser vista na Fig. 2.6, a função de transferência tem um dos polos real positivo, o que torna o sistema associado instável. Assim verifica-se a necessidade de uma lei de controle para tentar eliminar a instabilidade natural deste sistema.

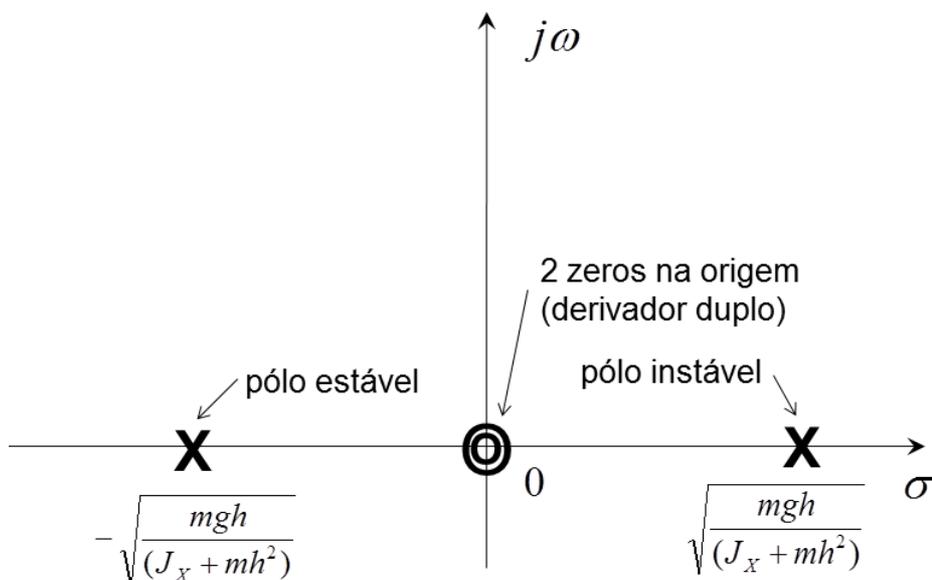


Figura 2.6 – Plano s para $\varphi(s)/Y(s)$ - Fonte: SPERANZA NETO (2011)

O modelo completo do sistema bicicleta em malha aberta (sem controle) é representado no diagrama de blocos da Fig. 2.7, no qual a entrada é o ângulo de esterçamento no guidão e a saída é o ângulo de inclinação do conjunto chassi+condutor, sendo o deslocamento lateral do centro de massa uma variável interna.

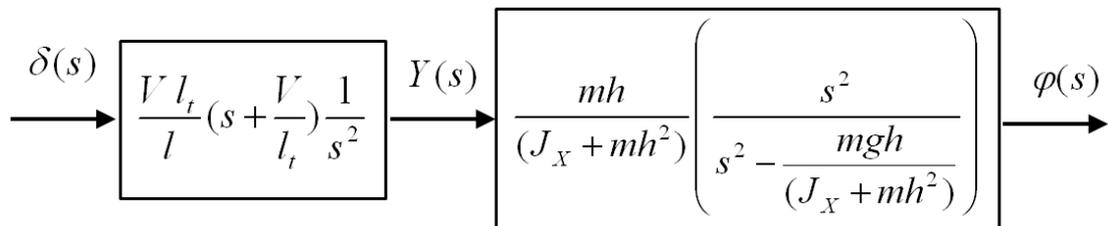


Figura 2.7 – Malha aberta do sistema bicicleta - Fonte: SPERANZA NETO (2011)

Nota-se que os dois polos na origem de $Y(s)/\delta(s)$ serão cancelados pelos dois zeros na origem de $\varphi(s)/Y(s)$, resultando na distribuição de zero e polos como na Fig.2.8. Isso significa que a saída da primeira função de transferência, e entrada da segunda, será a aceleração lateral do centro de massa. Esta malha aberta é instável e, portanto, há necessidade de um sistema de controle para se tentar tornar o comportamento estável, ou seja, qualquer comando no guidão, sem realimentação, implicará em tombamento da bicicleta.

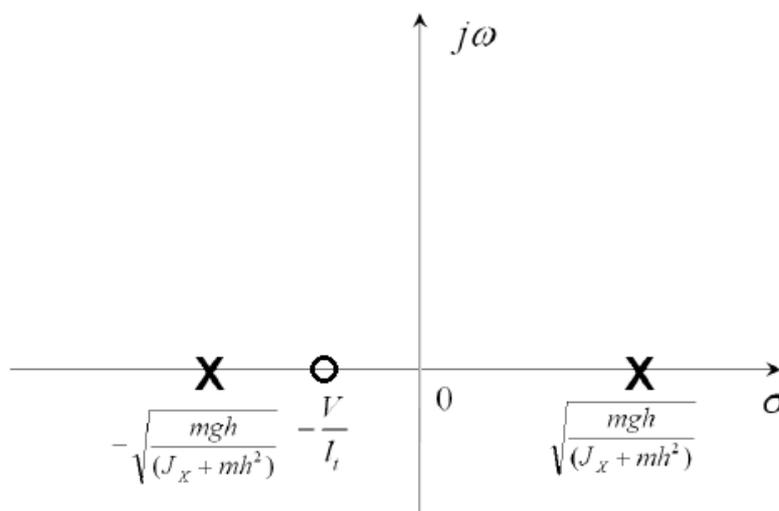


Figura 2.8 – Plano s para $\varphi(s)/Y(s)$ do modelo completo em malha aberta - Fonte: SPERANZA NETO (2011)

Para estabilizar o sistema, utilizou-se a abordagem do Controle Clássico, baseado na Transformada de Laplace, e conseqüentemente nas funções de transferência do sistema. O diagrama blocos da Fig. 2.9 apresenta uma proposta

de malha fechada, na forma de um problema de regulador (sem sinal de entrada), uma vez que o objetivo é eliminar a instabilidade e não acompanhar um sinal de entrada (problema de rastreamento ou servomecanismo). A realimentação unitária indica a medida direta do ângulo de inclinação feita pelo condutor. O comando inicial δ_0 pode ser considerado como uma perturbação no sistema. A geração do ângulo de esterçamento é realizada através de um controlador proporcional, que representa simplificadaamente a ação do condutor na tentativa de manter a bicicleta equilibrada. Observa-se que o comando inicial δ_0 será introduzido sempre na forma de um impulso unitário, de modo a provocar o movimento em curva da bicicleta, mas sem afetá-lo a partir do instante $t = 0$, o que será realizado pela ação do controle.

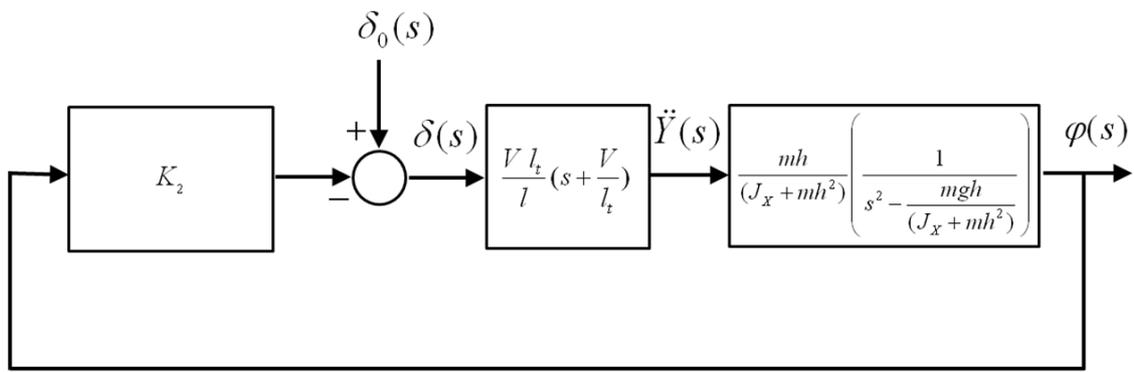


Figura 2.9 - Malha de controle do sistema com realimentação unitária e controlador proporcional - Fonte: SPERANZA NETO (2011)

Utilizando o controlador proporcional de ganho K_2 , que pode ser interpretado como a sensibilidade do condutor ao ângulo de inclinação φ da bicicleta, tentando compensar a tendência de queda com mais ou menos esterçamento no guidão, a função de transferência de malha fechada, relacionando o comando δ_0 inicial com φ será obtida a partir da seguinte manipulação:

$$\begin{aligned} \varphi(s) &= mh \left(\frac{1}{(J_x + mh^2)s^2 - mgh} \right) \ddot{Y}(s) = \\ &= mh \frac{V l_t}{l} \left(\frac{(s + \frac{V}{l_t})}{(J_x + mh^2)s^2 - mgh} \right) (\delta_0(s) - K_2 \varphi(s)) \end{aligned} \quad (2.15)$$

então

$$\frac{l}{mhV l_t} ((J_x + mh^2)s^2 - mgh)\varphi(s) = (s + \frac{V}{l_t})(\delta_0(s) - K_2\varphi(s)) \quad (2.16)$$

logo

$$\frac{\varphi(s)}{\delta_0(s)} = \frac{(s + \frac{V}{l_t})}{\frac{l(J_x + mh^2)}{mhV l_t} s^2 + K_2 s + (\frac{V}{l_t} K_2 - \frac{lg}{V l_t})} \quad (2.17)$$

ou

$$\frac{\varphi(s)}{\delta_0(s)} = \frac{mhV l_t}{l} \frac{(s + \frac{V}{l_t})}{(J_x + mh^2)s^2 + \frac{mhV l_t}{l} K_2 s + mh(\frac{V^2}{l} K_2 - g)} \quad (2.18)$$

o que caracteriza um sistema de 2ª ordem com um zero e ganho positivo, ou seja, uma inércia rotacional $(J_x + mh^2)$ com efeito de amortecimento dado pelo coeficiente do termo de 1ª ordem $(\frac{mhV l_t}{l} K_2)$, introduzido devido ao controlador e um efeito mola associado ao coeficiente do termo de ordem zero $(mh(\frac{V^2}{l} K_2 - g))$, também influenciado pelo ganho do controlador, indicando um sistema que poderá ser instável, oscilatório puro, subamortecido, criticamente amortecido ou superamortecido dependendo do valor de K_2 . A presença do zero indica a influência da derivada do sinal de entrada sobreposta à própria entrada. O ganho significa que o ângulo de inclinação será no sentido positivo (para a direita na Fig. 2.10) quando o comando no guidão for de sentido anti-horário (positivo do eixo vertical Z da Fig. 2.10) e vice-versa.

Nota-se que o termo $\frac{V^2}{l} K_2$ pode ou não compensar a ação da gravidade,

o que leva o sistema a ser estável ou instável. A condição de estabilidade do sistema de malha fechada está associada ao sinal positivo do coeficiente do termo de ordem zero, logo pode-se definir o ganho crítico a partir de:

$$\frac{V^2}{l} K_2 - g > 0 \rightarrow \text{sistema estável} \quad (2.19)$$

então

$$K_2^{\text{crítico}} = \frac{lg}{V^2} \quad (2.20)$$

Observa-se também que para um determinado ganho K_2 existe uma velocidade mínima, tal que:

$$V > V_{min} = \sqrt{\frac{gl}{K_2}} \quad (2.21)$$

Caso contrário o sistema de malha fechada continuará instável, ou seja, a bicicleta tombará.

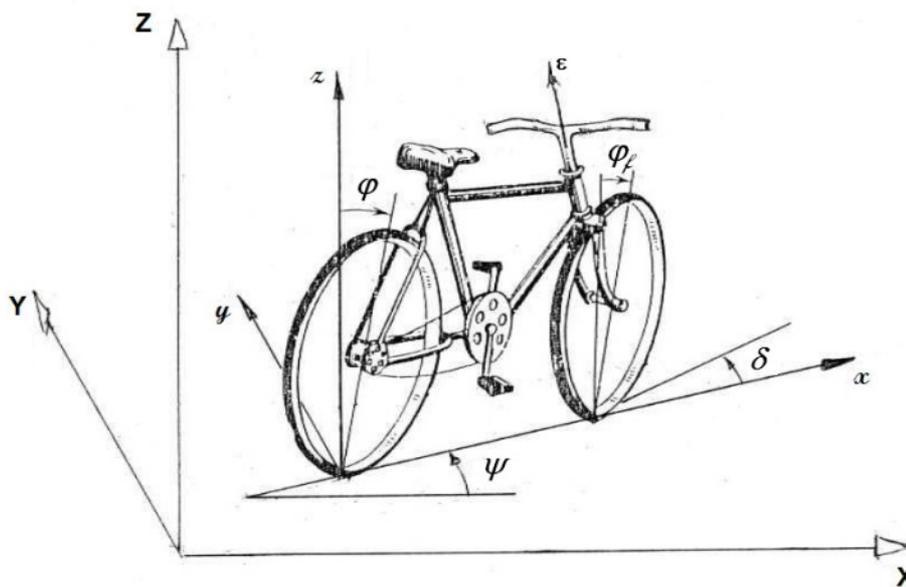


Figura 2.10 - Referenciais e variáveis - Fonte: SPERANZA NETO (2011)

Deve-se ainda considerar que há um limite para o ganho K_2 , uma vez que a inclinação máxima é limitada e conseqüentemente também o ângulo de esterçamento, que será dependente do ângulo de rolagem (inclinação do chassi do veículo). Além disso, existem limitações físicas (como batentes) que também impõem restrições ao esterçamento.

As Figuras 2.11, 2.12 e 2.13 ilustram as três possibilidades do Lugar Geométrico das Raízes (LGR) da equação característica da malha fechada, para condições distintas do zero da malha aberta, associadas a diferentes velocidades longitudinais da bicicleta, em função do ganho do controlador. Em todas as situações verifica-se a possibilidade de estabilização do sistema, para ganhos K_2 maiores que o crítico, entretanto os sistemas de malhas fechada gerados nos 3 casos possuem comportamentos dinâmicos bastante distintos. Para a condição da Fig. 2.11 o sistema será sempre superamortecido, com um polo mais lento e outro rápido. No caso da Fig. 2.12 há cancelamento de um polo com o zero (condição muito difícil de ser conseguida na prática) e a malha

fechada será de 1ª ordem. Com velocidades acima do limite da Fig. 2.13 o sistema poderá ser subamortecido para uma certa faixa de ganhos.

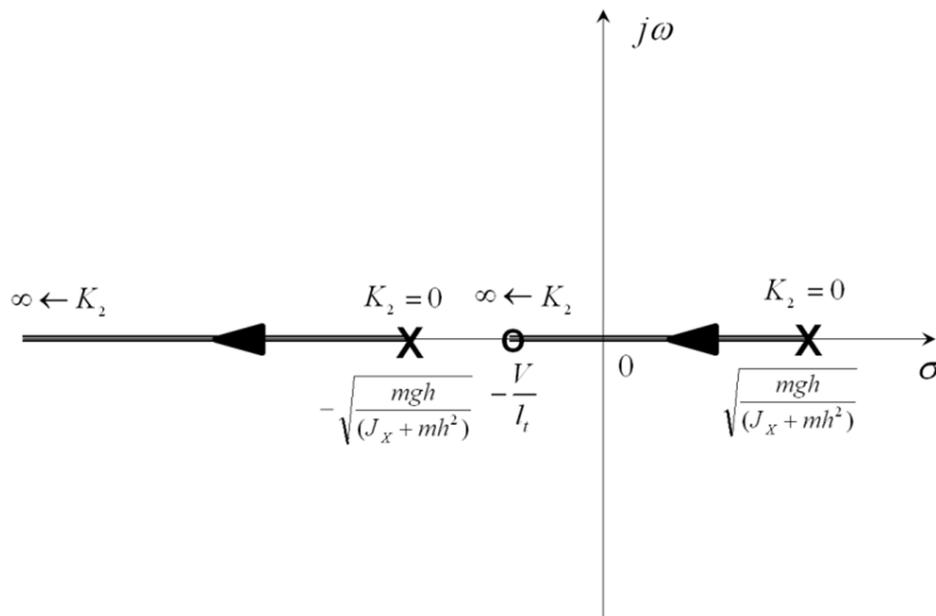


Figura 2.11 - LGR com velocidade longitudinal $< l_t \sqrt{\frac{mgh}{(J_x + mh^2)}}$ -

Fonte: SPERANZA NETO (2011)

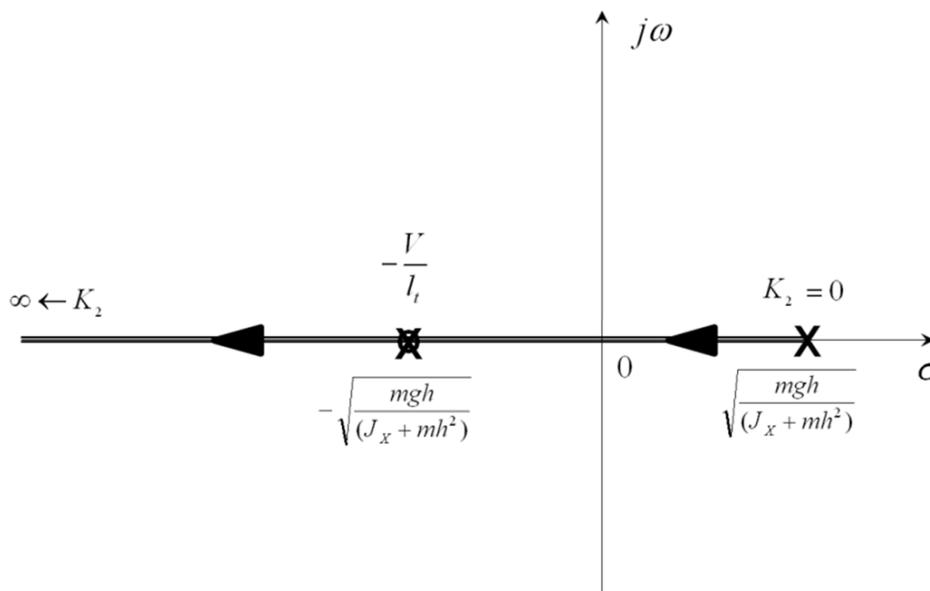


Figura 2.12 - LGR com velocidade longitudinal $= l_t \sqrt{\frac{mgh}{(J_x + mh^2)}}$ -

Fonte: SPERANZA NETO (2011)

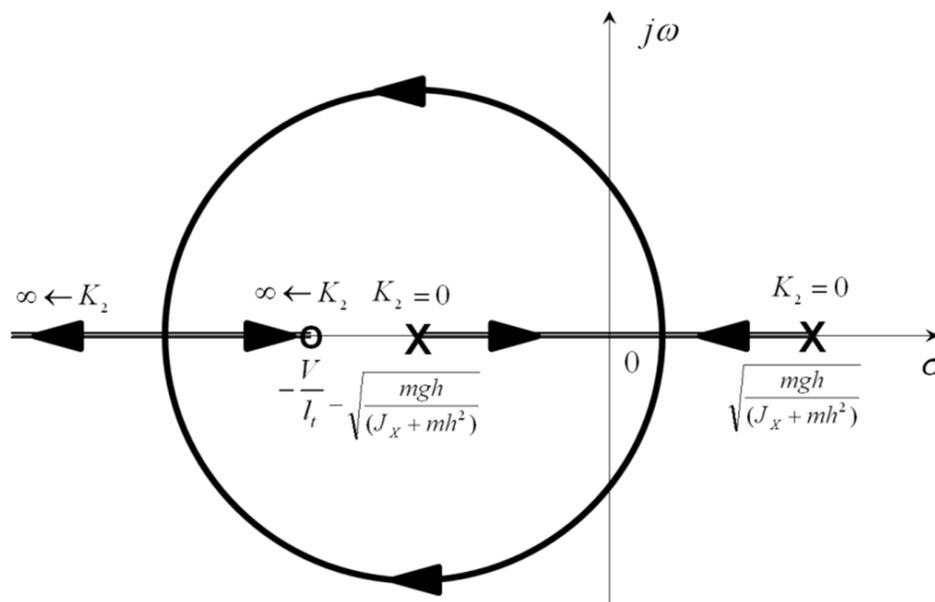


Figura 2.13 – LGR com velocidade longitudinal $> l_t \sqrt{\frac{mgh}{(J_x + mh^2)}}$.

Fonte: SPERANZA NETO (2011)

O modelo a seguir é um resumo de ASTROM *et al.* (2005) e todas as equações e figuras foram de lá extraídas, mas para simplificar o entendimento, no caso de aparecimento de parâmetros já definidos anteriormente com nova denominação, foram utilizadas as denominações anteriores. Este modelo auxiliará no entendimento da estabilidade intrínseca à bicicleta quando dentro de certas faixas de velocidade.

2.3.5. “Trail”

A modelagem do garfo frontal tem impacto importante na dinâmica de uma bicicleta. Os modelos anteriores não tratavam desta modelagem, pois consideravam o “trail” nulo. Para considerar o efeito da diferença entre a projeção do eixo de esterçamento e o ponto de contato do pneu frontal com o solo (“trail”), considera-se agora um torque aplicado ao guidão, e não mais um ângulo de esterçamento. Quando em curva, as forças de contato pneu-solo exercem um torque no garfo que, sob certas circunstâncias, gira a roda para dentro da curva. Tal força atua na bicicleta, reagindo à inclinação e novamente sob certas circunstâncias, estabiliza o sistema.

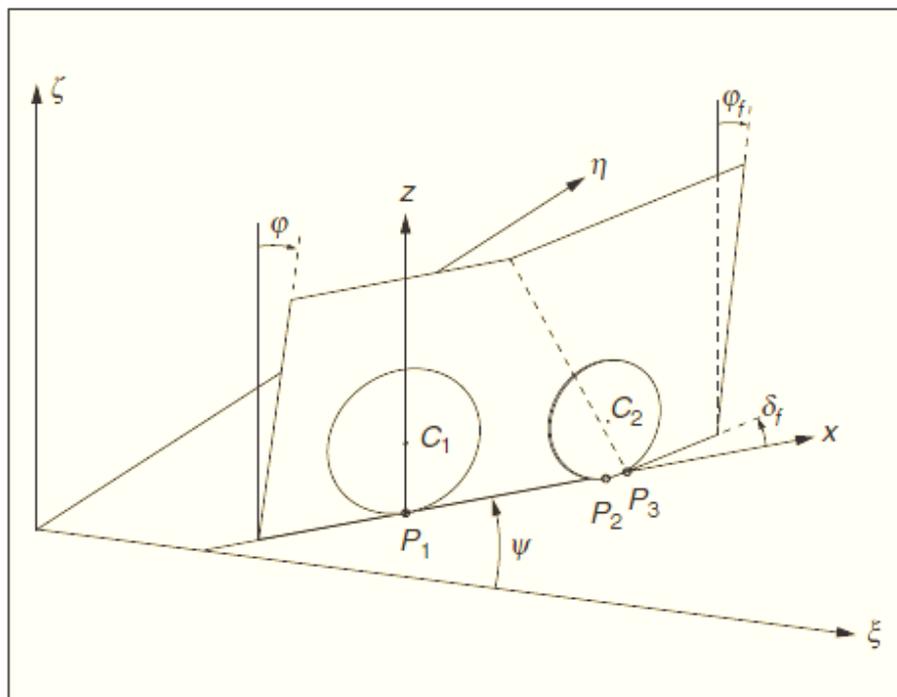


Figura 2.14 – Sistema de coordenadas $\xi\eta\zeta$ inercial - Fonte: ASTROM et al. (2005)

Na Figura 2.14 ψ é o ângulo de orientação ou guinada, φ é o ângulo de rolagem, P_1 é o ponto de contato da roda traseira, φ_f é o ângulo de rolagem, δ_f é o ângulo de esterçamento efetivo e P_2 é o ponto de contato da roda dianteira.

Para pequenos ângulos de esterçamento, o ângulo de rolagem do garfo (roda dianteira) é dado por:

$$\varphi_f = \varphi - \delta \cos \lambda \quad (2.22)$$

na qual λ foi definido anteriormente como ângulo do eixo de esterçamento do garfo em relação à horizontal. O ângulo efetivo do garfo é dado por:

$$\delta_f = \delta \sin \lambda \quad (2.23)$$

na qual δ é o ângulo formado pela interseção do plano da roda traseira com o plano da roda dianteira. O modelo pode ser obtido por balanço estático de torques (ainda desprezando o efeito giroscópico, que será tratado no próximo modelo). Com N_f e F_f sendo respectivamente as componentes vertical e horizontal das forças de contato entre o pneu e o solo que age sobre o garfo, tem-se:

$$F_f = \frac{l_t m V^2 \sin \lambda}{l^2} \delta \quad (2.24)$$

$$N_f = \frac{l_t m g}{l} \quad (2.25)$$

Quando aplicado um torque externo ao guidão, desprezando a massa do garfo, o equilíbrio estático será:

$$T - (F_f + N_f \varphi_f) t \sin \lambda = 0 \quad (2.26)$$

$$T - \frac{l_t m g \sin \lambda}{l} \varphi - \frac{l_t m \sin \lambda}{l^2} (V^2 \sin \lambda - l g \cos \lambda) \delta = 0 \quad (2.27)$$

É de destacar que o termo proporcional a δ é negativo quando $V > \sqrt{l g \cot \lambda}$ e, portanto quando a velocidade é igual a este valor ($\sqrt{l g \cot \lambda}$) é dita velocidade de auto-alinhamento, ou seja, a velocidade a partir da qual a roda dianteira tende a ficar alinhada. Isolando o δ do lado esquerdo tem-se:

$$\delta = k_1 T - k_2 \varphi \quad (2.28)$$

na qual:

$$k_1 = \frac{l^2}{(V^2 \sin \lambda - l g \cos \lambda) m l_t \sin \lambda} \quad (2.29)$$

e

$$k_2 = \frac{l g}{(V^2 \sin \lambda - l g \cos \lambda)} \quad (2.30)$$

Quando k_2 (ganho do controlador proporcional, equivalente ao K_2 da seção b) é positivo e suficientemente grande, as propriedades do garfo estabilizam a bicicleta. Considerando o modelo de bicicleta utilizado em *ASTROM et al. (2005)*, o modelo de garfo fornece uma realimentação negativa como mostrado na Fig. 2.15.

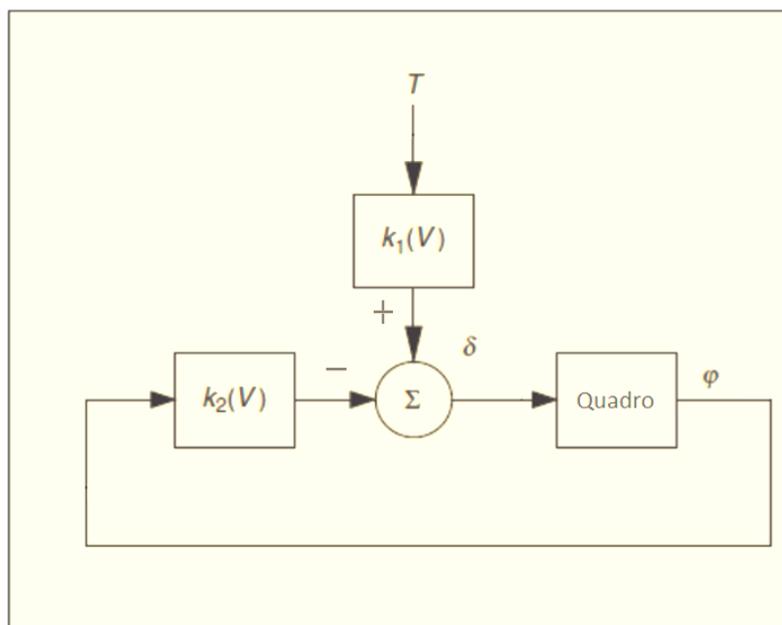


Figura 2.15 – Diagrama de blocos da bicicleta considerando o garfo -
Fonte: ASTROM et al. (2005)

Como pode ser observado, o garfo cria uma realimentação do ângulo de rolagem φ para o esterçamento δ , que pode estabilizar o sistema. Neste diagrama, o bloco “Quadro” representa a modelagem do comportamento do chassi da bicicleta, conforme função de transferência de φ para δ :

$$\frac{\varphi(s)}{\delta(s)} = -\frac{VJ_{xz}}{lJ_x} \frac{(s - \frac{mVh}{J_{xz}})}{s^2 - \frac{mgh}{J_x}} \approx \frac{lV}{l_t h} \frac{s + \frac{V}{l_t}}{s^2 - \frac{g}{h}} \quad (2.31)$$

A equação do balanço dos momentos do sistema da bicicleta apresentado em ASTROM *et al.* (2005) para a gravidade e as forças laterais é:

$$J_x \frac{d^2\varphi}{dt^2} - mgh\varphi = -\frac{J_{xz}}{l} \frac{d\delta}{dt} + \frac{mV^2 h}{l} \delta \quad (2.32)$$

na qual J_{xz} é o produto de inércia entre os eixos x e z. Reescrevendo esta equação considerando agora o efeito do “trail”, tem-se:

$$\begin{aligned} J_x \frac{d^2\varphi}{dt^2} - \frac{J_{xz}Vg}{V^2 \text{sen}\lambda - l g \cos\lambda} \frac{d\varphi}{dt} + \frac{mg^2(lh \cos\lambda - l_t \text{sen}\lambda)}{V^2 \text{sen}\lambda - l g \cos\lambda} \varphi = \\ = -\frac{J_{xz}l}{l_t m(V^2 \text{sen}\lambda - l g \cos\lambda)} \frac{dT}{dt} + \frac{l(V^2 h - l_t t g)}{l_t(V^2 \text{sen}\lambda - l g \cos\lambda)} T \end{aligned} \quad (2.33)$$

A função de transferência entre o ângulo φ de rolagem e o torque T aplicado ao guidão será:

$$\frac{\varphi(s)}{T(s)} = \frac{\frac{-J_{xz}l s}{l_t m} + \frac{l(V^2 h - l_t t g)}{l_t}}{J_x s^2 - J_{xz}Vg s + mg^2(lh \cos\lambda - l_t \text{sen}\lambda)} \quad (2.34)$$

e seus zeros e polos serão:

$$\text{zero} = \frac{m(V^2 h - l_t t g)}{J_{xz}} \quad (2.35)$$

$$\text{polos} = \frac{J_{xz}Vg}{2J_x} \pm \sqrt{\left(\frac{J_{xz}Vg}{2J_x}\right)^2 - mg^2(lh \cos\lambda - l_t \text{sen}\lambda)} \quad (2.36)$$

Analisando-se os zeros e polos desta função, percebe-se que para:

$$1) |V| < \sqrt{\frac{4mJ_x^2(lh \cos\lambda - l_t \text{sen}\lambda)}{J_{xz}^2}} \quad \text{os polos são complexos} \quad (2.37)$$

$$2) |V| > \sqrt{\frac{4mJ_x^2(lh \cos\lambda - l_t \text{sen}\lambda)}{J_{xz}^2}} \quad \text{os polos são reais distintos} \quad (2.38)$$

$$3) |V| = \sqrt{\frac{4mJ_x^2 (lh \cos \lambda - l_t t \sin \lambda)}{J_{xz}^2}} \text{ o polo é real (duplo)} \quad (2.39)$$

2.3.6. Efeito giroscópico

Para a análise deste fator utilizou-se somente o modelo da roda dianteira, visto que é ela a única responsável pelo efeito giroscópico, já que a roda traseira tem seus graus de liberdade limitados e mesmo em curva, a bicicleta desenvolve uma velocidade angular bastante inferior à da roda, podendo ser desprezada sua contribuição para este efeito.

A roda dianteira da bicicleta ao rodar gera um torque e funciona como um giroscópio. Assim, se um vento lateral tender a tombar a bicicleta para a direita, o guidão sofrerá um torque que fará com que a bicicleta faça uma curva para a direita, procurando com isso um equilíbrio dinâmico. Se ao contrário o guidão for girado para fazer uma curva para a direita, a bicicleta tenderá a se inclinar para o mesmo lado, restabelecendo assim o equilíbrio dinâmico. Este comportamento é característico de giroscópios e conhecido como movimento de precessão. Este tipo de manobra também é denominado como curva equilibrada.

A inserção de tal efeito na análise da dinâmica da bicicleta ou motocicleta será mais detalhada na modelagem apresentada no subitem 2.4, quando se explora a utilização da técnica de Fluxo de Potência para ir aumentando, de pouco a pouco, a complexidade do modelo adotado.

2.3.7. Ação do condutor

O modelo da ação do condutor aqui apresentado foi compilado a partir das informações de ASTROM *et al.* (2005) e todas as equações e figuras foram de lá extraídas, mas novamente, para simplificar o entendimento, no caso de aparecimento de parâmetros já definidos anteriormente com nova denominação, foram utilizadas as denominações anteriores.

Dois são os comportamentos do condutor que aqui serão modelados. O primeiro será a ação do condutor no guidão. O segundo será a inclinação lateral de seu corpo de forma a equilibrar melhor a bicicleta.

No primeiro caso o humano é responsável por aplicar um torque ao guidão. Este torque pode ser modelado como um ganho proporcional ao ângulo

de inclinação da bicicleta, ou seja, a reação do condutor à tendência de queda, tentando reequilibrar o veículo, que pode ser escrito como: $T = -k\phi$. Aplicando esta igualdade na equação 2.28 (descrita no subitem 2.3.5 para o garfo), essa última pode ser reescrita como:

$$\delta = -(kk_1 + k_2)\phi \quad (2.40)$$

Para maior aprofundamento da análise quanto à estabilidade deste modelo para diferentes entradas, a referência SPERANZA NETO (2011) deverá ser consultada.

No segundo modelo, uma forma simples de descrever a ação do condutor é considerar um ângulo ϕ de inclinação do seu tronco em relação ao plano da bicicleta como mostrado na Fig. 2.16.

Retomando a equação 2.32 do balanço de momentos para a força gravitacional e as forças laterais de ASTROM *et al.* (2005) utilizadas no subitem 2.3.5 e reescrevendo agora para incluir o momento causado pela inclinação do tronco do condutor, tem-se:

$$J_x \frac{d^2\phi}{dt^2} + J_r \frac{d^2\phi}{dt^2} = mgh\phi + m_r g h_r \phi - \frac{J_{xz}}{l} \frac{d\delta}{dt} + \frac{mV^2 h}{l} \delta \quad (2.41)$$

Na qual h_r é a altura do centro de massa do tronco do condutor e o eixo de rotação, J_r é o momento de inércia e m_r é a massa do tronco do condutor.

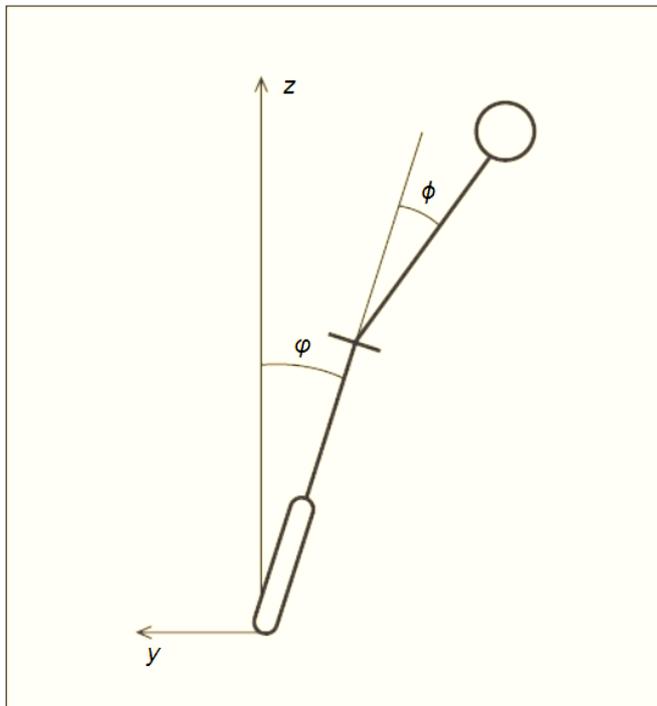


Figura 2.16 – Visão traseira da inclinação do condutor - Fonte: ASTROM et al. (2005)

Combinando este efeito com o efeito do garfo apresentado anteriormente, pode-se reescrever a equação anterior como:

$$J_x \frac{d^2 \phi}{dt^2} - \frac{J_{xz} V k_2}{l} \frac{d\phi}{dt} + \left(\frac{m V^2 h k_2}{l} - m g h \right) \phi$$

$$(2.42) = - \frac{J_{xz} V k_1}{l} \frac{dT}{dt} + \frac{m V^2 k_1}{l} T - J_r \frac{d^2 \phi}{dt^2} + m_r g h_r \phi$$

Desprezando a ação no guidão (o torque T) que foi analisada anteriormente, a função de transferência entre o ângulo ϕ de rolagem e o ângulo ϕ de inclinação do tronco do condutor em relação ao plano da bicicleta será:

$$\frac{\phi(s)}{\phi(s)} = \frac{-J_r s^2 + m_r g h_r}{J_x s^2 - \frac{J_{xz} V k_2}{l} s + \frac{m V^2 h k_2}{l} - m g h} \quad (2.43)$$

logo os zeros são:

$$zeros = \pm \sqrt{\frac{m_r g h_r}{J_r}} \quad (2.44)$$

Considerando que m_r , h_r , g e J_r são positivos, o sistema tem dois zeros reais e simétricos. Os polos são:

$$polos = \frac{J_{xz} V k_2}{2 J_x l} \pm \sqrt{\left(\frac{J_{xz} V k_2}{2 J_x l} \right)^2 - \frac{m h}{J_x} \left(\frac{V^2 k_2}{l} - g \right)} \quad (2.45)$$

Considerando que m , h , g , l , J_x são positivos, quando o produto $J_{xz} k_2$ for positivo, analisando pela velocidade, tem-se:

$$|V| < \sqrt{\frac{4 J_x l^2 m g h}{k_2 (4 J_x l m h - J_{xz}^2)}} \rightarrow \text{polos complexos com parte real positiva} \quad (2.46)$$

$$|V| = \sqrt{\frac{4 J_x l^2 m g h}{k_2 (4 J_x l m h - J_{xz}^2)}} \rightarrow \text{polo duplo real positivo} \quad (2.47)$$

$$|V| > \sqrt{\frac{4 J_x l^2 m g h}{k_2 (4 J_x l m h - J_{xz}^2)}} \rightarrow \text{polos reais com três opções:} \quad (2.48)$$

$$1) |V| < \sqrt{\frac{g l}{k_2}} \rightarrow \text{um polo positivo e um polo negativo} \quad (2.49)$$

$$2) |V| = \sqrt{\frac{gl}{k_2}} \rightarrow \text{um polo positivo e um polo em zero} \quad (2.50)$$

$$3) |V| > \sqrt{\frac{gl}{k_2}} \rightarrow \text{dois polos positivos} \quad (2.51)$$

Já quando o produto $J_{xz}k_2$ for negativo, tem-se:

$$|V| < \sqrt{\frac{4J_x l^2 mgh}{k_2(4J_x l m h - J_{xz}^2)}} \rightarrow \text{polos complexos com parte real negativa} \quad (2.52)$$

$$|V| = \sqrt{\frac{4J_x l^2 mgh}{k_2(4J_x l m h - J_{xz}^2)}} \rightarrow \text{polo duplo real negativo} \quad (2.53)$$

$$|V| > \sqrt{\frac{4J_x l^2 mgh}{k_2(4J_x l m h - J_{xz}^2)}} \rightarrow \text{polos reais com três opções:} \quad (2.54)$$

$$1) |V| < \sqrt{\frac{gl}{k_2}} \rightarrow \text{um polo positivo e um polo negativo} \quad (2.55)$$

$$2) |V| = \sqrt{\frac{gl}{k_2}} \rightarrow \text{um polo negativo e um polo em zero} \quad (2.56)$$

$$3) |V| > \sqrt{\frac{gl}{k_2}} \rightarrow \text{dois polos negativos} \quad (2.57)$$

É de se ressaltar que as propriedades do condutor (m_r , J_r ou h_r) influenciam somente nos zeros da função de transferência encontrada, não tendo nenhuma influência nos polos. De forma análoga, a velocidade e as propriedades intrínsecas à bicicleta (m , J_x , J_{xz} , h) não têm influência nos zeros, somente nos polos.

Um modelo mais complexo poderá ser analisado inserindo, por exemplo, o atraso neuromuscular do ser humano. Estudos como WEIR (1972) mostram que este atraso é de aproximadamente 0,1 segundo para aplicação de torque no guidão e de 0,3 segundos para a inclinação do corpo.

2.4. Modelagem Matemática a partir do Modelo de Whipple para Bicicletas

Neste segundo estudo, após revisão bibliográfica aprofundada nessa temática, chegou-se à conclusão de que a análise crítica da modelagem e dos

resultados apresentados no artigo “Linearized dynamics equations for the balance and steer of a bicycle: a benchmark and review” (MEIJAARD *et al*, 2007) poderia ser de grande valia para o desenvolvimento posterior de uma modelagem adaptada às necessidades do grupo de trabalho no qual este autor se insere.

Assim, para o estudo dos fatores responsáveis pela estabilidade dinâmica da bicicleta, serão apresentadas as equações canônicas linearizadas de movimento retiradas desse artigo. Nele os autores fazem uma revisão histórica dos modelos de bicicleta utilizados e propõem o equacionamento para o modelo de Whipple. Tanto o modelo quanto as equações citadas serão apresentadas oportunamente com seus devidos detalhamentos.

2.4.1. Breve histórico

Em 1818, Karl von Drais demonstrou que uma pessoa avançando com um veículo de duas rodas em linha é capaz de estabilizá-la ao direcionar corretamente a roda dianteira (HERLIHY 2004, apud MEIJAARD *et al*. 2007). Desde então, este veículo de duas rodas tem sido desenvolvido com base principalmente na intuição de seus criadores e através de tentativas e erros chegou-se, já em 1896, em uma versão bem próxima à que é comercializada na atualidade.

Este modelo foi chamado de “bicicleta segura” e se caracteriza, assim como as encontradas hoje em dia, por rodas de tamanhos iguais com pneus (historicamente o último a ser adicionado a esta configuração), direcionamento da roda dianteira através da utilização do guidão, uso de correia e rodas dentadas para a transmissão do movimento dos pedais para a roda traseira e “trail”, ou seja, distância entre o ponto de interseção do prolongamento do eixo de esterçamento do garfo com plano do solo e o ponto de contato entre o pneu da roda dianteira e o solo. A evolução histórica deste veículo pode ser vista na Fig. 2.17, retirada do ‘THE AERONAUTICAL ANNUAL 1896’ (apud KOOIJMAN e SCHWAB, 2011).

Foi em 1899 que Francis Whipple utilizou-se - em seu artigo intitulado “The stability of the motion of a bicycle” – de equações da dinâmica de corpos rígidos para demonstrar teoricamente que este tipo de bicicleta, dentro de um certo intervalo de velocidade, é auto estabilizante (apud MEIJAARD *et al*. 2007).

Assim, como MEIJAARD *et al.* (2007) citam em seu texto, desde então pouco acréscimo tem sido amplamente aceito em direção ao entendimento da dinâmica da bicicleta, com exceção destas duas características de consenso no meio acadêmico desde o final do século XIX, que são:

- o ciclista pode equilibrar uma bicicleta que se movimenta para frente ao virar, através do guidão, a roda dianteira na direção da inclinação indesejada, analogamente com o que se faz com um pêndulo invertido, que pode ser equilibrado acelerando-se a base em direção ao tombamento do primeiro.

- algumas bicicletas são autoestabilizantes em certos intervalos de velocidades. No entanto os motivos para tal propriedade podem ser diversos e suas contribuições não são um consenso na literatura.

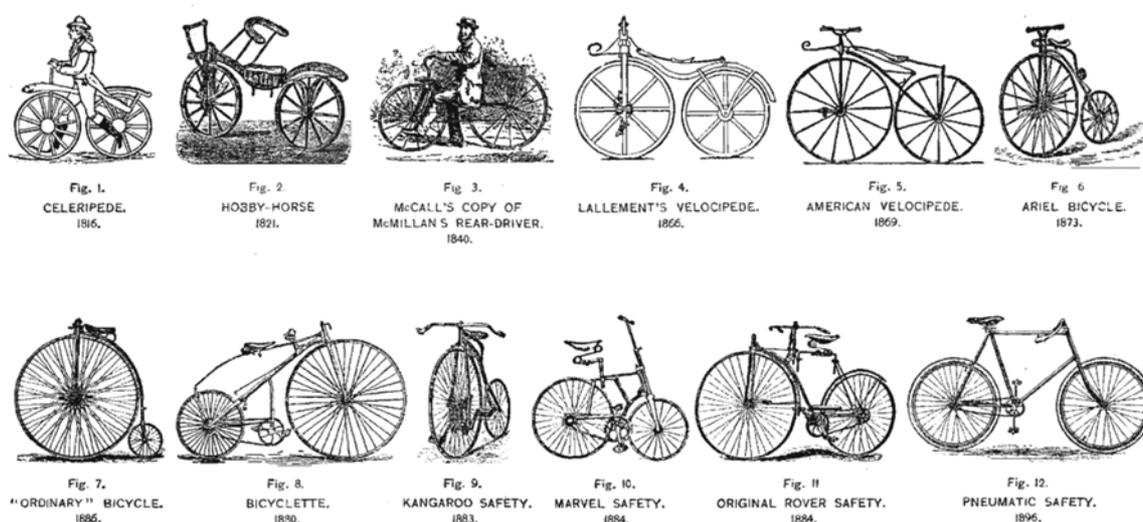


Figura 2.17 – Evolução da bicicleta desde 1816 até chegar à configuração atual - Fonte: ‘THE AERONAUTICAL ANNUAL 1896’ (apud KOUIJMAN e SCHWAB, 2011)

Ainda neste artigo os autores propõem uma revisão das diferentes modelagens encontradas na literatura de 150 anos para os dias de hoje, citando suas diferentes características e pontuando caso nos quais estivessem cometidos erros em seus equacionamentos. O intuito do presente trabalho não será, no entanto, rever estes modelos, mas sim analisar e entender aquele escolhido no artigo tomado como referência, validando até que ponto ele será útil para a aplicação pretendida.

2.4.2. Modelo adotado

Conforme citado no início deste capítulo, os autores do artigo tomado como referência para a presente análise adotaram o modelo de Whippel, que é composto por quatro corpos rígidos, a saber: roda traseira (R), quadro + ciclista (B - um só corpo rígido), guidão + garfo (H - um só corpo rígido) e roda dianteira (F), conforme pode ser visto na Fig. 2.18, retirada deste mesmo artigo.

Os parâmetros apresentados nesta figura são: o centro de massa de cada uma das quatro partes (caracterizados por círculos bicolores), a distância entre eixos (w), os pontos de contato com o solo dos pneus dianteiro (Q) e traseiro (P), o ângulo entre o eixo de esterçamento do garfo e o eixo z (λ) e o "trail" (c).

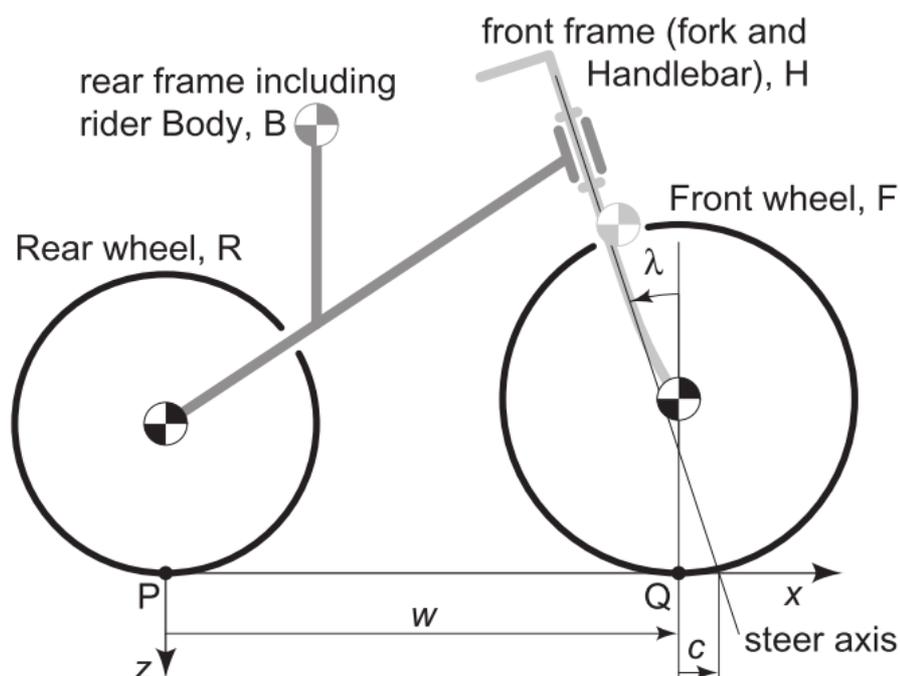


Figura 2.18 – Modelo de Whippel - Fonte: MEIJAARD *et al.* (2007)

A figura em questão foi desenhada em escala utilizando as grandezas apresentadas na Tab. 2.1 também retirada de MEIJAARD *et al.* (2007), que contém, além das grandezas utilizadas para fazer este desenho, outros dados como massas e momentos de inércia. Cabe ainda ressaltar que as localizações dos centros de massa serão expressas em relação ao sistema de coordenadas embarcado, tendo origem no ponto P, com x sendo colinear à tangente da extremidade da roda traseira, apontando para o deslocamento positivo da bicicleta, com y sendo perpendicular ao plano da roda traseira, apontando para o leitor e z colinear com o raio da roda traseira, apontando para baixo.

Os valores apresentados na Tab. 2.1 são exatos (sem arredondamento ou truncamento). A maioria dos valores são representativos para uma bicicleta comercial, porém alguns deles estão exagerados, como os parâmetros das rodas traseira e dianteira, que são diferentes (raios, massas e momentos de inércia), para facilitar a identificação e com isso a interpretação de cada contribuição em separado.

Os valores apresentados nesta tabela consideram as duas rodas da bicicleta no mesmo plano, em posição vertical (plano das rodas perpendicular ao plano do solo) e ambas em contato com o solo.

Os centros de massas das rodas traseira e dianteira estão localizados no centro geométrico das rodas, suas massas são respectivamente m_R e m_F e seus raios r_R e r_F . Os momentos de inércia das rodas traseira e dianteira sobre seus eixos são respectivamente I_{Ryy} e I_{Fyy} . Os momentos de inércia das mesmas em torno de qualquer de seus diâmetros são respectivamente I_{Rxx} e I_{Fxx} . Como a distribuição de massa das rodas não necessariamente é plana, quaisquer valores positivos são válidos, desde que $I_{Ryy} \leq 2I_{Rxx}$ e $I_{Fyy} \leq 2I_{Fxx}$.

Os centros de massa dos corpos B e H estão localizados respectivamente em $(x_B, y_B = 0, z_B)$ e $(x_H, y_H = 0, z_H)$, suas massas m_B e m_H e suas matrizes de momento de inércia são simétricas, visto que há simetria lateral (plano xz) na bicicleta. Como não há necessariamente simetria em outro plano, tanto I_{Byy} pode ser menor que $I_{Bxx} + I_{Bzz}$ quanto I_{Hyy} pode ser menor que $I_{Hxx} + I_{Hzz}$, mas para representar um momento de inércia fisicamente viável, todos os valores da diagonal principal têm que ser positivos e respeitar a desigualdade triangular, ou seja, nenhum deles pode ser maior que a soma dos outros dois.

Os valores escolhidos para w , c e λ são equivalentes ao que pode ser encontrado em bicicletas comerciais (cf. Tab. 2.1).

O número de parâmetros apresentados na tabela em questão (25) pode ser reduzido. Com exceção do momento de inércia polar (I_{Ryy}) as propriedades inerciais da roda traseira (m_R e I_{Rxx}), por exemplo, podem ser combinadas com as propriedades inerciais do corpo B, reduzindo em dois o número de parâmetros. Processo análogo pode ser aplicado à roda dianteira e ao o corpo H. O momento de inércia polar de cada roda pode ainda ser substituído por uma constante girostática, que dá seu momento angular de rotação em termos da velocidade de cruzeiro. Em equações lineares, o raio das rodas se torna irrelevante para rolagem e esterçamento e os efeitos de seus momentos angulares são incorporados e estas constantes girostáticas; assim como os componentes polares dos momentos de inércia dos corpos B e H são

irrelevantes, reduzindo com isso em mais quatro a quantidade de parâmetros e restando então 17.

<u>Parameter</u>	<u>Symbol</u>	<u>Value for benchmark</u>
Wheel base	w	1.02 m
Trail	c	0.08 m
Steer axis tilt ($\pi/2 - \text{head angle}$)	λ	$\pi/10$ rad ($90^\circ - 72^\circ$)
Gravity	g	9.81 N/kg
Forward speed	v	<i>various</i> m/s, see tables 2
Rear wheel R		
Radius	r_R	0.3 m
Mass	m_R	2 kg
Mass moments of inertia	(I_{Rxx}, I_{Ryy})	(0.0603, 0.12) kg m ²
Rear Body and frame assembly B		
Position centre of mass	(x_B, z_B)	(0.3, -0.9) m
Mass	m_B	85 kg
Mass moments of inertia	$\begin{bmatrix} I_{Bxx} & 0 & I_{Bxz} \\ 0 & I_{Byy} & 0 \\ I_{Bxz} & 0 & I_{Bzz} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 9.2 & 0 & 2.4 \\ 0 & 11 & 0 \\ 2.4 & 0 & 2.8 \end{bmatrix}$ kg m ²
Front Handlebar and fork assembly H		
Position centre of mass	(x_H, z_H)	(0.9, -0.7) m
Mass	m_H	4 kg
Mass moments of inertia	$\begin{bmatrix} I_{Hxx} & 0 & I_{Hxz} \\ 0 & I_{Hyy} & 0 \\ I_{Hxz} & 0 & I_{Hzz} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.05892 & 0 & -0.00756 \\ 0 & 0.06 & 0 \\ -0.00756 & 0 & 0.00708 \end{bmatrix}$ kg m ²
Front wheel F		
Radius	r_F	0.35 m
Mass	m_F	3 kg
Mass moments of inertia	(I_{Fxx}, I_{Fyy})	(0.1405, 0.28) kg m ²

Tabela 2.1 – Parâmetros da bicicleta utilizada como modelo da Fig. 2.18 - Fonte: MEIJAARD *et al.* (2007)

A partir de uma análise sobre as restrições holonômicas (junções e contato com o solo), uma redução nos graus de liberdade se faz possível. Partindo dos seis graus de liberdade (três translacionais e três rotacionais) de cada corpo rígido, tem-se um total de 24. Como cada eixo de rotação (das rodas e do garfo) limita cinco graus, pode-se subtrair 15 graus deste total. Há ainda os dois graus “perdidos” pelo contato de cada roda com o solo. Com isso o total fica reduzido a $24 - 15 - 2 = 7$ graus de liberdade.

A configuração espacial e as variáveis dinâmicas podem ser vistas na Fig. 2.19, retirada da mesma fonte. Nela são apresentados os ângulos: de guinada ψ , de rolagem φ , e de rotação θ_R , todos da roda traseira; o de esterçamento δ do corpo H, de rotação θ_F da roda dianteira e o ângulo de arfagem θ_B , que não é uma variável do sistema já que, por premissa, as rodas são mantidas

permanentemente em contato com o solo e, portanto, sua magnitude pode ser determinada por relações trigonométricas espaciais.

Nesta mesma figura, para facilitar a visualização, os eixos de rotação estão representados por cilindros com flechas indicando os sentidos de suas rotações positivas. O ângulo de guinada ψ , como mostrado em desenho aumentado no canto direito superior da figura, está aterrado quanto à sua orientação, mas não quanto à sua localização. Na configuração mostrada na figura, os ângulos ψ , φ , e δ são positivos.

Como apresentado anteriormente, o sistema tem sete graus de liberdade e sua configuração pode ser parametrizada, portanto, pelos cinco ângulos citados (ψ , φ , θ_R , δ e θ_F) e as coordenadas x e y do ponto de contato P , medidas em relação ao sistema de coordenadas global fixo (XYZ com origem em O) indicado.

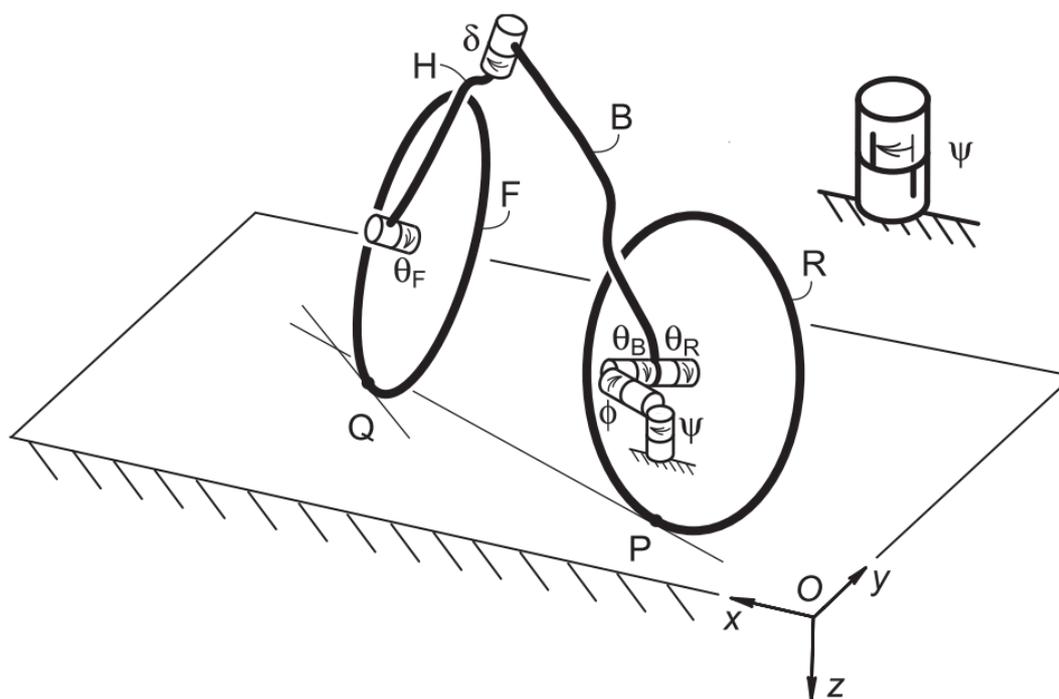


Figura 2.19 – Configuração e variáveis dinâmicas - Fonte: MEIJAARD et al. (2007)

Além das restrições (holonômicas) já utilizadas para o cálculo dos graus de liberdade, o sistema também apresenta restrições não holonômicas, visto que não há deslizamento dos pneus. Com isso, para os graus de liberdade da velocidade, devem-se reduzir os sete graus de liberdade em quatro (movimento longitudinal e lateral de cada roda), o que resulta em três graus. Assim, podem-se definir as três velocidades como sendo a velocidade angular da roda traseira ($d\theta_R/dt$), a velocidade de rolagem ($d\varphi/dt$) e a velocidade de guinada ($d\delta/dt$).

São simplificações (premissas) deste modelo que:

- as rodas têm simetria circular e os corpos B e H têm simetria lateral;
- o contato do pneu com o solo é pontual, apesar de sua modelagem poder levar em conta rodas com certa espessura no que tange às propriedades inerciais;
- a ligação entre o quadro e o ciclista é rígida, não considerando com isso possíveis movimentos relativos do ciclista;
- não há flexibilidades estruturais;
- não há amortecimentos;
- não há atrito das juntas;
- os pneus não são flexíveis;
- não há deslizamento das rodas e elas estão permanentemente em contato com o solo.

Pelas características descritas acima, pode-se concluir que este modelo não é adequado para a aplicação no caso de controle ativo por um ciclista, pois não considera, por exemplo, a influência de sua inclinação, que deslocaria o centro de gravidade. Mesmo para a análise de oscilações de alta frequência no guidão, o artigo preconiza a consideração das flexibilidades estruturais e dos pneus para um melhor entendimento do comportamento dinâmico do sistema.

Apesar destas limitações, através deste modelo é possível o desenvolvimento de um sistema de equações lineares de fácil aplicação, que pode ser verificado e validado e que poderá servir para análises como, por exemplo, entender melhor os motivos da característica autoestabilizante de certas bicicletas. Modelos de motocicletas podem partir deste, adicionando, por exemplo, uma modelagem mais sofisticada para os pneus (assumindo contatos com o solo no formato toroidal e elasticidade), amortecimento e flexibilidade do quadro.

2.4.3. Equacionamento

As equações de dinâmica apresentadas em MEIJAARD *et al.* (2007) não são o produto da linearização de equações não-lineares. Elas podem ser obtidas aplicando os balanços de forças e momentos a cada parte e considerando as restrições cinéticas, trabalho resultante nulo e ações e reações entre elas. Antes de apresentar as equações da dinâmica deste sistema, é importante repassar

dois conceitos explanados pelos autores que auxiliarão na interpretação dos resultados das simulações.

A primeira peculiaridade deste sistema é ser conservativo, porém não Hamiltoniano. O sistema é considerado conservativo, pois como não há deslizamento, as forças de atrito que surgem no contato entre os pneus e o solo são não-dissipativas. Não é considerado nenhum atrito nos eixos e no caso de uma bicicleta sem controle (sem ação do ciclista) a única força externa é a gravidade, que é conservativa. Assim, a soma das energias cinética e gravitacional é constante para qualquer movimento não forçado. No entanto as restrições não-holonômicas, advindas da mesma característica (não-deslizamento) que faz com que as forças de atrito sejam conservativas, impedem que as equações sejam escritas no formato Hamiltoniano, o que pode resultar em equações com estabilidade assintótica (exponencial), resultado que entraria em contradição caso o sistema fosse Hamiltoniano.

Outra característica que merece atenção é o não-acoplamento das dinâmicas laterais e longitudinais. Como há simetria lateral, isso implica que qualquer velocidade ($d\theta_R/dt$) imposta em uma bicicleta que esteja na vertical ($\varphi=0$ e $\delta=0$) e seja não-controlada (sem ciclista) tenha como solução um movimento puramente longitudinal, já que não haveria explicação para uma inclinação para um lado em detrimento do outro. Além disso, ainda por causa da simetria lateral, qualquer perturbação para a direita deve causar o mesmo efeito na velocidade que a mesma perturbação para esquerda, somente com os sinais invertidos. Portanto não pode haver acoplamento de primeira ordem entre os movimentos laterais e longitudinais. Com isso as equações de movimento longitudinal são desacopladas das equações de movimento lateral.

Conforme citam MEIJAARD *et al.* (2007) as equações, na forma canônica, como as que serão apresentadas a seguir, têm evolução histórica que passa por Neimark e Fafaev (1972), por Dikarev *et al.* (1981), assim como Papadopoulos (1987), Hand (1988), Mears (1988) e Meijaard (2004). Porém de forma geral elas são longas, o que em parte é a razão da falta de verificação por pares na literatura. A proposta deste novo grupo de equações é de facilitar sua compreensão, comparação e conseqüentemente validação.

Para a obtenção dos autovalores, os autores desconsideraram, com exceção da gravidade, qualquer termo forçante. Porém, nas equações canônicas estes forçamentos foram considerados mesmo porque são úteis para futuros estudos de controle por parte do ciclista ou de perturbações. Eles foram adicionados como três forças generalizadas ($T_{\theta_R}, T_{\varphi}$ e T_{δ}) definidas através da

potência virtual (P) associada a perturbações arbitrárias às velocidades ($d\theta_R/dt$,

$$P = \sum \mathbf{F}_i \cdot \Delta \mathbf{v}_i = T_\phi \Delta \dot{\phi} + T_\delta \Delta \dot{\delta} + T_{\theta_R} \Delta \dot{\theta}_R \quad d\phi/dt \text{ e } d\delta/dt), \text{ como:} \quad (2.58)$$

Assim, qualquer forçamento pode ser interpretado como uma combinação linear de T_{θ_R} , T_ϕ e T_δ , e estes por sua vez podem ser resumidos respectivamente como o resultado do torque nos pedais (ou qualquer força que impulse a bicicleta para frente), qualquer força lateral acima da linha do solo (dependendo do ponto de atuação, pode contribuir também para T_δ) e torque no guidão (ou qualquer força lateral exceto aquelas que são aplicadas nos pontos de contato dos pneus com o solo ou no eixo de esterçamento).

Como falado anteriormente, pelo desacoplamento das dinâmicas laterais e longitudinais e como o sistema é conservativo, a solução para um movimento sem forçamento no caso de uma bicicleta na vertical ($\phi = 0$ e $\delta = 0$) é uma

$$- \left[r_R^2 m_T + I_{Ryy} + (r_R/r_F)^2 I_{Fyy} \right] \ddot{\theta}_R = T_{\theta_R} \quad \text{velocidade constante } v = (d\theta_R/dt)r_R, \quad \text{e sua equação do movimento é facilmente obtida por mecânica bidimensional (plano xz) como:} \quad (2.59)$$

onde m_T é a massa total do sistema.

Para descrever as equações lineares da dinâmica lateral, foi definida a forma canônica impondo ao lado direito das equações que consistam somente de T_ϕ e T_δ que, como descrito anteriormente, são forças generalizadas e qualquer forçamento pode ser decomposto nestas grandezas. Neste sistema, representado na forma matricial, a primeira equação é de rolagem e a segunda equação é de esterçamento. De forma geral, sistemas mecânicos podem ser descritos como equações lineares na forma de $\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}\mathbf{q} = \mathbf{f}$. A forma escolhida em 1987 por PAPADOPOULOS (apud MEIJAARD *et al*, 2007) foi:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + v\mathbf{C}_1\dot{\mathbf{q}} + [g\mathbf{K}_0 + v^2\mathbf{K}_2]\mathbf{q} = \mathbf{f} \quad (2.60)$$

onde as variáveis são $\mathbf{q} = [\phi, \delta]^T$ e $\mathbf{f} = [T_\phi, T_\delta]^T$, v é a velocidade longitudinal e as matrizes constantes \mathbf{M} , \mathbf{C}_1 , \mathbf{K}_0 e \mathbf{K}_2 são definidas através dos 25 parâmetros da bicicleta da Tab. 2.1. \mathbf{M} é uma matriz simétrica de massas de forma que, quando a velocidade longitudinal da bicicleta é zero, a energia cinética é $\dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{M} \dot{\mathbf{q}}/2$.

A matriz \mathbf{C}_1 está ligada aos torques giroscópicos devidos à rolagem e ao esterçamento, assim como a reações inerciais devidas à velocidade de esterçamento ($d\delta/dt$). \mathbf{K}_0 é uma matriz que pode ser usada para obter a energia potencial como $\mathbf{q}^T[g\mathbf{K}_0]\mathbf{q}/2$ e finalmente \mathbf{K}_2 está relacionada com os efeitos giroscópicos e centrífugos.

2.4.4.

Teste e validação do modelo

A obtenção de cada um dos componentes das matrizes é detalhada no

$$\det(\mathbf{M}\lambda^2 + v\mathbf{C}_1\lambda + g\mathbf{K}_0 + v^2\mathbf{K}_2) = 0, \quad \text{apêndice A de MEIJAARD et al.}$$

(2007). Os autovalores (λ , que não devem ser confundidos com o ângulo do eixo de esterçamento do garfo λ) podem então ser obtidos para a equação homogênea (a equação 2.3 sem forçamento ou $\mathbf{f} = \mathbf{0}$), assumindo $\mathbf{q} = \mathbf{q}_0 e^{(\lambda t)}$, e portanto $\dot{\mathbf{q}} = \lambda \mathbf{q}_0 e^{(\lambda t)}$ e $\ddot{\mathbf{q}} = \lambda^2 \mathbf{q}_0 e^{(\lambda t)}$. Assim, a solução desta equação se resume a:

(2.61)

Portanto, variando-se a velocidade v , obtêm-se diferentes autovalores conforme apresentado na Fig. 2.20. Os autovalores com parte real positiva estão associados a movimentos instáveis, aqueles com parte real negativa estão associados a movimentos assintoticamente estáveis e finalmente aqueles com parte imaginária estão associados a movimentos oscilatórios.

Este sistema de duas equações de segunda ordem cada tem quatro autovalores distintos, exceto em configurações muito particulares associadas, onde se pode ter uma solução múltipla.

Como se pode observar na figura citada, com velocidade bem pequena têm-se dois pares de autovalores positivo e negativo, que correspondem a um pêndulo invertido. Isso condiz com a realidade, pois como pode ser observado na prática, quando em pequenas velocidades uma bicicleta padrão tem a tendência, assim como um pêndulo invertido, de tombar para um dos lados sem oscilar (predomínio do comportamento conhecido como “capsize”).

Quando a bicicleta alcança então uma velocidade de aproximadamente 0,7m/s, duas raízes reais coincidem e a partir de então formam um par de complexos conjugados, o que significa que o movimento oscilatório começa a surgir, mas ainda é instável, pois as suas partes reais são positivas. Novamente,

agora com um pouco mais de atenção, este teste pode ser confirmado na prática, ao se colocar uma bicicleta em baixa velocidade (mas não tão pequena para cair de vez). Será possível então perceber a oscilação da roda dianteira e, para um observador mais atento, até mesmo uma oscilação na inclinação do quadro, antes de sua queda (predomínio do comportamento conhecido como “weave”).

Até a velocidade de aproximadamente 4,3 m/s esta oscilação é instável, mas a partir daí todas as partes reais passam a ser negativas e esta oscilação passa a ser estabilizante. Também este resultado condiz com a realidade e diversos experimentos demonstraram esta característica. Até um ciclista pouco experiente percebe que começar a pedalar é a parte mais instável e que, depois de sair da inércia inicial, a bicicleta torna-se bem mais fácil de manter estável, condizendo com o resultado aqui obtido.

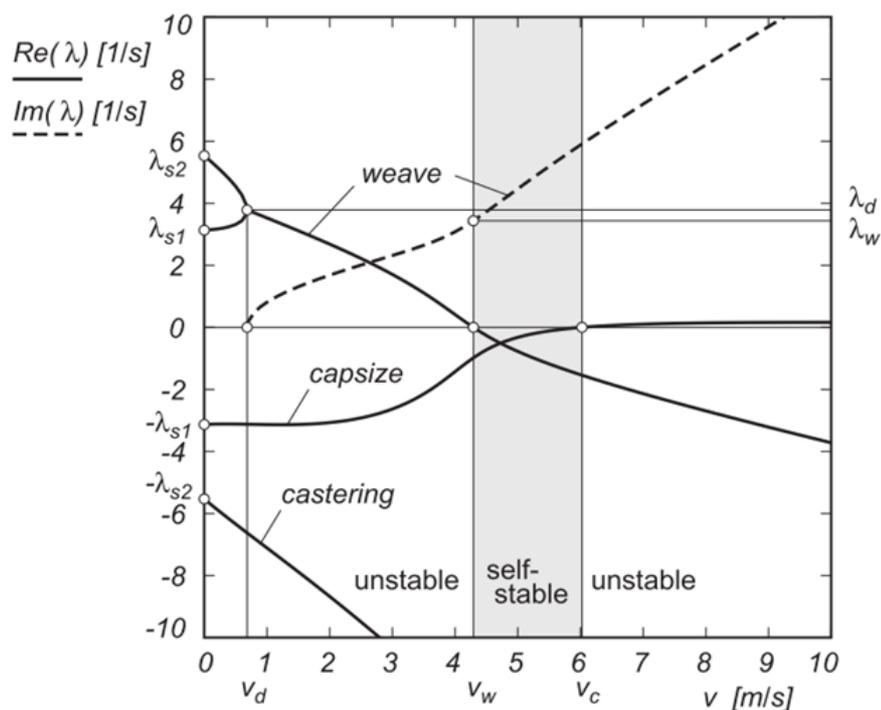


Figura 2.20 – Autovalores de 2.3 para v até 10m/s - Fonte: MEIJAARD et al. (2007)

A partir da $v \approx 6,0\text{m/s}$, quando uma das raízes puramente reais assume valor positivo (bem pequeno), a bicicleta volta a ser ligeiramente instável. Assim como o segundo modo aqui analisado, este também não é tão intuitivo, mas ciclistas de competição, onde velocidades altas são impressas (e com isso o valor positivo ganha uma boa importância), por vezes têm dificuldades em manter a estabilidade e acabam sofrendo acidentes.

Além dos resultados anteriores condizerem com o comportamento esperado de uma bicicleta sem controle ativo, MEIJAARD *et al.* (2007) citam que suas equações são compatíveis com outras encontradas em literatura anterior, assim como tiveram seus coeficientes satisfatoriamente verificados em simulações de dinâmicas não lineares através de dois programas. O primeiro programa foi o SPACAR, que é baseado em elementos finitos. O segundo foi o Autosim, que é uma programação simbólica para dinâmicas de sistemas de corpos rígidos. Detalhes de suas implementações podem ser vistos nos apêndices 2 e 3 de MEIJAARD *et al.* (2007), respectivamente.

Apesar de a modelagem aqui apresentada ter sua validação verificada, seu nível de detalhamento não está adequado ao esperado pelo grupo de trabalho de dinâmica de veículos de duas rodas da PUC-Rio, que busca por modelagem que possa ser de melhor visualização e compreensão, auxiliando não somente no ensino dos conceitos que envolvem estes veículos, mas também em futura análise de malha fechada quando da aplicação de controle, seja de estabilidade, de trajetória e/ou de velocidade.

2.5. Modelagem Dinâmica de Bicicletas e Motocicletas por Fluxo de Potência

O conteúdo apresentado neste subitem foi extraído de um artigo já aceito pelo CONEM 2016 (Congresso Nacional de Engenharia Mecânica de 2016). O artigo foi intitulado como “Dynamic Models of Bicycles and Motorcycles using Power Flow Approach”, e foi escrito pelo autor desta tese em coautoria com dois professores doutores do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC – Rio, dos quais um deles é o atual orientador desta tese.

2.5.1. Introdução

No intuito de facilitar a implantação do controle e a visualização dos diversos conceitos que envolvem a dinâmica de veículos de duas rodas com bitola nula, apresenta-se neste subitem um procedimento para determinação da forma analítica de modelos dinâmicos de bicicletas e/ou motocicletas através da caracterização do fluxo de potência entre seus componentes (condutor, guidão e quadro, suspensões e rodas/pneus, motor, transmissão e freios) incluindo a

influência do efeito giroscópio e as interações entre as dinâmicas longitudinal, lateral e vertical desses veículos.

A partir das relações cinemáticas, associadas às velocidades dos respectivos graus de liberdade de cada corpo envolvido no veículo (condutor, guidão, quadro, transmissão e freios, mecanismos das suspensões e rodas/pneus), determinam-se os vínculos entre seus vários componentes.

Considerando o fluxo de potência entre os graus de liberdade e entre esses e os elementos dos subsistemas determinam-se as relações de equilíbrio entre as forças e torques, e finalmente, incluindo os efeitos inerciais, de rigidez e de amortecimento dos diversos componentes encontram-se analiticamente as equações de movimento ou as equações de estado que caracterizam a dinâmica desses veículos, representadas em qualquer referencial (locais ou global) que se desejar.

Esse procedimento é modular, podendo ser aplicado na modelagem de subsistemas de menor porte (como menos componentes e graus de liberdade) que posteriormente serão acoplados, também através do fluxo de potência, para geração do modelo de um novo subsistema representando as características dinâmicas dos anteriores e suas interações. Essa abordagem adota os mesmos fundamentos, conceitos e elementos da Técnica dos Grafos de Ligação, sem a necessidade da notação simbólica e representação gráfica. Como ilustração, aplica-se o procedimento para a modelagem das dinâmicas longitudinal, vertical e lateral acopladas de uma motocicleta para fins da análise de sua estabilidade no plano vertical/lateral.

O desenvolvimento de modelos analíticos para veículos terrestres com bitola nula (motocicletas e bicicletas), instáveis por natureza, tem sido tratado por alguns poucos autores, principalmente devido às características extremamente particulares e sua complexidade, uma vez que envolve diversas e diferentes interações entre seus subsistemas componentes (condutor, guidão e quadro, suspensões e rodas/pneus, motor, transmissão e freios), além de um fenômeno de natureza mecânica dinâmica, o efeito giroscópio, que por si já é um fator complicador.

Neste subitem apresentam-se os resultados de um procedimento para a completa representação desses veículos, a partir dos modelos analíticos de módulos dos seus subsistemas, mais simples e fáceis de construir e analisar, que podem ser acoplados para a construção do modelo de um sistema que envolva mais de um conjunto de componentes, de acordo com o interesse do

analista, desde que determinadas restrições de compatibilidade sejam respeitadas.

Tal procedimento tem como base a Técnica dos Grafos de Ligação, e toda sua potencialidade, para desenvolvimento dos modelos dos módulos. Entretanto o formalismo e a representação gráfica dos Grafos de Ligação deixam de ser necessários uma vez construído o modelo de um módulo, em função do fluxo de potência e relações de causalidade entre seus elementos internos e, principalmente, nas portas de entrada e saída de potência do módulo. Assim o módulo pode ser acoplado à outros, cujos modelos foram criados respeitando tais restrições e, desta forma, o modelo analítico de um sistema construído a partir de vários subsistemas pode ser facilmente estabelecido pela união consistente em termos de potência e causalidade, sem necessariamente aplicar o tratamento formal da Técnica dos Grafos de Ligação. A Figura 2.21 apresenta os vários subsistemas típicos de um veículo terrestre tipo motocicleta/bicicleta, e as variáveis que caracterizam interação entre eles. Os módulos desenvolvidos empregam exatamente a estrutura e variáveis de entrada e saída mostradas.

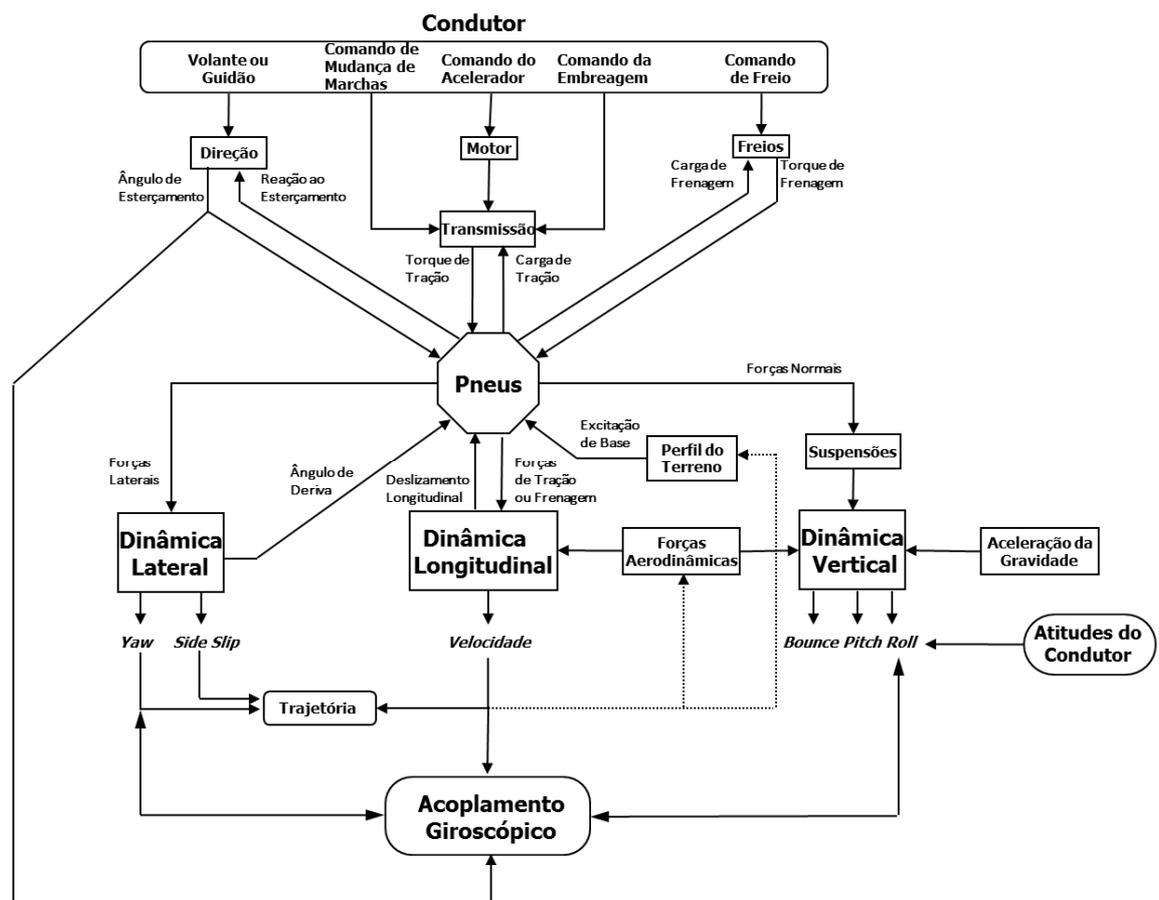


Figura 2.21 - Interação de subsistemas em uma motocicleta - Fonte: MARTINS et al. (2016)

Nos modelos desenvolvidos a seguir as atitudes do condutor não serão consideradas, entretanto, caso necessário, a mesma abordagem apresentada pode ser aplicada e, uma vez obtida a representação dos movimentos típicos do ser humano na condução desse veículo, sua inserção nos devidos graus de liberdade e consequente interação como um subsistema adicional é imediatamente estabelecida. Os modelos serão descritos na sequência considerada a mais natural e de fácil compreensão, e em alguns subsistemas as representações matemáticas serão simplificadas ou mesmo omitidas, uma vez que o interesse deste capítulo recai justamente na descrição do procedimento de determinação dos módulos e nas suas interações, a partir do qual a aplicação do tratamento formal da Técnica dos Grafos de Ligação possibilita encontrar facilmente a forma final analítica do modelo de cada um dos módulos e dos subsistemas formados pelas suas combinações.

As Figuras 2.22 e 2.23 ilustram o sistema multicorpo motocicleta/bicicleta com seus os corpos típicos, nos referenciais adotados para descrever seus movimentos, as suas principais velocidades angulares e parâmetros geométricos, para fins de identificação da notação utilizada no desenvolvimento dos modelos. As demais variáveis dos diversos subsistemas serão definidas nos itens a seguir, na medida do necessário.

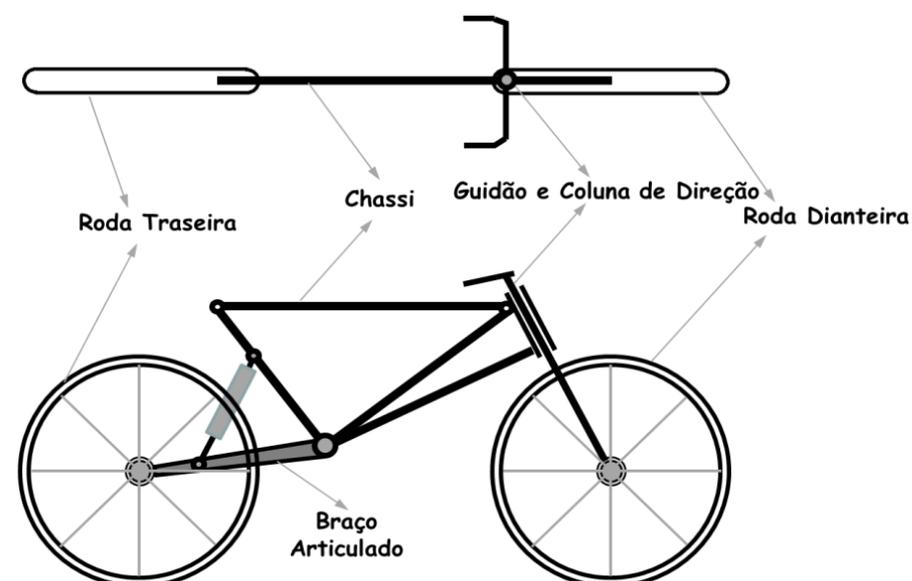


Figura 2.22 - Motocicleta como um sistema multicorpo - Fonte: MARTINS *et al.* (2016)

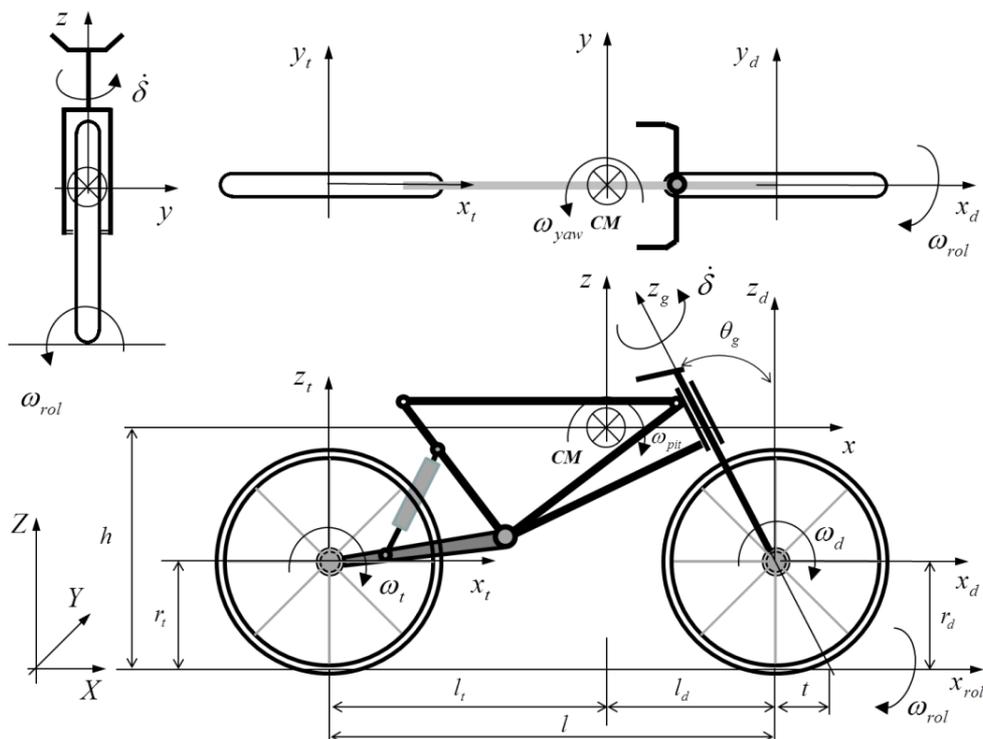
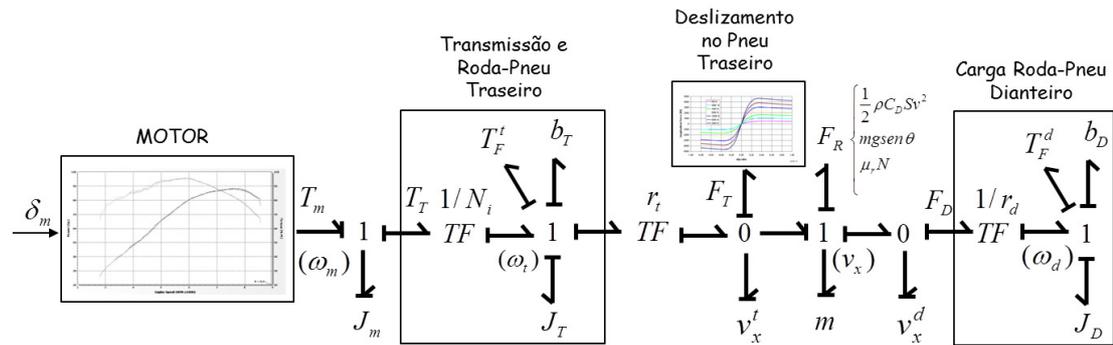


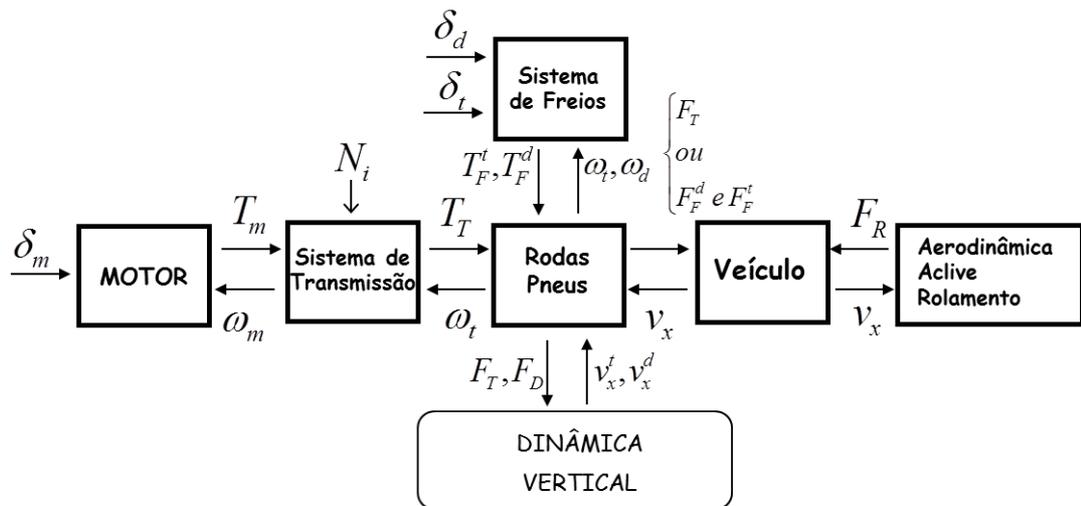
Figura 2.23 - Referenciais, velocidades angulares e parâmetros geométricos no sistema da motocicleta - Fonte: MARTINS *et al.* (2016)

2.5.2. Dinâmica longitudinal

Inicialmente apresenta-se o modelo da dinâmica longitudinal da motocicleta por ser o mais simples, comum a qualquer veículo e de fácil compreensão. O Grafo de Ligação (Fig. 2.24a) destaca os principais elementos ou componentes do sistema, o fluxo de potência entre eles (indicado pelo sentido da meia-seta), e as suas relações de causa e efeito (representadas pelo sentido do esforço através da barra causal vertical). O Grafo de Fluxo de Potência (Fig. 2.24b) é uma forma compacta de representar o mesmo sistema, na qual encontram-se indicados apenas os componentes e suas variáveis de entrada e saída, como os comandos no motor e nos freios (δ_m, δ_a e δ_t), a relação de transmissão da marcha inserida (N_i) e as variáveis de esforço (torques e forças) e fluxo (velocidades angulares e linear) com os respectivos vínculos de causa e efeito em cada um deles.



(a) Grafo de Ligação



(b) Grafo de Fluxo de Potência

Figura 2.24 - Modelo para dinâmica longitudinal - Fonte: MARTINS et al. (2016)

O motor é representado apenas por sua curva de desempenho, obtida, por exemplo, a partir de testes experimentais em dinamômetro, relacionando o comando (δ_m) fornecido pelo condutor com a velocidade angular de entrada (ω_m) e o torque de saída (T_m). Foram incluídos para tratar da forma mais completa possível o consumo de potência no sistema as perdas nos mancais da transmissão e das rodas (b_T e b_d), o deslizamento (b_δ) do pneu traseiro (de tração), que pode ser modelado por qualquer relação de interesse, linear ou não linear, a carga do pneu/roda dianteiro e as forças resistivas (F_R) devidas ao arrasto aerodinâmico, aos acíves (ângulo da via θ_{via}) e ao atrito de rolamento nos pneus (μ_r). O subsistema de freios não é detalhado, considera-se apenas os comandos de frenagem e os torques gerados nas rodas dianteira e traseira. A Tabela 2.2 no final deste item lista os parâmetros empregados em todos os modelos tratados.

Desprezando o deslizamento no pneu traseiro em tração, não há patinação, e supondo que não haverá travamento das rodas durante qualquer condição de frenagem, ou seja, a máxima força de atrito (μN) não será ultrapassada em qualquer pneu, a partir das relações associadas às representações da Fig. 2.24, devidamente manipuladas, o modelo matemático que caracteriza a dinâmica longitudinal de uma motocicleta (ou bicicleta), tendo como entradas os comandos impostos no elemento de propulsão e nos freios, e saídas a aceleração, velocidade e deslocamento do veículo, é dado por:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dv}{dt} = \frac{1}{m_E} \left(\frac{N_i}{r_t} T_m \left(\delta_m, \frac{N_i}{r_t} v \right) - b_E v - \frac{1}{2} \rho C_D S v^2 - (\mu_r + \mu \delta_d) N_d - (\mu_r + \mu \delta_t) N_t - mg \operatorname{sen} \theta_{via} \right) \\ \frac{dx}{dt} = v \end{array} \right. \quad (2.62)$$

nas quais a massa e dissipação equivalentes são dadas por:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_E = m + \frac{N_i^2}{r_t^2} J_m + \frac{1}{r_t^2} J_T + \frac{1}{r_d^2} J_D \\ b_E = \frac{N_i \dot{N}_i}{r_t^2} J_m + \frac{N_i^2}{r_t^2} b_m + \frac{1}{r_t^2} b_T + \frac{1}{r_d^2} b_D \end{array} \right. \quad (2.63)$$

As relações complementares que possibilitam determinar as normais (N_d e N_t) no contato dos pneus com o solo a cada instante de tempo serão obtidas a partir da interação entre os modelos das Dinâmicas Longitudinal e Vertical, que será tratado a seguir. Note que se o atrito de rolamento nos pneus for desprezado e não houver frenagem as normais não interferem no comportamento do veículo em tração (ganho de velocidade), nesse modelo no qual não há deslizamento do pneu traseiro. Deve-se observar que modelos incluindo os efeitos desprezados podem ser facilmente obtidos a partir do tratamento apresentado.

2.5.3. Dinâmica vertical

A Figura 2.25 apresenta o modelo físico e a Fig. 2.26 o Grafo de Ligação e o Grafo de Fluxo de Potência para Dinâmica Vertical de uma motocicleta, considerando as geometrias típicas das suspensões dianteira e traseira. Se for adotado um modelo físico no qual não há geometria das suspensões, ou seja, as

linhas de ação das molas e amortecedores são verticais, alinhadas com os deslocamentos das massas não suspensas, e não há dissipação nos pneus, tem-se o Grafo de Fluxo de Potência idêntico ao da Fig. 2.26b, pois essa representação não necessita do detalhamento “interno” dos componentes do sistema.

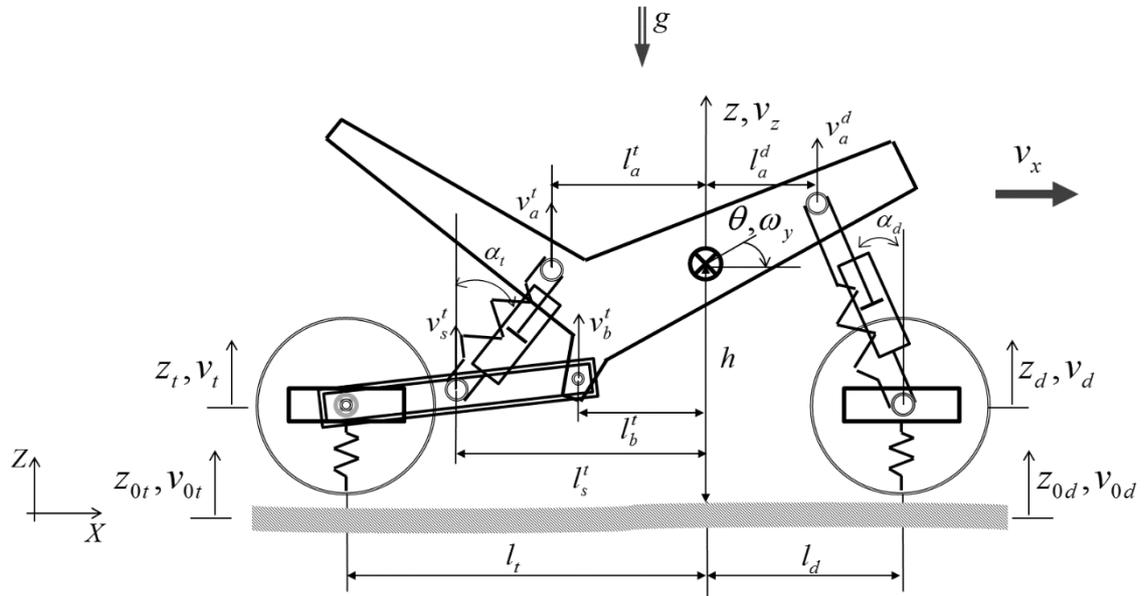
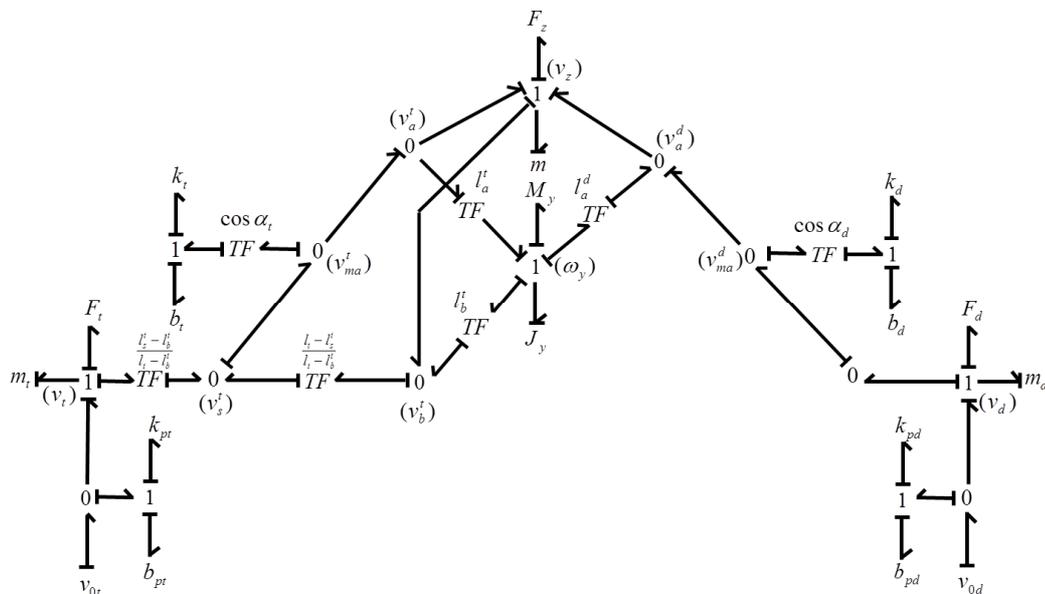
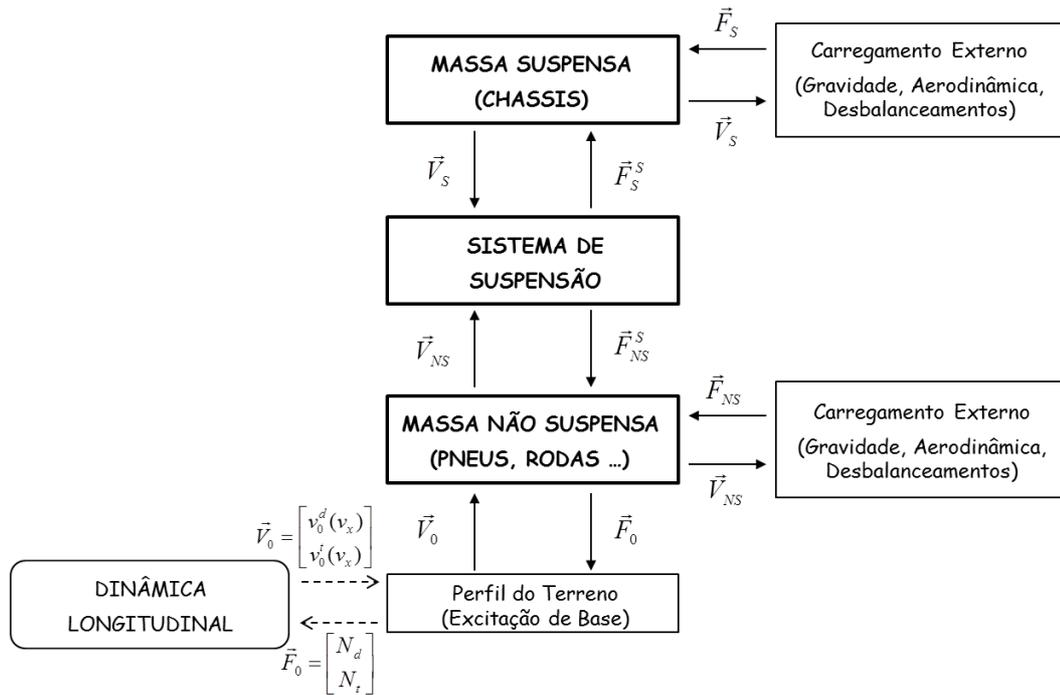


Figura 2.25 - Modelo físico com geometria das suspensões para dinâmica vertical - Fonte: MARTINS *et al.* (2016)



(a) Grafo de Ligação com geometria das suspensões



(b) Grafo de Fluxo de Potência

Figura 2.26 - Modelo para dinâmica vertical - Fonte: MARTINS *et al.*

(2016)

Considerando:

$$l_a^t = l_b^t = l_s^t = l_t \quad e \quad l_a^d = l_d \quad e \quad \alpha_t = \alpha_d = 0^\circ \quad e \quad b_{pd} = b_{pt} = 0 \quad (2.64)$$

o modelo matemático na forma de equações de movimento utilizado para representar a dinâmica vertical no plano XZ de uma motocicleta sobre suspensão passiva (convencional) se deslocando em uma estrada com pavimentação irregular, ondulações ou rugosidade, relacionando as entradas (F_z , M_y , F_d , F_t , z_{0d} , z_{0t}) com os seus graus de liberdade (z , θ , z_d , z_t), é dado por:

$$M \begin{bmatrix} \ddot{z} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{z}_d \\ \ddot{z}_t \end{bmatrix} + B \begin{bmatrix} \dot{z} \\ \dot{\theta} \\ \dot{z}_d \\ \dot{z}_t \end{bmatrix} + K \begin{bmatrix} z \\ \theta \\ z_d \\ z_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_z \\ M_y \\ F_d \\ F_t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ k_{pd} & 0 \\ 0 & k_{pt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_{0d} \\ z_{0t} \end{bmatrix} \quad (2.65)$$

na qual $z_{0d}(t) = \int v_{0d}(t)dt$ e $z_{0t}(t) = \int v_{0t}(t)dt$ representam as condições da pavimentação e:

$$M = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & J_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_d & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_t \end{bmatrix} \quad (2.66)$$

$$B = \begin{bmatrix} (b_d + b_t) & (l_t b_t - l_d b_d) & -b_d & -b_t \\ (l_t b_t - l_d b_d) & (l_t^2 b_t + l_d^2 b_d) & l_d b_d & -l_t b_t \\ -b_d & l_d b_d & b_d & 0 \\ -b_t & -l_t b_t & 0 & b_t \end{bmatrix} \quad (2.67)$$

$$K = \begin{bmatrix} (k_d + k_t) & (l_t k_t - l_d k_d) & -k_d & -k_t \\ (l_t k_t - l_d k_d) & (l_t^2 k_t + l_d^2 k_d) & l_d k_d & -l_t k_t \\ -k_d & l_d k_d & k_d + k_{pd} & 0 \\ -k_t & -l_t k_t & 0 & k_t + k_{pt} \end{bmatrix} \quad (2.68)$$

São respectivamente, as matrizes de inércia, amortecimento e rigidez do sistema, nesse caso linear e invariante no tempo.

2.5.4. Integração das dinâmicas longitudinal e vertical

A Figura 2.27 apresenta o Grafo de Ligação para acoplamento/integração das Dinâmicas Longitudinal, não detalhada, e Vertical, representada pelo veículo sem geometria das suspensões, conforme o equacionamento do item anterior. O vínculo entre os dois modelos é dado pelas velocidades longitudinais dos pontos de contato dos pneus com o solo, nos quais as forças de tração e/ou frenagem (F_T e F_D) são aplicadas. A Figura 2.27b mostra o Grafo de Fluxo de Potência dos dois subsistemas acoplados e as respectivas variáveis de acoplamento.

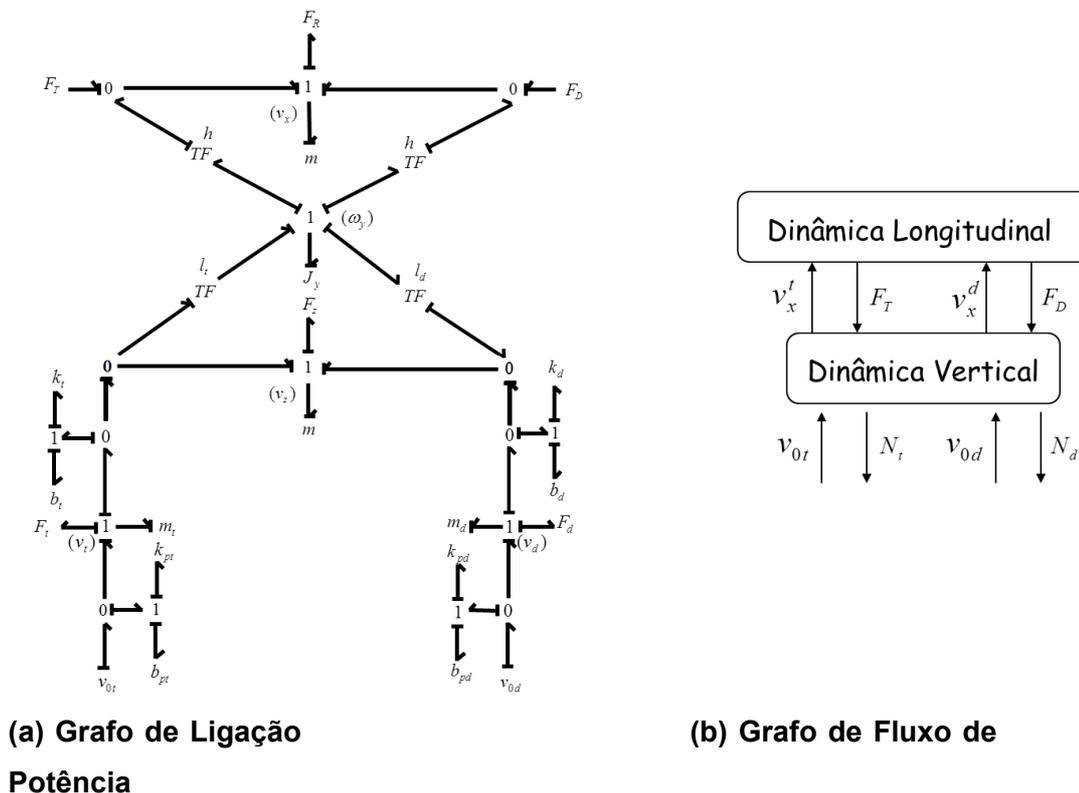


Figura 2.27 - Modelo para integração das dinâmica longitudinal e vertical - Fonte: MARTINS *et al.* (2016)

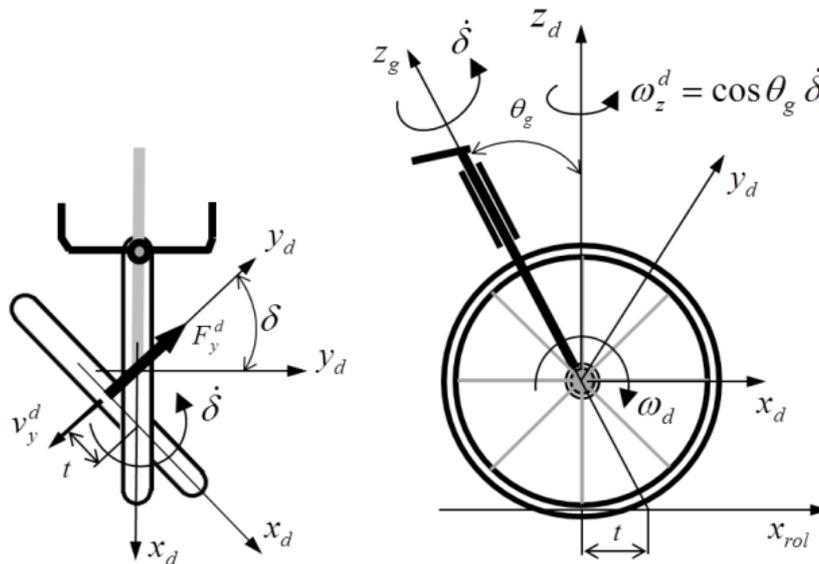
Desconsiderando a influência das suspensões e das deformações e dissipações dos pneus na direção vertical, as forças normais no contato dos pneus com o solo são obtidas a partir dos modelos da Fig. 2.24 e da Fig. 2.27 combinados, e dadas por:

$$\begin{cases} N_d(t) = \frac{mg(\cos\theta_{via}(l_t + \mu\delta_t h) - \text{sen}\theta_{via} h) - \frac{N_i}{r_i} T_m h - \frac{1}{2} \rho C_D S v^2 h}{(l_t + l_d + \mu(\delta_t - \delta_d)h)} \\ N_t(t) = \frac{mg(\cos\theta_{via}(l_d - \mu\delta_d h) + \text{sen}\theta_{via} h) + \frac{N_i}{r_i} T_m h + \frac{1}{2} \rho C_D S v^2 h}{(l_t + l_d + \mu(\delta_t - \delta_d)h)} \end{cases} \quad (2.69)$$

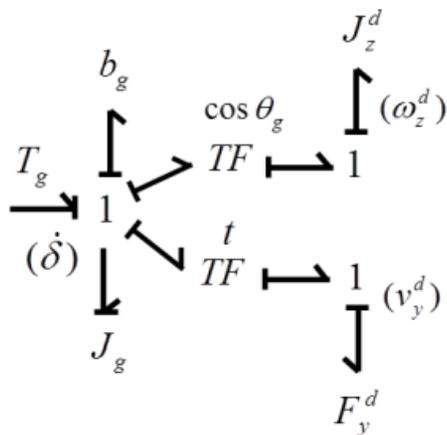
2.5.5. Dinâmica lateral

A Figura 2.28 ilustra o modelo físico e as principais variáveis do subsistema Guião e o Grafo de Ligação que possibilita obter as equações que descrevem seu o movimento de rotação (δ), em função do torque (T_g) do condutor, incluindo a inércia (J_g) e a dissipação no mancal (b_g) do garfo, a inércia da roda dianteira (J_z^d) na direção vertical, e o torque restaurador devido ao “trail”

e à força lateral dianteira (F_y^d) gerada no contato do pneu com o solo. Tal subsistema é o responsável pela excitação da Dinâmica Lateral e controle direcional da motocicleta/bicicleta, principalmente se não forem consideradas as atitudes do condutor (posicionamento do seu corpo em relação ao veículo).



(a) Modelo físico e variáveis

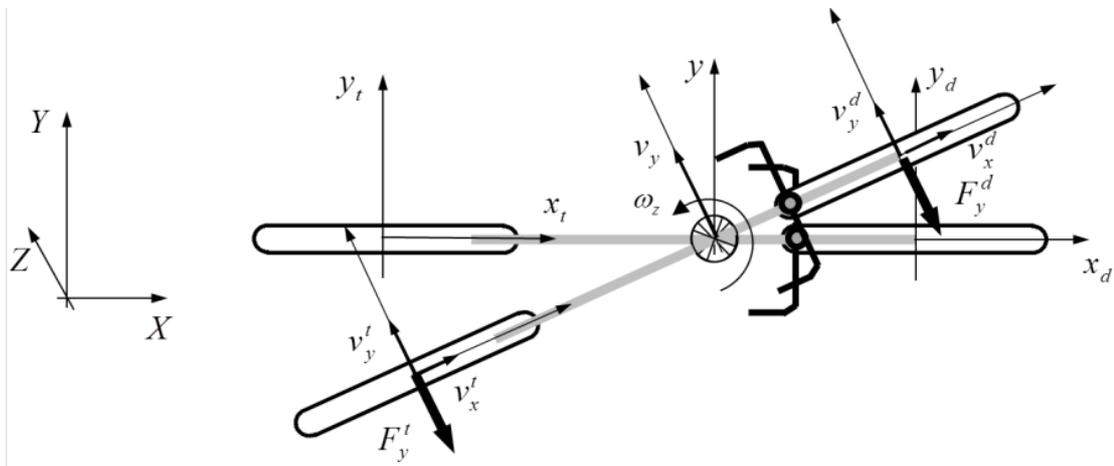


(b) Grafo de Ligação

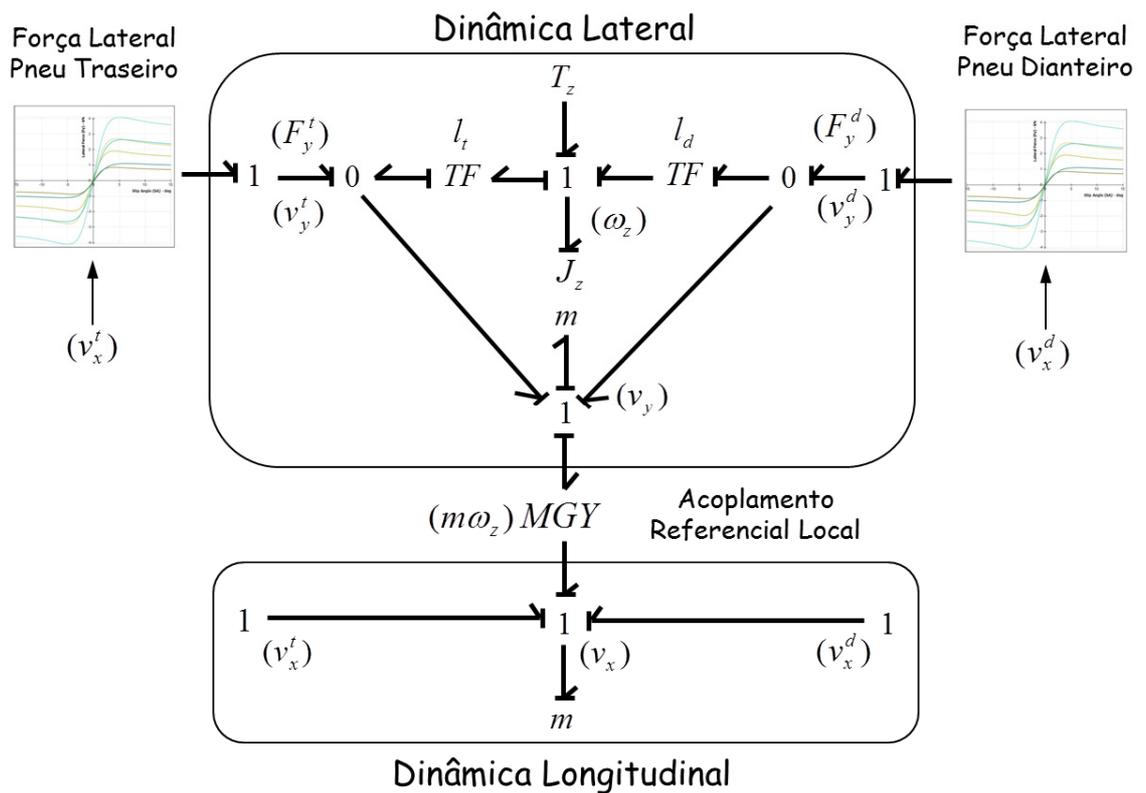
Figura 2.28 - Subsistema guidão - Fonte: MARTINS *et al.* (2016)

A Figura 2.29 apresenta o modelo físico, as variáveis, os parâmetros e o Grafo de Ligação para o tratamento Dinâmica Lateral, incluindo sua interação com a Dinâmica Longitudinal, uma vez que normalmente tal problema é descrito e resolvido no referencial local do veículo, exigindo que as equações que regem seus movimentos sejam devidamente corrigidas, devido ao fato de se trabalhar em um referencial não inercial. O modelo desenvolvido considera significativa

apenas a velocidade angular de guinada (*yaw*) do chassi, desprezando a influência das suas velocidades angulares de rolagem (*roll*) e arfagem (*pitch*).



(a) Modelo físico e variáveis



(b) Grafo de Ligação

Figura 2.29 - Dinâmica lateral - Fonte: MARTINS *et al.* (2016)

2.5.6. Acoplamento giroscópico

A Figura 2.30 mostra o Grafo de Ligação para o acoplamento das velocidades angulares de um corpo rígido no referencial local, para um corpo simétrico, uma forma simples de tratar o efeito giroscópico e sua influência no movimento de um veículo como a motocicleta/bicicleta. Todos os acoplamentos dessa natureza, fundamentais para compreensão e análise desse sistema foram representados pela estrutura da Fig. 2.30, incluídas as devidas relações entre as variáveis envolvidas nos diversos corpos/subsistemas nos quais há tal influência (chassi, roda traseira, roda dianteira e guidão).

A partir do Grafo de Ligação da Fig. 2.30, as Equações de Euler podem ser imediatamente determinadas como:

$$\begin{bmatrix} \sum T_x \\ \sum T_y \\ \sum T_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_x & 0 & 0 \\ 0 & J_y & 0 \\ 0 & 0 & J_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\omega}_x \\ \dot{\omega}_y \\ \dot{\omega}_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (J_z - J_y)\omega_z\omega_y \\ (J_x - J_z)\omega_z\omega_x \\ (J_y - J_x)\omega_y\omega_x \end{bmatrix} \quad (2.70)$$

e o problema de representação, compreensão, interpretação, análise e simulação do efeito giroscópico resolvido, nos regimes transiente e permanente, para cada corpo associado à essa estrutura ou para uma combinação de corpos.

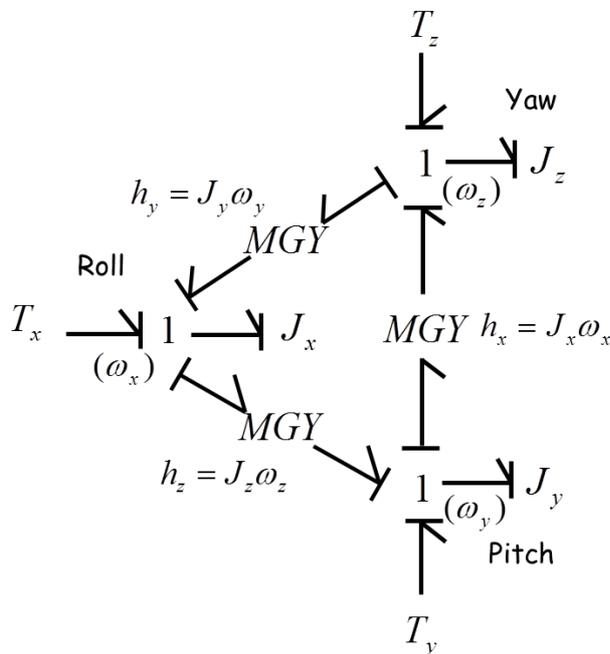


Figura 2.30 - Grafo de Ligação para o acoplamento de corpo rígido no referencial local - Fonte: MARTINS et al. (2016)

2.5.7.

Integração das dinâmicas longitudinal, vertical e lateral

A Figura 2.31 mostra a integração dos diversos subsistemas tratados anteriormente com as principais estruturas da motocicleta (chassi e rodas dianteira e traseira) representadas pelo Grafo de Ligação do item anterior, com as variáveis associadas à transferência de potência entre eles. Com os módulos desenvolvidos e testados separadamente, a “montagem” da Fig. 2.31 permite não apenas visualizar o sistema completo, com também determinar analiticamente seu modelo matemático pela manipulação orientada das equações de cada um dos seus componentes ou combinações desses. Além disso é relativamente simples criar qualquer submodelo a partir da união dos modelos dos módulos de interesse.

Observa-se que o vínculo existente entre a rolagem do chassi e das rodas encontra-se explicitado no modelo da Fig. 2.31, assim como também a influência da sua guinada forçando as rodas nessa direção. De modo a simplificar a apresentação dos modelos desenvolvidos, as transformações de referenciais foram omitidas propositalmente na Fig. 2.31. Deve-se considerar que tais operações estão implícitas nas relações entre algumas das variáveis dos diversos subsistemas tratados, ou que foi adotada a hipótese de pequenos ângulos de rotação de acordo com a natureza do movimento esperado, como no caso da arfagem do chassi sobre a suspensão.

O modelo analítico completo do sistema da motocicleta ou de alguns de seus subsistemas podem ser facilmente estabelecidos com base na metodologia apresentada. Entretanto é mais conveniente e recomendado realizar testes individuais com os módulos desenvolvidos e algumas das suas combinações, de modo a verificar que o procedimento adotado é consistente e bem fundamentado, e se, e quando necessário, acoplar computacionalmente os modelos de interesse, considerando suas variáveis de potência e relações de causa e efeito, sem a necessidade do desenvolvimento de formas fechadas, a menos que a análise do sistema assim exija.

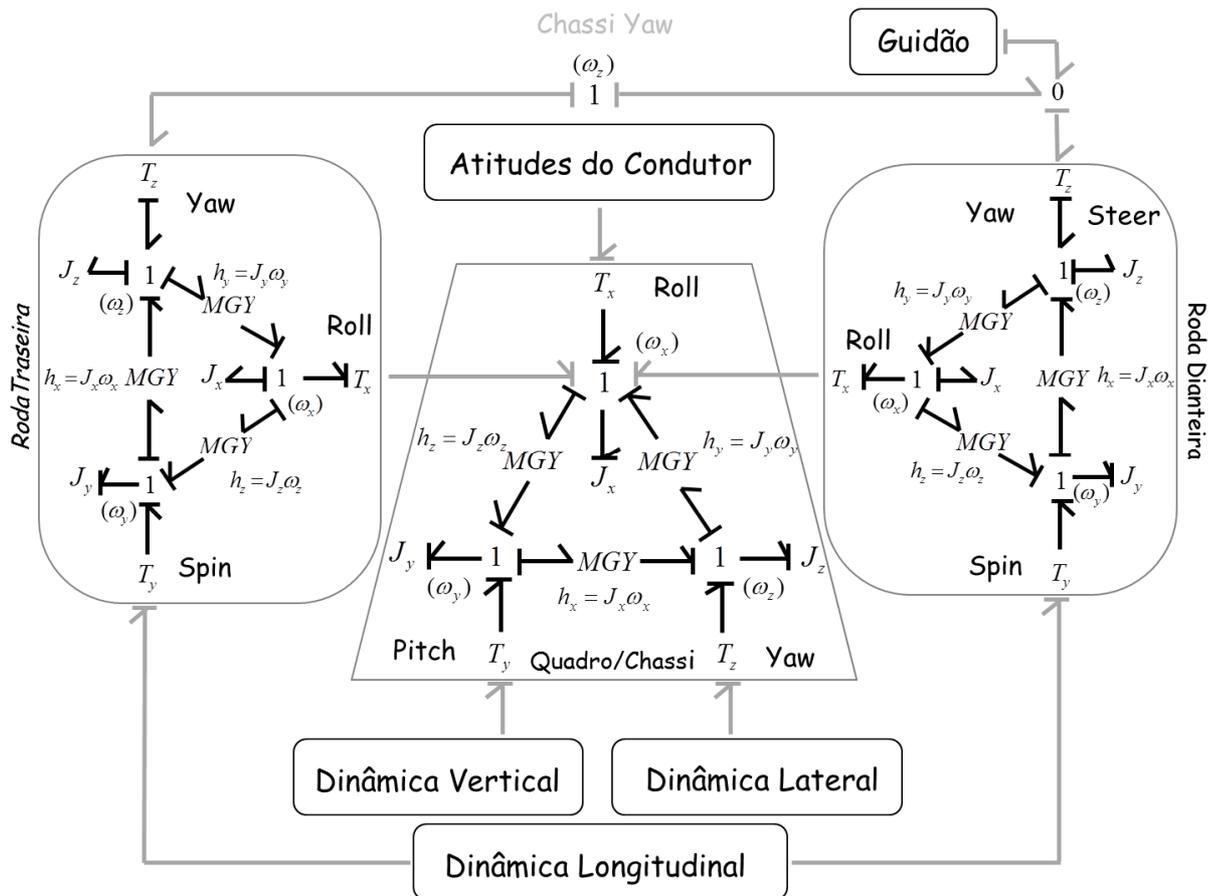


Figura 2.31 - Grafo misto de Ligação/Fluxo de Potência do sistema da motocicleta com o acoplamento para os movimentos de rotação - Fonte: MARTINS *et al.* (2016)

A Tabela 2.2 lista os parâmetros (com a simbologia adotada e suas unidades SI) empregados nos modelos matemáticos desenvolvidos, cujos valores numéricos devem ser determinados, de modo que as dinâmicas do sistema possam ser resolvidas e analisadas.

Através das técnicas apresentadas e do modelo obtido, acredita-se que a visualização dos conceitos envolvidos torna-se mais intuitiva, simplificando não só o entendimento na fase de aprendizagem da dinâmica de sistemas complexos, como também sendo excelente ferramenta para o desenvolvimento de engenharia de alto nível. Logo, estas metodologias servem não somente para o desenvolvimento de objetos de aprendizagem (como apostilas), mas também como instrumental de modelagem para os futuros engenheiros.

Parâmetro	Símb.	Unid.
Massa total (suspensa+não suspensa) – Din.Longitudinal	m	kg
Massa suspensa (quadro, guidão + condutor) – Din.Vertical	m	kg
Massa (não suspensa) do conjunto roda-pneu dianteiro	m_d	kg
Massa (não suspensa) do conjunto roda-pneu traseiro	m_t	kg
Raio efetivo pneu-roda dianteiro (contato com o solo)	r_d	m
Raio efetivo pneu-roda traseiro (contato com o solo)	r_t	m
Relações de transmissão (i = marchas)	$N_i, i=1...n$	--
Distância do eixo dianteiro ao CM (bicicleta + condutor)	\dot{N}_i	1/s
Distância do eixo traseiro ao CM (bicicleta + condutor)	l_d	m
Distância entre eixos	l_t	m
Altura do CM (bicicleta + condutor) em relação ao solo	$l = l_d + l_t$	m
Altura do CM (bicicleta + condutor) em relação ao solo	h	m
Coeficiente de resistência ao rolamento nos pneus	μ_r	--
Coeficiente de atrito estático pneu-solo (limite de aderência)	μ	--
Coeficiente de dissipação no mancal da roda dianteira	b_D	Nm/rad/s
Coeficiente de dissipação no mancal da roda traseira e transmissão	b_T	Nm/rad/s
Momento de inércia de arfagem – pitch (veículo + condutor)	J_y	kg.m ²
Rigidez das molas das suspensões	k_d e k_t	N/m
Amortecimento dos amortecedores das suspensões	b_d e b_t	N/m/s
Rigidez dos pneus	k_{pd} e k_{pt}	N/m
Amortecimento dos pneus	b_{pd} e b_{pt}	N/m/s
Área de seção reta do veículo + corpo condutor (em uma posição)	S	m ²
Coeficiente de arrasto do veículo + condutor (umaposição)	C_D	--
Massa específica do ar (ao nível do mar)	ρ	kg/m ³
Ângulo do eixo do guidão em relação à vertical (headangle)	θ_g	rad
“Trail”	t	m
Aceleração da gravidade	g	m/s ²
Momento de inércia do motor	J_m	kg.m ²
Momento de inércia da roda traseira	J_T	kg.m ²
Momento de inércia da roda dianteira	J_D	kg.m ²
Ângulo da via	θ_{via}	rad
Massa equivalente	m_E	kg

Tabela 2.2 - Parâmetros empregados nos modelos do sistema motocicleta/bicicleta - Fonte: MARTINS et al. (2016)

Parâmetro	Símb.	Unid.
Coeficiente de dissipação equivalente	b_E	N/m /s
Coeficiente de dissipação do motor	b_m	Nm/rad/s
Distância do ponto de ancoragem traseiro superior ao CM	l_a^t	m
Distância do ponto de ancoragem dianteiro superior ao CM	l_a^d	m
Distância da articulação do braço inferior da suspensão CM	l_b^t	m
Distância do ponto de ancoragem traseiro inferior CM	l_s^t	m
Ângulo do eixo da suspensão traseira em relação à vertical	α_t	rad
Ângulo do eixo da suspensão dianteira em relação à vertical	α_d	rad
Momento de inércia do garfo	J_g	kg.m ²
Coeficiente de dissipação do garfo	b_g	Nm/rad/s
Momento de inércia de guinada – yaw (roda dianteira)	J_z^d	kg.m ²
Momento de inércia de guinada – yaw (veículo + condutor)	J_z	kg.m ²
Momento de inércia de rolagem – roll (veículo + condutor)	J_x	kg.m ²

Tabela 2.2 - Parâmetros empregados nos modelos do sistema motocicleta/bicicleta (continuação) - Fonte: MARTINS *et al.* (2016)

3 Concepção e Modelagem de Aparatos para Compreensão e Análise do Comportamento Dinâmico de Bicicletas e Motocicletas

*“A teoria sem a prática vira
'verbalismo', assim como a prática
sem teoria, vira ativismo.
No entanto, quando se une a
prática com a teoria tem-se a práxis,
a ação criadora e modificadora da
realidade.”*
Paulo Freire

3.1. Introdução

Este capítulo apresenta os aparatos que estão sendo concebidos no Laboratório de Desenvolvimento de Sistemas Mecatrônicos (LDSM) da PUC-Rio. Eles visam facilitar a compreensão da complexa dinâmica de veículos em geral. Esses aparatos podem ser utilizados como recursos didáticos dentro de projetos em PBL que abrangem as Engenharias Mecânica e de Controle e Automação (como aqueles que serão apresentados no capítulo 6).

Assim, este capítulo pode ser visto como a “ponte” que liga os dois objetivos gerais deste trabalho, pois a concepção desses aparatos, voltados para o ensino de conceitos de engenharia, se baseou nos modelos físico-matemáticos (representados na forma de Grafos de Ligação e Potência) desenvolvidos no capítulo anterior. Cabe ressaltar a importância da modularidade da modelagem utilizada. Essa característica auxilia no desenvolvimento dos aparatos, pois possibilita o entendimento e a simulação somente das partes/características do veículo que serão envolvidas em um dado dispositivo.

Os dispositivos apresentados a seguir são temas de trabalhos de alunos de graduação (iniciação tecnológica, projetos de final de curso e estágios) e pós-graduação que fazem ou fizeram parte da equipe do LDSM. O quadro da Fig. 3.1 resume as atividades no ano letivo de 2016, com os respectivos responsáveis.

TRABALHOS EM DINÂMICA E CONTROLE DE BICI e/ou MOTOCICLETAS: RESPONSÁVEIS (células sombreadas) e USUÁRIOS (células em itálico)

	Revisão Bibliográfica Detalhada e Documentada	Modelos Dinâmicos	Identificação de Parâmetros e Aquisição de Dados	Simulação da Dinâmica e Calibração dos Modelos	Controle de Velocidade, Atitude e Trajetória	Testes Experimentais e Desenvolvimento de Aparatos	OUTROS
Mauro Speranza Neto	<i>Ensino, Dinâmica e Controle, etc</i>	Desenvolvimento	Definição do Procedimento	Definição do Procedimento	Definição da Abordagem	Concepção e Verificação	Organização das Atividades
Guilherme Nobrega Martins	Ensino de Engenharia	Aplicações Ensino PBL e CDIO	Aplicações Ensino PBL e CDIO	Aplicações Ensino PBL e CDIO	Aplicações Ensino PBL e CDIO	Aplicações Ensino PBL e CDIO	
Marfia Maurell Assad	Dinâmica e Controle	<i>Estabilidade e Trajetória</i>	<i>Motocicleta em Escala</i>	Motocicleta em Escala	Controle Autônomo	<i>Base Móvel p/ Moto em Escala</i>	Coorientação Atividades
Alan N. de Albuquerque	Mecanismos Fechados	<i>Mecanismos Fechados</i>	<i>Aquisição de Dados IMU</i>	Mecanismos Fechados	<i>Controle de Posição Via IMU</i>	Plataforma Plana c/ 3 GL's	Coorientação Atividades
Ana Carolina Coliman 15.2		<i>Din. Longitudinal Cin. Esterçamento</i>	Caracterização Bicicleta	<i>Din. Longitudinal Cin. Esterçamento</i>		<i>Instrumentação Embarcada</i>	
Bruno Ratton 16.1		Efeito Giroscópico	Motocicleta em Escala			Base Móvel p/ Moto em Escala	
Felipe Roballo 16.1		<i>Efeito Giroscópico</i>				Roda Motocicleta Efeito Giroscópico	
Letícia Nicolino 16.1			Caracterização Moto em Escala				
Gabriela Paiva 16.1		Atuador Elétrico Linear					
Renato Trabach 16.1			Atuador Elétrico Linear				
Alessandro Soares			Aquisição de Dados IMU			Eletrônica Aparatos	
Renan Vilela						Instrumentação Embarcada	
Thaíene Fcamidu 16.2		Motodroide (Notação DH)		Motodroide (Notação DH)	Controle por Aprendizado	Motodroide (c/ microserves)	
Letícia Barcellos 16.2/17.1						Momentos de Inércia	
		Dinâmica Completa		Verificação IMU	Controle Veloc. Angular	Testador IMU	

Figura 3.1 - Quadro de divisão do trabalho dos integrantes do LDSM - Fonte: Elaborada pelo autor

3.2. Revisão Bibliográfica

Para a elaboração dos aparatos do laboratório em questão, foi feita extensa pesquisa bibliográfica no intuito de mapear o que já está disponível e também de coletar ideias para o desenvolvimento de mecanismos que pudessem auxiliar no entendimento das propriedades de bicicletas e motocicletas. Seguem resumos dos principais artigos encontrados sobre o assunto.

3.2.1. “Mechatronics, Design, and Modeling of a Motorcycle Riding Simulator”

Neste artigo ARIQUI *et al.* (2010) argumentam que, quando comparadas a veículos de quatro rodas, as motocicletas têm recebido pouca atenção na área de segurança, com consequências trágicas para seus condutores. Tendo como justificativas tanto o treinamento do condutor, quanto estudo de seu comportamento, seus autores descrevem o desenvolvimento de uma plataforma simuladora de motocicletas com cinco graus de liberdade. Os graus de liberdade são guinada, arfagem, rolagem e dois sistemas de “feedback” tácteis no guidão – o primeiro possibilita a simulação do atraso inercial no tronco do condutor nas fases de aceleração e frenagem, enquanto o segundo reproduz o torque sentido no guidão resultante da interação pneu-via, assim como do efeito giroscópico da roda dianteira.

Este artigo apresenta diversos detalhes da montagem da plataforma, como o desenho mecânico, a eletrônica utilizada, a lógica de programação e uma breve análise dinâmica para justificar as escolhas feitas. Por fim testes para validação dos modelos são efetuados e os resultados são vistos como satisfatórios, mas é realçada a necessidade de avaliações psicofísicas para que a fidelidade e o realismo de movimento do simulador sejam validados.

3.2.2. “Development of a Motorcycle Simulator Using Parallel Manipulator and Head Mounted Display”

A partir de 1996, no Japão começou a vigorar a obrigatoriedade de aprendizagem de direção de veículos em simuladores antes de se passar para a prática em vias públicas. Neste trabalho CHIYODA *et al.* (2000) criticam o

realismo dos simuladores de motocicleta empregados nesse país até então e apresentam uma nova proposta utilizando uma plataforma movida por manipuladores em paralelo com seis graus de liberdade, um óculos de realidade virtual (HMD) e fones de ouvido. As vantagens que guiaram a escolha desta construção foram: uma boa relação carga-peso e grandes rigidez, precisão e largura de banda.

Os autores citam que o modelo de dinâmica utilizado foi aquele proposto por SHARP (1971), mas não entram em detalhes de desenvolvimento, construção, algoritmos e testes, concluindo somente que através do novo manipulador e dos ajustes feitos no algoritmo, seus resultados alcançaram o realismo proposto.

3.2.3.

“The Moris Motorcycle Simulator: An Overview”

Com o objetivo principal de auxiliar na fase de desenvolvimento de novas motocicletas, FERRAZZIN *et al.* (2001) apresentam neste artigo uma proposta de simulador com sete graus de liberdade (rotação do guidão, deslocamentos nas direções vertical, lateral e longitudinal e movimentos de rolagem, arfagem e guinada). Para tanto, utilizam-se de uma plataforma de Stewart (seis manipuladores prismáticos montados em paralelo) na qual instalam um modelo (tamanho real) de motocicleta.

O artigo apresenta fases de interesse no que tange seu desenho e sua concepção. Os autores apresentam em linhas gerais a arquitetura computacional (“hardware”) e a modelagem matemática (através da ferramenta Simulink/Matlab) utilizadas, e descrevem os diversos subsistemas que compõem a programação (“software”) de seu simulador, seus algoritmos e quais as manobras escolhidas para a verificação do seu desempenho. Eles fornecem também os desenhos dos atuadores e da plataforma, algumas de suas especificações e suas montagens ao modelo de motocicleta.

3.2.4.

“Dynatester: The Dynamic Brake Test Rig for Bicycles”

O artigo de MAO *et al.* (2003) apresenta uma bancada de testes de frenagem voltada para bicicletas, onde é possível observar a relação entre a força de frenagem e a força de contato entre pneu e solo, podendo, entre outras

coisas, testar sistemas de travagem antibloqueio, comumente conhecidos como freios ABS.

Esta bancada aceita uma única roda e é composta por quatro subsistemas: da roda e do freio, da transmissão, de aplicação da força na alavanca de freio e de aplicação de força normal. Através destes subsistemas é possível acoplar diversos modelos de rodas e freios, simular uma gama de velocidades iniciais (antes da frenagem), aplicar diferentes pesos nas rodas (simulando diferentes pesos totais do sistema bicicleta + condutor), e aplicar diferentes forças à alavanca de freio. Os autores descrevem os componentes deste mecanismo, assim como sua modelagem. Eles também apresentam os resultados de simulações.

3.2.5. “Using Bicycles to Teach System Dynamics”

Após cinco anos de implantação e aprimoramento, KLEIN (1989) descreve neste relato como foi a sua experiência ao utilizar a bicicleta em sala de aula para ensinar dinâmica. Já nesta época, antes mesmo da consolidação da metodologia PBL em cursos de engenharia, o autor discute a necessidade de atualização pedagógica do formato tradicional de ensino, descrevendo os benefícios de métodos práticos (chamados neste artigo de “hands-on”) ou de aprendizagem ativa.

O autor descreve de forma sucinta os projetos sem solução definida (“open-ended”) que são desenvolvidos no intuito de levar os alunos às conclusões esperadas, que envolvem tanto noções de dinâmica como de controle. Ele também cita, sem apresentar dados, que os resultados são bastante satisfatórios, com aumento na qualidade da formação dos alunos, e que esta metodologia foi bem recebida tanto pelos alunos como pela direção da instituição de ensino.

3.2.6. “The Bicycle: A Vehicle for Teaching Physics”

O interesse deste artigo de ZOLLMAN (2005) no capítulo que se insere não são somente os experimentos naquele descritos, mesmo porque são poucos, triviais e pouco detalhados. Apesar de bastante concisa, a descrição sobre a adaptabilidade do ensino da bicicleta para a cultura local é de grande relevância. Também de alto valor é o apontamento do grupo de colaboração

internacional, que destina grande esforço no desenvolvimento de projetos e aparatos que envolvem bicicletas e o ensino de conceitos de física.

3.3. Motocicleta em Escala Rádio-Controlada Instrumentada e Autônoma

Os conhecimentos adquiridos pela equipe do LDSM com veículos de quatro rodas (SERENO, 2012) estão sendo atualmente empregados em uma motocicleta em escala. Iniciou-se a análise do problema através de testes experimentais realizados em um protótipo LEGO (Fig. 3.2) com sensores inerciais e controlador PID, desenvolvido por alunos de Introdução à Engenharia e supervisionado pelo autor desta tese na época do seu estágio de docência, quando ainda cursava as disciplinas obrigatórias do doutoramento, e participou como auxiliar de ensino em turmas da Introdução à Engenharia - obrigatória para todos os calouros do CTC/PUC-Rio - na qual empregou o protótipo.

Recentemente passou-se a adotar um veículo em escala 1:5, também mostrado na Fig. 3.2, com propulsão elétrica (e motor sem escovas), que apresenta características similares ao do veículo real 1:1 e desempenho mais adequado às aplicações desejadas, e cuja base para compreensão do funcionamento é a mesma dos veículos de quatro rodas. Os modelos desenvolvidos no capítulo 2 desta tese serão utilizados para que seja possível simular esse novo veículo (ASSAD, 2017).



Figura 3.2 - Motocicleta autônoma: protótipo LEGO e versão atual em escala 1:5 - Fonte: ASSAD (2017)

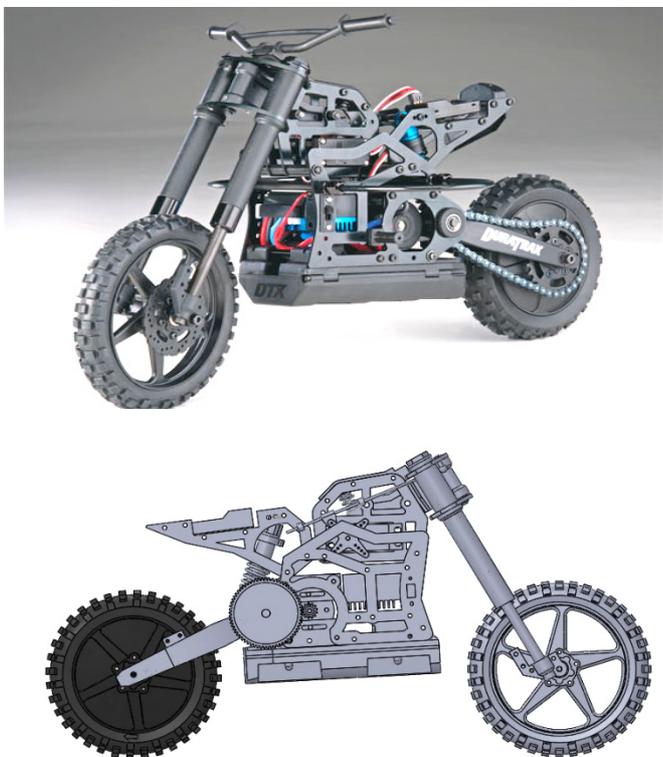
Deve-se destacar que a experiência adquirida e os resultados alcançados com os carros elétricos em escala (SERENO, 2012 e COSTA, 2014) foram de

fundamental importância para atingir o objetivo, ou seja, o de reproduzir o comportamento de uma motocicleta em computador, a fim de verificar a validade das metodologias empregadas para estabilização e controle da trajetória desse veículo sem bitola inerentemente instável.

Atualmente as simulações computacionais desse sistema começam a ser realizadas. A comprovação experimental do estudo realizado será executada em duas etapas (ASSAD, 2017): inicialmente a motocicleta será testada em uma base passiva (tratada adiante) e posteriormente em uma pista de testes, ambas especialmente construídas para esse fim.

No momento estão sendo avaliados e validados os transdutores e equipamentos embarcados que serão empregados para monitorar o desempenho do veículo e fornecer as informações necessárias ao seu controle e às comparações com a simulação. Este projeto está sendo desenvolvido em conjunto com alunos de graduação, que trabalham na determinação dos parâmetros e na caracterização do modelo do sistema.

Os testes para calibração dos modelos estão baseados na Duratrax RC DX 450, Fig. 3.3, que é uma motocicleta elétrica de controle remoto escala 1:5, na qual também será embarcado futuramente um sistema de controle.



**Figura 3.3 - Motocicleta DX 450 e modelo 3D do SOLIDWORKS -
Fonte: ASSAD (2017)**

Todos os componentes da motocicleta em escala já foram desenhados em SOLIDWORKS (Fig. 3.3) e os parâmetros geométricos e inerciais determinados a partir desses desenhos. O centro de massa pôde ter sua localização definida nos três eixos coordenados de forma experimental, através de um aparato especialmente construído com esse objetivo (NICOLINO, 2016), como mostrado na Fig. 3.4, tendo seus resultados comparados e sendo encontrada uma excelente aproximação (ASSAD, 2017). Um aparato para determinação dos momentos e produtos de inércia está em fase de concepção e detalhamento preliminar (BARCELLOS, 2017).

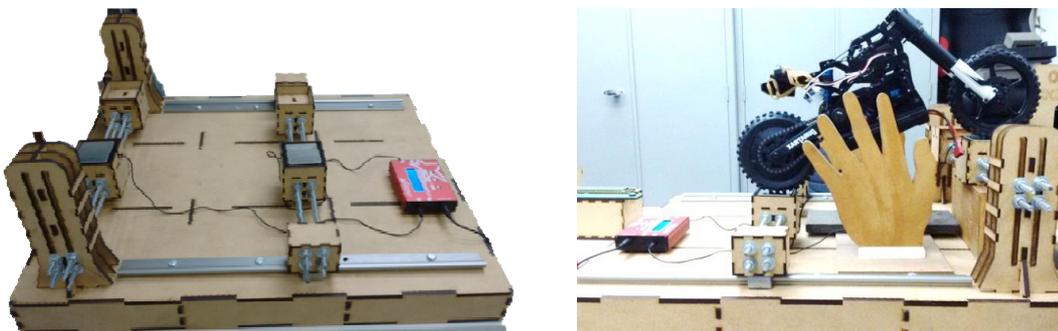


Figura 3.4 - Aparato para determinação do CM e medição no eixo z - Fontes: NICOLINO (2016) e BARCELLOS (2017)

A Tabela 3.1 apresenta os parâmetros determinados para a motocicleta em escala, que estão sendo empregados em todas as análises do sistema, incluindo o dimensionamento e simulação dos aparatos descritos a seguir. A Figura 3.5 resume os principais parâmetros geométricos e os sistemas de referência empregados nos modelos desenvolvidos, que serviram também para denominação e definição dos dados da Tab. 3.1.

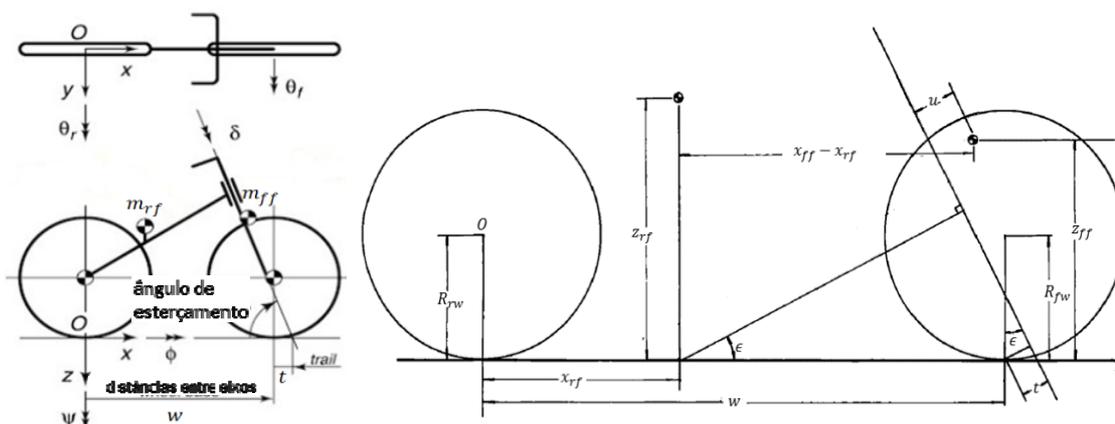


Figura 3.5 - Geometria da bicicleta/motocicleta, parâmetros e sistema de referência - Fonte: ASSAD (2017)

Parâmetro	Símbolo	Valor
Distância entre eixos	w	0,309 m
“Trail”	t	0,028 m
Inclinação do garfo	ε	1,04 rad
Roda traseira		
Raio	r_{rw}	0,061 m
Massa	m_{rw}	0,687 kg
Momento de inércia	$(J_{rw_{xx}}, J_{rw_{yy}}, J_{rw_{zz}})$	$(5,04, 9,16, 5,04) \times 10^{-4} \text{ kg.m}^2$
Quadro Principal - m		
Posição do centro de massa	(x_m, y_m, z_m)	$(0,141, 0,18 \times 10^{-3}, -0,103) \text{ m}$
Massa	m_m	1,192 kg
Momentos de inércia	$\begin{bmatrix} J_{m_{xx}} & 0 & J_{m_{xz}} \\ 0 & J_{m_{yy}} & 0 \\ J_{m_{xz}} & 0 & J_{m_{zz}} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 20,02 & 0,89 & -4,01 \\ 0,89 & 41,92 & -0,82 \\ -4,01 & -0,82 & 29,61 \end{bmatrix} \times 10^{-4} \text{ kg.m}^2$
Quadro de Direção – s (guidão e garfo)		
Posição do centro de massa	(x_s, y_s, z_s)	$(0,269, -1,21 \times 10^{-3}, -0,133) \text{ m}$
Massa	m_s	0,131 kg
Momentos de inércia	$\begin{bmatrix} J_{s_{xx}} & 0 & J_{s_{xz}} \\ 0 & J_{s_{yy}} & 0 \\ J_{s_{xz}} & 0 & J_{s_{zz}} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 4,17 & 2,75 \times 10^{-2} & 1,94 \\ 2,75 \times 10^{-2} & 4,58 & 3,86 \times 10^{-2} \\ 1,94 & 3,86 \times 10^{-2} & 1,89 \end{bmatrix} \times 10^{-4} \text{ kg.m}^2$
Roda Dianteira		
Raio	r_{fw}	0,065 m
Massa	m_{fw}	0,118 kg
Momentos de inércia	$(J_{fw_{xx}}, J_{fw_{yy}}, J_{fw_{zz}})$	$(1,63, 3,19, 1,63) \times 10^{-4} \text{ kg.m}^2$
Motocicleta Completa		
Massa	m	2,14 kg
Posição do centro de massa	(x, y, z)	$(0,112, 0,00044, -0,0889) \text{ m}$
Momento de inércia em relação ao centro de massa	$\begin{bmatrix} J_{xx} & J_{xy} & J_{xz} \\ J_{xy} & J_{yy} & J_{yz} \\ J_{xz} & J_{yz} & J_{zz} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 41,91 & -1,00 & -31,53 \\ -1,00 & 240,53 & -0,35 \\ -31,53 & -0,35 & 208,85 \end{bmatrix} \times 10^{-4} \text{ kg.m}^2$

Tabela 3.1 - Parâmetros da motocicleta em escala - Fonte: ASSAD (2017)

3.4.

Aparato para Visualização do Efeito Giroscópico em Motocicletas e Bicicletas

O Aparato para Visualização do Efeito Giroscópico (AVEG) foi inicialmente idealizado como uma primeira alternativa da base passiva tratada no item a seguir, visando à avaliação do seu conceito, mais simples e rápida de ser produzida, e que possibilitaria verificar se alguns dos seus propósitos poderiam ser, de fato, atingidos. Acabou por se tornar um novo objeto educacional com múltiplos propósitos: estudo teórico (modelagem e simulação) e comprovação experimental do fenômeno (nada intuitivo) conhecido como “Efeito Giroscópico” - gerado pela combinação de velocidade angular e momento de inércia de corpos girantes; sua compreensão e avaliação da influência no equilíbrio de bicicletas (baixas velocidades angulares e inércias das rodas) e de motocicletas (altas velocidades angulares e inércias das rodas).

Através deste dispositivo também é possível a visualização das vibrações provocadas pelos desbalanceamentos estático e dinâmico, tema relacionado a este trabalho, assim como à tese de doutorado de ASSAD (2017), dois projetos de fim de curso e duas iniciações tecnológicas.

Sua utilização abrange, portanto, tópicos como Dinâmica dos Corpos Rígidos, Modelagem de Sistemas Dinâmicos, Vibrações Mecânicas, entre outras, auxiliando na compreensão da física dos fenômenos e dos seus modelos matemáticos. Pode ser usado também para “treinar a intuição” (sem equações e formalismos físicos ou matemáticos) dos alunos do Ensino Médio, dos calouros de Engenharia, de leigos e não especialistas no referido efeito, facilitando o entendimento de uma das razões através das quais um veículo de duas rodas (com bitola nula) não cai quando em movimento ou mesmo por que volantes ou guidões vibram devido aos desbalanceamentos.

Foi desenvolvido, após uma fundamentação teórica elementar, um protótipo do dispositivo em LEGO (Fig. 3.6), ainda em uma versão preliminar, para fins de teste do conceito e correto posicionamento dos eixos de rotação da base móvel em relação aos eixos de rolagem e guinada da motocicleta/bicicleta. A princípio, apenas a sua parte dianteira foi considerada como suficiente para geração dos efeitos desejados. Acredita-se que tal hipótese seja validada na versão operacional. O sistema começou a ser modelado matematicamente após a conclusão do protótipo LEGO, juntamente com a concepção de uma versão completamente funcional, porém ainda virtual, como tratada a seguir. A

construção do aparato será iniciada apenas após a avaliação dos conceitos, através da comparação das simulações dos diferentes modelos desenvolvidos.

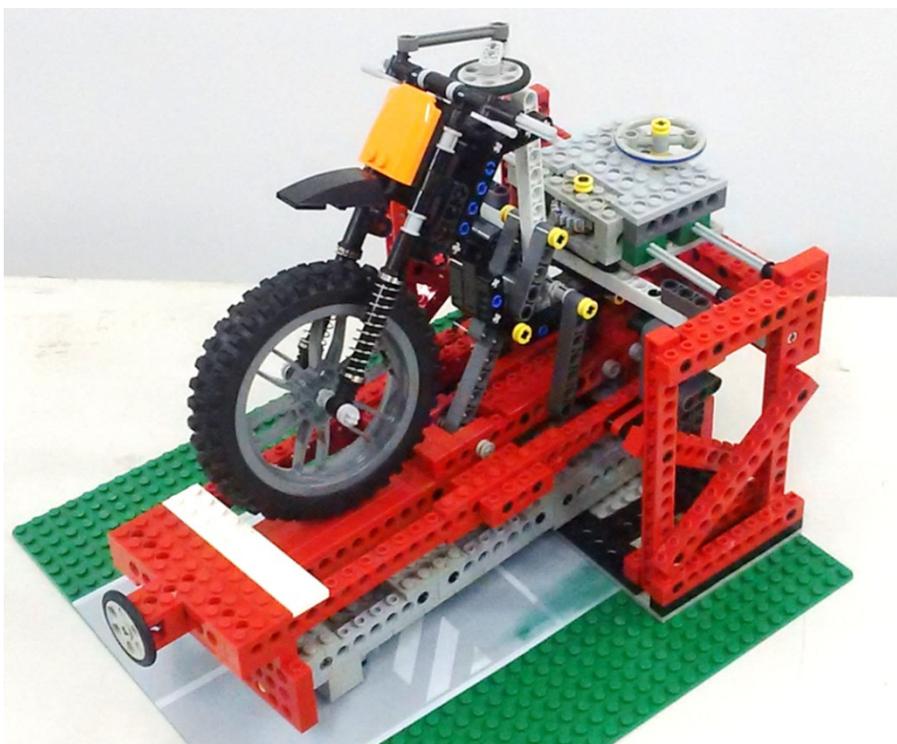


Figura 3.6 - Protótipo LEGO do AVEG - Fonte: FERREIRA (2016)

Esse equipamento é prioridade da equipe do LDSM, uma vez que alguns dos objetivos citados devem ser atingidos dentro de um prazo limitado. Ainda há dúvidas e incertezas quanto a determinados componentes, suas instalações e se de fato o aparato irá propiciar a reprodução e a visualização desejadas dos fenômenos associados. Estes são os principais desafios que motivam seu desenvolvimento.

A primeira versão operacional do AVEG, ilustrada na Fig. 3.7, foi concebida empregando o SOLIDWORKS (FERREIRA, 2016) e é composta por duas bases giratórias, que possibilitam os movimentos de rolagem e guinada, e uma base fixa para apoio de todo o sistema, além do conjunto dianteiro da motocicleta em escala DX 450 (Fig. 3.3) modificado: parte do chassi, garfo, guidão e roda-pneu foram mantidos praticamente inalterados, incluindo o servomotor para esterçamento, porém foi introduzido um motor (“inwheel”) elétrico na roda dianteira (adaptada, mas com todas as dimensões originais), de modo a possibilitar seu movimento de rotação em torno do eixo (spin), o que não seria conseguido de outra forma, pois o sistema não inclui o motor, sistema de transmissão e roda-pneu traseiro, que gera a tração no veículo real.

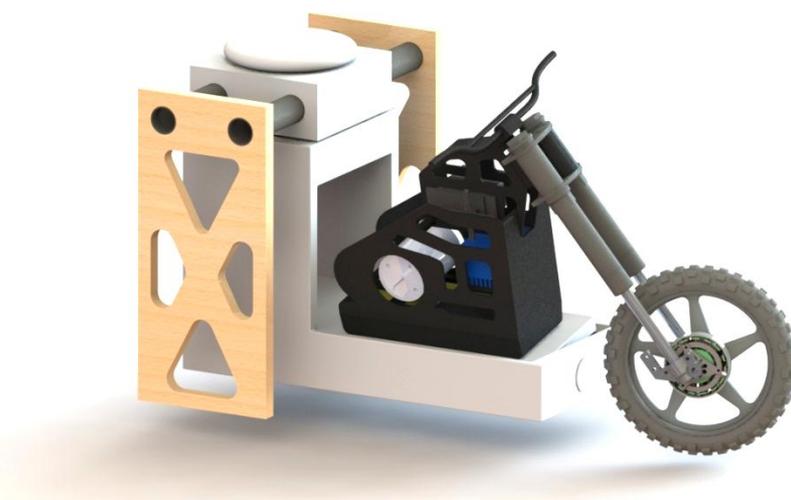


Figura 3.7 - Concepção 3D do 1º protótipo do AVEG no SOLIDWORKS
- Fonte: FERREIRA (2016)

A intenção é reproduzir no dispositivo os movimentos de rolagem, e consequentemente de guinada, a partir do comando de esterçamento no guidão. Também está prevista, mas não implementada na primeira versão, a inclusão de servomotores nos mancais de apoio dessas rotações (longitudinal e vertical), de modo a induzi-las e verificar seus efeitos na dinâmica e equilíbrio da motocicleta. Os desbalanceamentos, que produzirão vibrações no sistema como citado anteriormente, poderão ser excitados por massas adicionais (de pequeno valor), convenientemente instaladas na roda, mas isso ainda não foi introduzido nesse protótipo.

O corpo da motocicleta (parte do chassi, garfo, roda e motor) é rigidamente conectado à base de rolagem, porém a roda é livre para girar e ser esterçada; a rolagem em torno do eixo horizontal alinhado com o ponto de contato do pneu dianteiro com o solo, com um ângulo máximo previsto inicialmente em $\pm 30^\circ$ (estimativa da inclinação do veículo real), ocorre em relação à base de guinada, que por sua vez tem seu eixo vertical de rotação alinhado com o centro de massa (aproximado) do veículo completo, e todo o conjunto motocicleta-base de rolagem e de guinada gira solidário em relação ao “cabeçote superior”. O ângulo de guinada máximo previsto no protótipo é de também de $\pm 30^\circ$. Ambos os limites angulares deverão ser aumentados nas futuras versões, nas quais serão também incluídos os sensores e os servomotores de indução do movimento, como mencionado.

A Figura 3.8 ilustra detalhes do primeiro protótipo virtual do AVEG e os movimentos previstos. Com base nessa versão inicial, o passo seguinte será o de realizar simulações empregando um modelo matemático desenvolvido a partir das representações tratadas no capítulo 2 e através do “Motion Study” (NIZAR, 2013), uma ferramenta interna do programa de desenhos 3DSOLIDWORKS.

A Figura 3.9 apresenta a segunda versão do protótipo AVEG. A primeira versão foi baseada no modelo em LEGO apresentado na Fig. 3.6 e, por limitações de montagem, teve uma configuração de mais complexa modelagem e de mais difícil interpretação quanto à adequação ao real. Assim, ao se desenhar em SOLIDWORKS, desenvolveu-se modelo para futura construção que simulasse de forma mais simples a variação no momento de inércia de rolagem e de arfagem, assim como na massa e no posicionamento do centro de massa, resultando no protótipo da Fig. 3.9. A variação do posicionamento do centro de massa na Fig. 3.9 é atualmente exercida somente no eixo horizontal (em relação ao chassi), mas pretende-se incluir também a possibilidade da variação no eixo vertical.

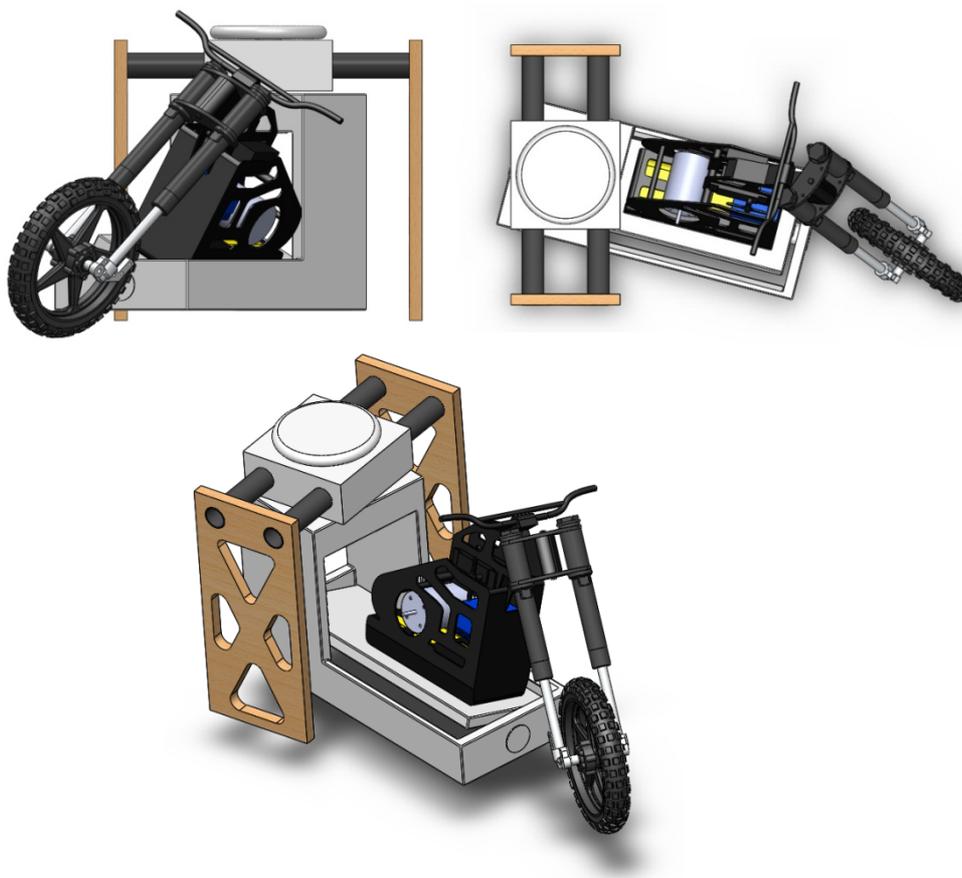


Figura 3.8 - 1º Protótipo AVEG para esterçamento, rolagem e guinada combinados - Fonte: FERREIRA (2016)

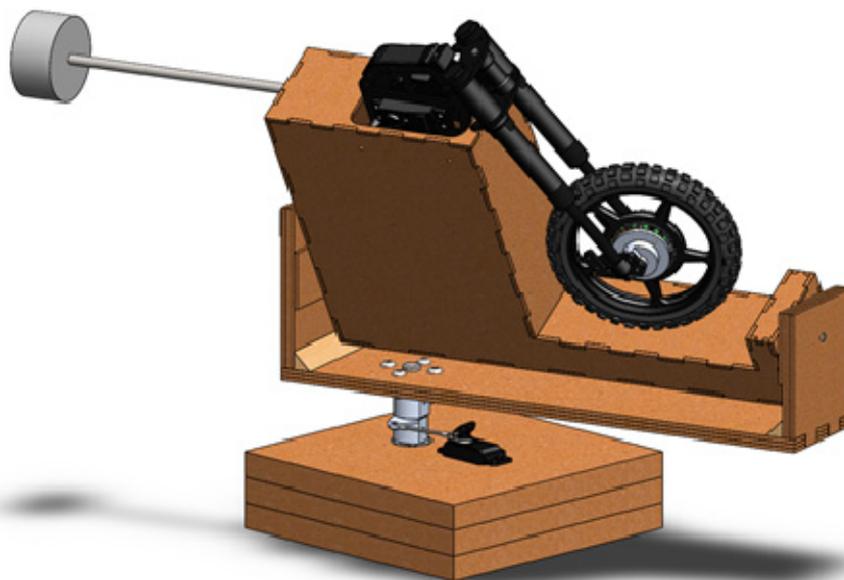


Figura 3.9 - Concepção 3D do 2º protótipo do AVEG no SOLIDWORKS
 - Fonte: FERREIRA (2016)

3.5. Base Passiva para Visualização e Análise do Comportamento Dinâmico de Motocicletas

Por sua complexidade e atratividade, o estudo da dinâmica de motocicleta através do uso de veículos em escala tem sido tema nos últimos anos de projetos finais de graduação, dissertações de mestrado e teses de doutorado na PUC-Rio, o que culminou no desenvolvimento da bancada de testes aqui apresentada.

Este aparato é o mais desafiador do LDSM até o momento. Ele visa possibilitar o teste completo de uma motocicleta em escala e a visualização de seu comportamento dinâmico de forma passiva, ou seja, as partes do aparato serão movidas como consequência do movimento da própria motocicleta. O aparato possibilita a variação dos três movimentos angulares de uma motocicleta, ou seja, rolagem (“roll”), guinada (“yaw”) e arfagem (“pitch”). Ele também possibilita o deslocamento lateral e simula o deslocamento longitudinal, sendo negligenciado somente o deslocamento vertical, pois por premissa, os pneus permanecem sempre em contato com o solo.

Apesar da reação passiva à dinâmica da motocicleta, motores elétricos deverão atuar nos rolos e esteiras onde este veículo estará apoiado, de forma a transmitir cargas a ele. Isso porque, para que o aparato seja fidedigno à

realidade, ele deverá ser capaz de simular cargas correspondentes às ações das forças aerodinâmicas e de aclives e declives. Além disso, também pretende-se simular nele inércias, dissipações, resistências e flexibilidades equivalentes àquelas enfrentadas por uma motocicleta nas mesmas condições de operação. Assim, essas cargas serão transmitidas para o veículo através da atuação desses motores acoplados aos rolos.

Sua primeira versão foi desenvolvida e construída no projeto final de graduação de MOSER (2015). Essa versão foi utilizada para a realização de alguns testes, onde foi verificado que seu peso e suas dimensões poderiam ser reduzidos, além da necessidade de correções no projeto, no intuito de adequar o comportamento dinâmico ao esperado.

Partindo dessa primeira versão, desenvolveu-se o primeiro protótipo virtual (RATTON, 2016) em SOLIDWORKS, conforme Fig. 3.10. Após sucessivas melhoras nesse protótipo, chegou-se à versão atual do aparato completo, que pode ser vista na Fig. 3.11. As dimensões da montagem e de seus componentes, seus respectivos posicionamentos e detalhes, encontram-se no apêndice A do trabalho de RATTON (2016).

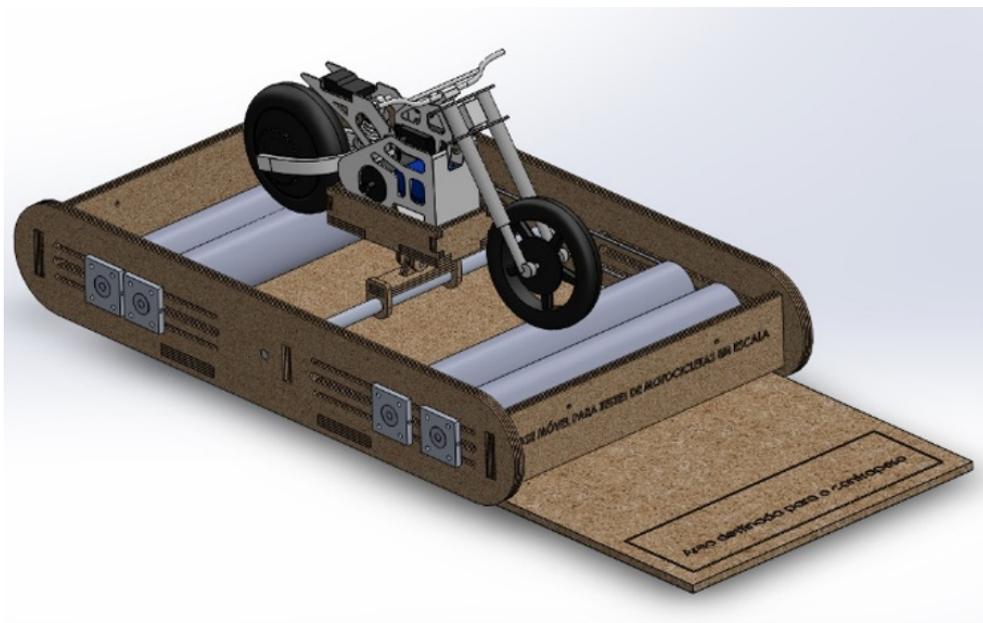


Figura 3.10 – Primeiro protótipo virtual da base de testes para motocicletas - Fonte: RATTON (2016)

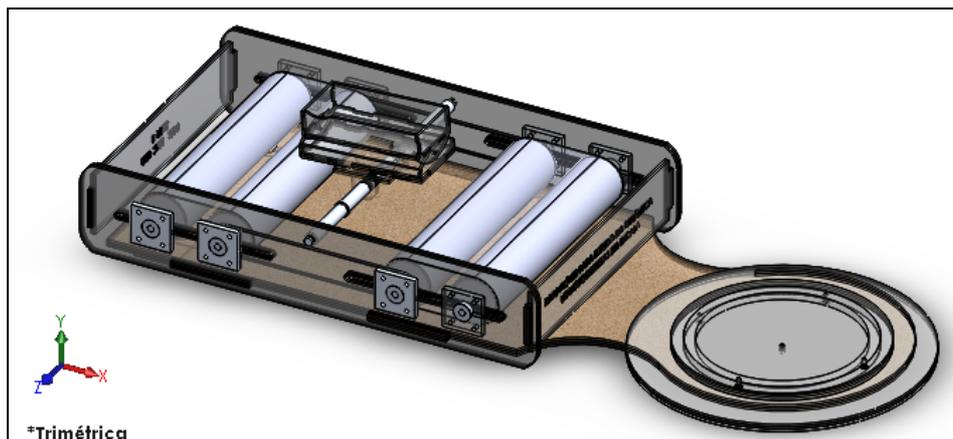


Figura 3.11 - Aparato completo em SOLIDWORKS - Fonte: RATTON (2016)

A Figura 3.12 apresenta um exemplo de montagem da motocicleta em escala na base completa com contrapeso (anilhas), cuja variação possibilita alterar o momento de inércia de guinada.

Tendo como base esse modelo em SOLIDWORKS, os parâmetros do veículo para calibração do seu modelo estão sendo identificados (NICOLINO, 2016). Esses parâmetros serão utilizados na simulação da interação do aparato com a motocicleta e na análise e síntese do controle de estabilidade e trajetória dos veículos com duas rodas de bitola nula (ASSAD, 2017). Essa simulação será feita através do complemento "Motion Study" do SOLIDWORKS.

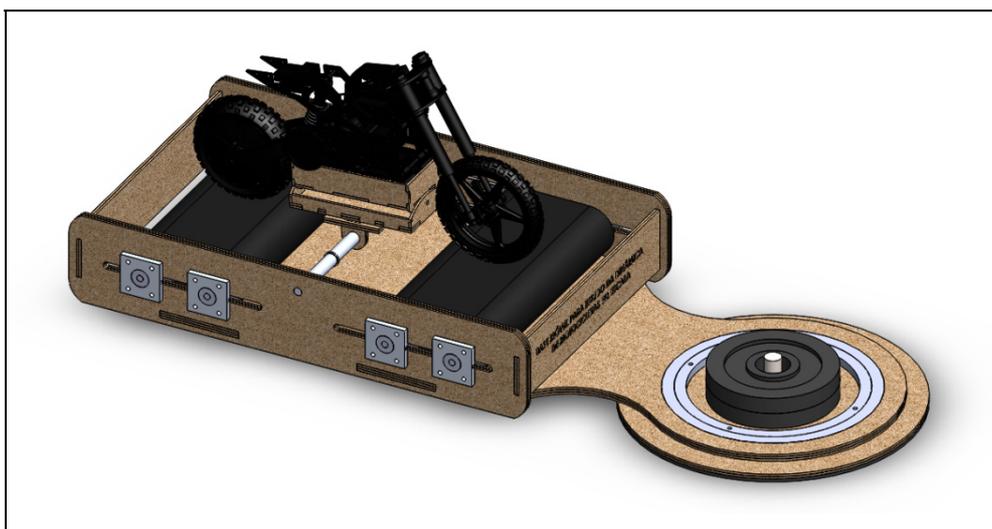


Figura 3.12 – Exemplo do modelo com carga para contrapeso - Fonte: RATTON (2016)

Espera-se concluir esse modelo virtual ainda no segundo semestre de 2016. Assim que ajustes necessários forem feitos e testes forem validados,

pretende-se partir para a construção do aparato real em escala, onde será então possível a visualização da dinâmica da motocicleta e a utilização de tal ferramenta como um valioso objeto de aprendizagem.

Um equipamento equivalente possivelmente será desenvolvido para veículos de quatro rodas, com as devidas adaptações, considerando suas características favoráveis (equilíbrio estático e sistema de direção – esterçamento comandado pelas rodas dianteiras, sem efeito giroscópico significativo, maior inércia de guinada) e fatores complicadores (rolagem e arfagem da massa suspensa em relação às massas não suspensas, dependente dos mecanismos e elementos das suspensões).

3.6. Modelo de Giroscópio Virtual em SOLIDWORKS

Muitos dos aparatos desenvolvidos no LDSM estão sendo desenhados em SOLIDWORKS e como este programa de desenho fornece um complemento para simulação dinâmica (“Motion Study”) seu uso se torna prático e diminui o desperdício de tempo e material na transposição para o aparato real.

Nesse sentido, o intuito com este modelo é de testar e de validar esse complemento do SOLIDWORKS, comparando seus resultados com aqueles encontrados na literatura. Para tanto, desenvolveu-se como tema de projeto de final de curso de RATTON (2016) a construção de um giroscópio de “Gimbals” virtual em SOLIDWORKS e simulação através do complemento citado. Optou-se pelo emprego desse dispositivo porque seu efeito está presente no tipo de veículo analisado pelo grupo de trabalho no qual está inserido e também por sua dinâmica, que não é trivial (o que a torna um desafio para o programa testado), tendo no entanto sua descrição detalhada em diversas literaturas de dinâmica.

Para efetuar a primeira fase de testes, desenhou-se o modelo de giroscópio de “Gimbals”, conforme apresentado na Fig. 3.13. Os seus componentes foram definidos como sendo de aço carbono simples, para que pudessem ser calculadas as respectivas massas, momentos de inércia e centros de gravidade. Como premissa desconsiderou-se a ação da resistência do ar e o atrito entre componentes.

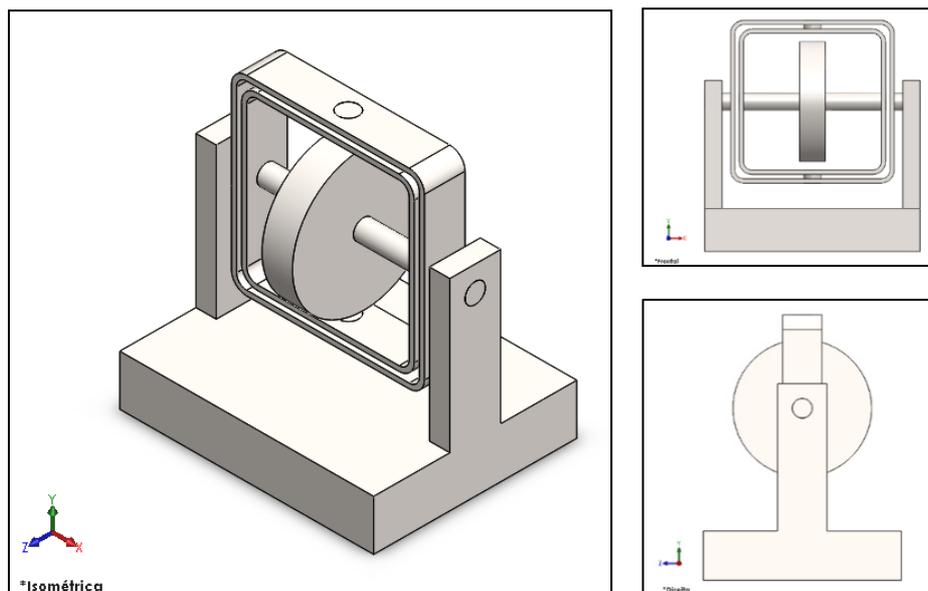


Figura 3.13 – primeiro modelo (estrutura de “Gimbals”) - Fonte: RATTON (2016)

Para a primeira simulação desse estudo, escolheu-se estudar o comportamento da face destacada na Fig. 3.14. Além de considerar a ação da força da gravidade e aplicar uma rotação ao rotor (indicada pela seta de cor vermelha na Fig. 3.15), uma força foi aplicada no período entre $t=2s$ e $t=5s$ (indicada pela seta de cor azul na Fig. 3.15). Em $t=11s$ uma força semelhante foi novamente aplicada durante três segundos. Essa simulação gerou dados, que foram extraídos do SOLIDWORKS e importados para o programa Matlab, onde foram tratados, dando origem ao gráfico das velocidades angulares que pode ser encontrado na Fig. 3.16.

Através da análise qualitativa do comportamento das velocidades angulares obtidas na simulação e apresentadas na Fig. 3.16, pode-se perceber a perturbação gerada pela aplicação das forças, onde aparecem picos, seguidos de uma estabilização no movimento após a retirada da força. Esse comportamento está dentro do esperado de acordo com a teoria do movimento de precessão, onde ao se aplicar uma força, gera-se um toque perpendicular ao momento angular do disco, inicia-se uma rotação na tentativa de restabelecer o equilíbrio do sistema, e ao se retirar essa força, o giroscópio tende a retornar a uma posição de equilíbrio.

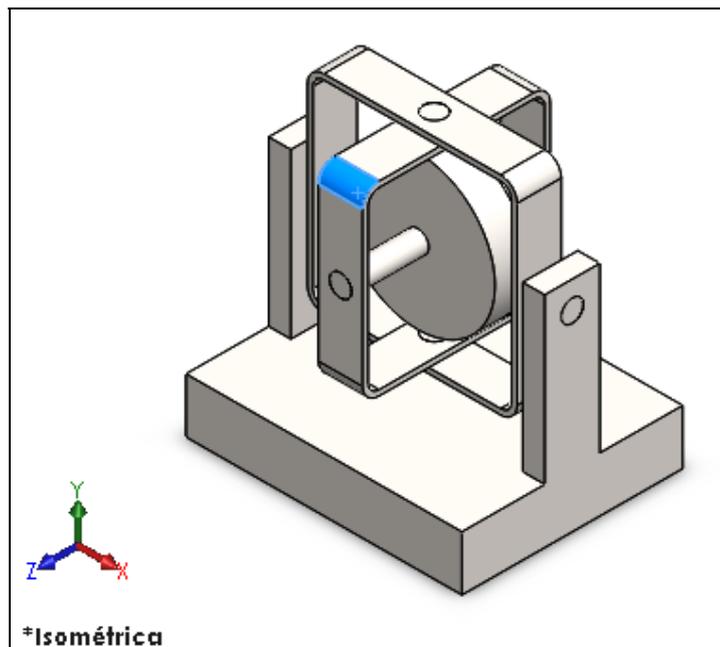


Figura 3.14 - Face selecionada para estudo de movimento - Fonte: RATTON (2016)

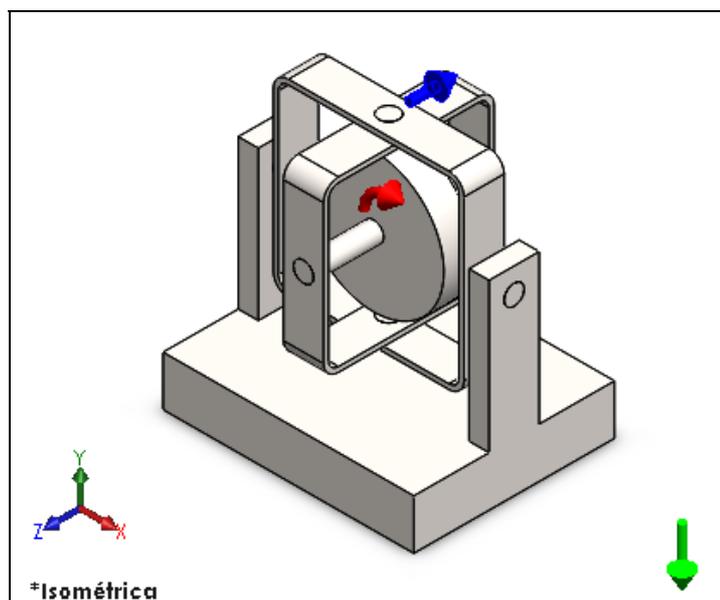


Figura 3.15 - Forças atuantes de $t=2s$ a $t=5s$ - Fonte: RATTON (2016)

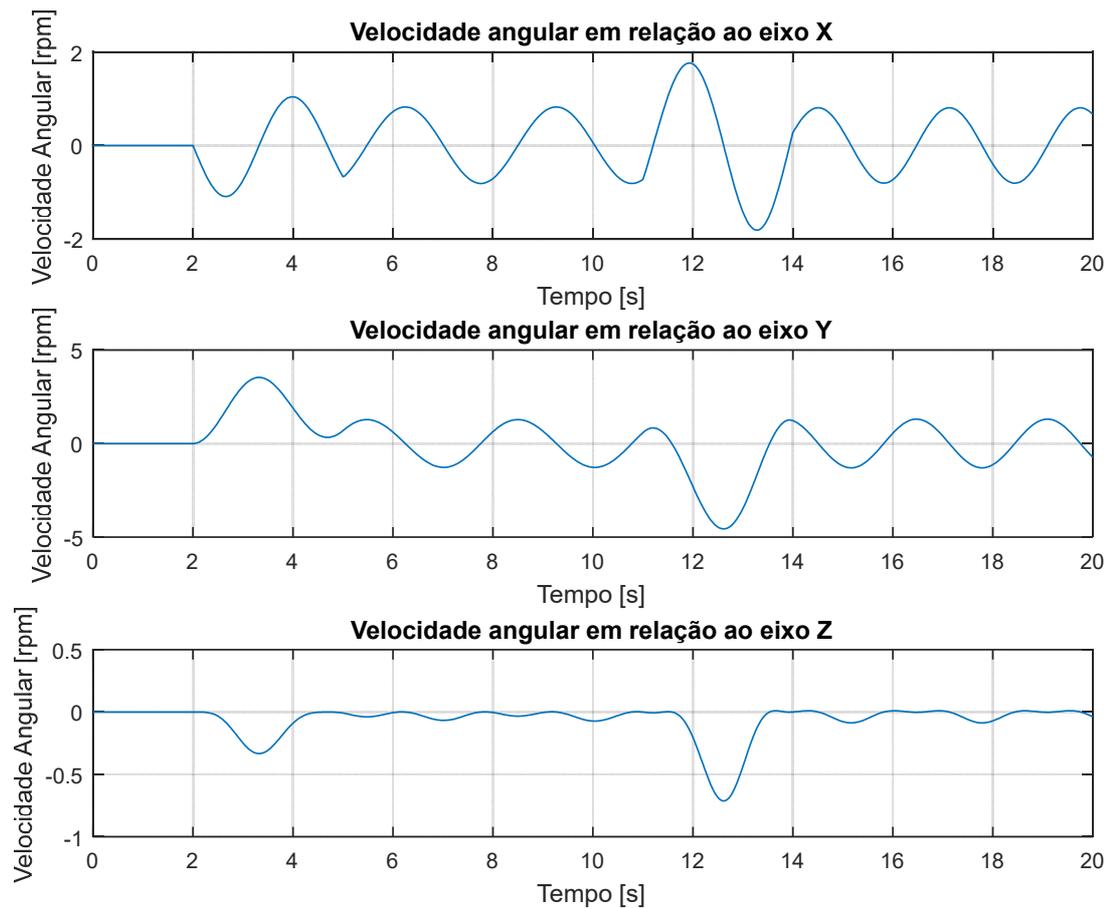


Figura 3.16 – Gráfico das velocidades angulares da simulação - Fonte: RATTON (2016)

Outros testes foram efetuados e apesar da ausência de análise quantitativa da aderência dos dados obtidos à realidade e de sua reconhecida importância, considerou-se após observação qualitativa que os resultados apresentados são satisfatórios. Esse sentimento deu confiança ao grupo de trabalho no complemento “Motion Study”, o que foi um importante passo para o prosseguimento de outros projetos e aparatos, inclusive no desenho de outros aparatos que simulem o efeito giroscópico, agora em uma configuração que melhor se assemelhe àquelas encontradas em uma bicicleta ou motocicleta.

Com esse objetivo, já estão em fase de desenvolvimento pelo grupo de trabalho de dinâmica de veículos da PUC-Rio dois aparatos virtuais (Fig. 3.17 e Fig. 3.18). O primeiro apresenta o desenho de um aparato para simulação do efeito giroscópico da roda dianteira de um veículo de bitola nula. O outro apresenta a primeira tentativa de desenhar um aparato que simule o efeito giroscópico de um veículo inteiro de duas rodas com bitola nula. Para que ele se

aproxime mais ao real, uma restrição deverá ser incluída, relacionando o “spin” dos dois discos.

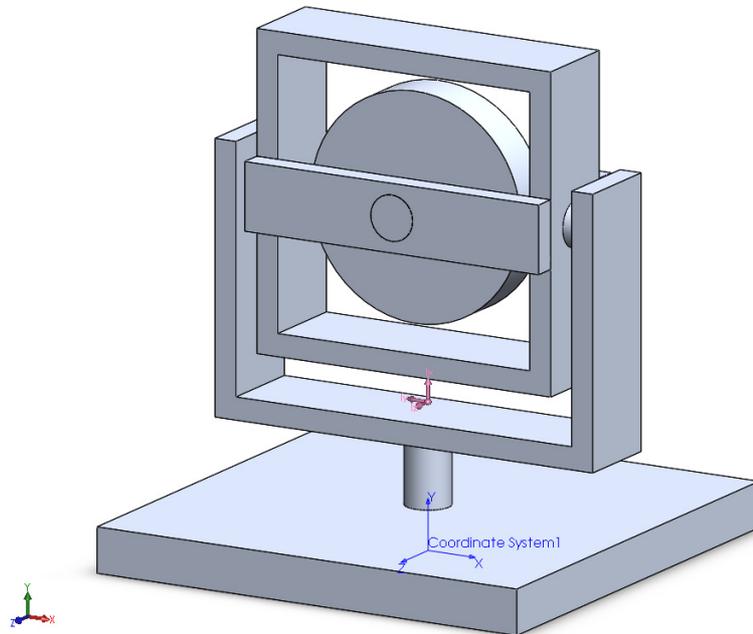


Figura 3.17 – Estrutura para estudo do efeito giroscópico da roda dianteira - Fonte: RATTON (2016)

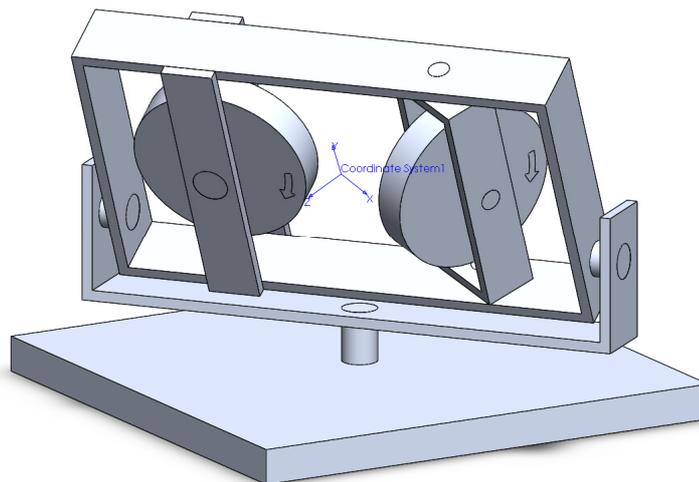


Figura 3.18 – Estrutura para estudo do efeito giroscópico de veículos de duas rodas com bitola nula - Fonte: RATTON (2016)

Para o desenvolvimentos dos aparatos desse laboratório foram envolvidos alunos de graduação, mestrado e doutorado e em todos os casos eles puderam ter contato com diversas áreas de conhecimento, criando um sentimento de autoria e propriedade que os motivou e que auxilia na consolidação de muitos dos conceitos vistos em aula. Além dos benefícios para os responsáveis por seus desenvolvimentos, esses aparatos são recursos educacionais valiosos e quando terminados poderão auxiliar no entendimento de conceitos de alta complexidade através de visualização em objetos que já fazem parte do cotidiano da maior parte dos alunos. Por último, eles poderão servir de bancada de testes para novos modelos de motocicleta, bicicleta ou suas partes.

3.7. Próximos Passos

Dos projetos em andamento neste laboratório, talvez o de maior impacto seja a integração com o Sistema Maxwell de Ensino a Distância, de modo que “experimentos virtuais” possam empregar seus aparatos, e conseqüentemente o LDSM passe à categoria de Laboratório Remoto, sendo possível sua utilização por diferentes instituições de ensino.

Tem-se também como projeto o desenvolvimento de um robô antropomórfico voltado para dirigir uma motocicleta em escala. Tal equipamento, apesar de não ser inédito, representa um desafio para a equipe do LDSM em uma área do conhecimento da Engenharia de Controle e Automação, a Robótica.

Outro aparato que está sendo desenvolvido servirá para calibração e validação das medições de uma Unidade de Medição Inercial (UMI). Ele já foi projetado (CHATAIGNIER, 2014) e deverá ser construído em breve, pois ainda no segundo semestre de 2016 serão realizados testes de controle em um Mecanismo Paralelo Plano, também já projetado e em fase de construção (ALBUQUERQUE, 2016), que emprega uma UMI como transdutor, visando à manutenção do equilíbrio de uma motocicleta passiva (um pêndulo “espacial”).

Um triciclo omnidirecional foi recentemente projetado (NEUMANN, 2015 e OSBORNE, 2015), e parcialmente modelado e analisado (JOFFE, 2015). Ele tem três motores independentes (responsáveis por tração e frenagem nas rodas) e três servomotores para esterçamento. Esse veículo será empregado na aplicação de procedimentos de modelagem, na verificação de leis de controle e na determinação de trajetórias ótimas. Diferentemente dos robôs móveis

conhecidos, este tem como desafio o deslocamento em ambientes limitados empregando velocidades relativamente elevadas. Ainda não se tem previsão para construção do protótipo desse veículo não convencional.

4 Aprendizagem Ativa e Formação Integral

*"Conte-me, e eu vou esquecer.
Mostre-me, e eu vou lembrar.
Envolva-me, e eu vou entender."
Confúcio*

Dentro do contexto descrito no primeiro capítulo, tentando responder às diversas tensões criadas pelas novas expectativas quanto ao engenheiro recém-formado e pelas possibilidades criadas pelas novas tecnologias, surge no final do milênio passado/início deste, algumas adaptações para a engenharia de um método de ensino já utilizado na medicina conhecido como PBL ("Problem-Based Learning" ou Aprendizagem Baseada em Problemas). Assim como outros métodos de aprendizagem ativa, este é um resultado direto do desenvolvimento da neurociência e de seus estudos sobre como o ser humano aprende. Através de inúmeras pesquisas sobre o funcionamento do cérebro, ou seja, sobre como se dá a aquisição de conhecimento, sua memorização, associação e também a geração de ideias e o desenvolvimento de raciocínio, pôde-se repensar os métodos de ensino, utilizando-os de acordo com o resultado desejado e sua aplicabilidade.

Essa busca pela performance ótima do cérebro está ligada ao momento atual de consolidação de um novo paradigma sociotécnico e econômico, que Manuel Castells denomina "sociedade da informação" (2000). De acordo com este autor (apud WERTHEIN - 2000), essa nova configuração é caracterizada pela informação que passa a ser considerada como matéria prima a ser trabalhada, pela grande penetração e influência das novas tecnologias, pela sociedade em rede e pela flexibilidade e convergência tecnológica. Essa penetração pode ter implicações no âmbito da aprendizagem, que são destacadas por WERTHEIN (2000, pág.73):

"Porque permite implementar materialmente a lógica de redes, a tecnologia permite modelar resultados imprevisíveis da criatividade que emana da interação complexa, desafio quase intransponível no padrão tecnológico anterior. Se isso dá vazão aos sonhos mais delirantes no âmbito das ciências

básicas, das aplicações tecnológicas avançadas e da estratégia, não deixa também de alimentar sonhos mais prosaicos – e não menos significantes – como o de finalmente permitir a integração ensino/aprendizagem de forma colaborativa, continuada, individualizada e amplamente difundida.”

Diante desse contexto, torna-se necessário melhorar cada vez mais a forma com que se adquire, conserva e cria conhecimento, já que esta é uma demanda cada vez maior e decisiva para o desenvolvimento profissional. Além disso, percebe-se no mundo uma tendência para a migração do que hoje considera-se o ensino tradicional, para um mais adequado a esta época.

Na Europa, de acordo com CARVALHO e LIMA (2006, pág. 1476), após a Declaração de Bolonha em 1999 houve “uma mudança de paradigma educacional e, portanto, uma nova tipologia de educação acadêmica, privilegiando a aquisição e desenvolvimento de competências pelo envolvimento ativo dos alunos no processo de aprendizagem”, o que provocou em todos os países da União Europeia (e aqueles que querem ser bem-vistos nela, como alguns países do leste europeu) uma onda de reformulação curricular, levando boa parte das instituições de ensino (em diferentes graus de intensidade) a mudanças.

Nos EUA, conforme afirma BANKEL *et al.* (2003), as diretrizes EC2000 da ABET (Accreditation Board for Engineering and Technology), organismo dedicado à acreditação de cursos de nível superior em engenharia (entre outros), encorajaram a mudança no enfoque, que passaria do conhecimento para o processo de aprendizagem. A consequência desta mudança de enfoque pode parecer pequena, mas ela é causa e efeito de mudanças estruturais no ensino de engenharia nos EUA, tendo como exemplos o P5BL (Problem-, Project-, Product-, Process-, People-Based Learning) da Universidade de Stanford e o desenvolvimento do CDIO (Conceive-Design-Implement-Operate) pelo Massachusetts Institute of Technology, que pressupõem a utilização de ensino centrado no aluno e de aprendizagem ativa. Como argumenta BELHOT (1997), os objetivos de ensino são as mudanças que se esperam ter nos alunos devidas ao processo educacional; e não devem ser confundidos com o que o professor pretende ensinar.

No Brasil, a resolução CNE/CES 11 de 2002 do Conselho Nacional de Educação sobre a graduação em engenharia coloca em xeque o ensino

tradicional, pois exige das instituições de ensino um projeto pedagógico que demonstre claramente como o conjunto de atividades garantirá o desenvolvimento de competências e habilidades que vão bem além do conhecimento técnico de engenharia, como citado em sua primeira página:

“IV - planejar, supervisionar, elaborar e coordenar projetos e serviços de engenharia;

...

VIII - comunicar-se eficientemente nas formas escrita, oral e gráfica;

IX - atuar em equipes multidisciplinares;

X - compreender e aplicar a ética e responsabilidade profissionais;

XI- avaliar o impacto das atividades da engenharia no contexto social e ambiental;

XII - avaliar a viabilidade econômica de projetos de engenharia;

XIII - assumir a postura de permanente busca de atualização profissional.”

Não é pretensão deste trabalho exaurir a lista de todos os países que estão em processo de atualização dos métodos de ensino. No entanto, o ensino de engenharia no Brasil, durante sua construção, sofreu muita influência dos modelos de ensino europeu (principalmente francês e alemão) e norte-americano. Logo, é genuíno se pensar, depois de tantas décadas de sua vigência e aplicação, se eles não necessitam ser revistos, mesmo porque até mesmo os seus “mentores” os têm encarado como obsoletos.

4.1. Métodos de Aprendizagem Ativa

Foi John Dewey, filósofo e pedagogo americano que, no início do século XX, como nos diz MASSON *et al.* (2012 – pág.2), “comprovou o aprender mediante o fazer”. Através de Maria Montessori,(MONTESSORI e HOLMES – 2008) autora contemporânea de Dewey, entende-se que educação acontece não por ouvir palavras, mas por experimentar no ambiente. Com o Construtivismo - linha pedagógica baseada nos estudos do psicólogo Jean Piaget sobre o funcionamento da inteligência humana – percebe-se que os estudantes

constroem o que sabem através de questionamentos, investigações, interagindo com o outro e refletindo sobre essas experiências.

Ainda na década de 60, BRUNER (1960) propôs uma nova forma de se olhar o currículo como veículo para o desenvolvimento do aluno, focando em aprendizagem e construção de significado, onde alunos de qualquer período poderiam ser verdadeiramente engajados na solução dos problemas centrais de quaisquer disciplinas desde que suas questões principais pudessem ser representadas de forma a convidar à experimentação e análise ao nível apropriado. A chave desta ideia está em desenhar o currículo de tal forma que tais questões centrais sejam retomadas em níveis cada vez mais elaborados na medida em que o aluno avança seu conhecimento e capacidade intelectual. Assim, o estudante passa a desenvolver um pensamento mais próximo à sua futura profissão, visto que aprende e participa de investigações de complexidade crescente, detalhadamente organizadas em torno de um tema central de escolha, e com isso absorve o conhecimento de forma mais natural, e desenvolve características importantes para a solução de problemas reais. A esta estruturação, por analogia de forma, seu autor deu o nome de Currículo em Espiral, ou currículo em espiral. Dada a importância deste método para o seguimento deste trabalho, mesmo que em parte seja redundante, ele será retomado mais detalhadamente adiante.

Mesmo sendo tão antiga, ou talvez por causa disso, a definição do que é aprendizagem ativa ainda causa alguma confusão. Não é rara a resposta do docente que atribui a ela qualquer tipo de envolvimento do discente, como prestar atenção à aula ou resolver exercícios de aplicação de fórmulas. Apesar de sua origem ser anterior e estar bastante ligada ao Construtivismo, foi após o relatório de BONWELL e EISON (1991) para a ASHE (Associação para o estudo do Ensino Superior Norte-americana) que o termo se popularizou e ganhou força. Os autores ressaltam neste livro que apesar da falta de uma definição mais precisa, há algumas características associadas às estratégias de aprendizagem ativa, como:

“- Estudantes são envolvidos em mais que escutar.

- É colocada menos ênfase na transmissão de informação e mais ênfase no desenvolvimento de habilidades do estudante.

- Estudantes são envolvidos em pensamentos de alta ordem (análise, síntese e avaliação).

- *Estudantes são engajados em atividades (e.g. lendo, discutindo e escrevendo).*
- *Maior ênfase na exploração dos valores e atitudes por parte dos próprios alunos.*¹³

Neste mesmo trabalho eles propõem uma definição que será adotada. A aprendizagem ativa é dita então como aquilo que “envolve alunos em fazer coisas e pensar sobre as coisas que estão fazendo”.¹⁴

Diversos métodos têm sido desenvolvidos a partir desses princípios. Alguns dos mais conhecidos são:

- Estudo de caso – amplamente utilizado em faculdades de direito, mas também muito presente em administração e finanças, ele tem origem ainda no século XIX na Escola de Direito de Harvard e pode ser resumida como BONWELL e EISON (1991):

*“...estudos de caso são escritos objetivamente e incluem uma visão geral breve sobre a situação, juntamente com informações descritivas que tanto estabelecem um contexto para o problema como identificam as principais decisões que precisam ser tomadas.”*¹⁵

Por se tratar geralmente de uma situação complexa com diversas interpretações e soluções, o estudo de caso leva o estudante a construir argumentos consistentes para discutir com os outros alunos e o professor, fortalecendo-se assim o pensamento crítico e a tomada de decisão. Além disso,

¹³Tradução livre para: “- *Students are involved in more than listening.*

- *Less emphasis is placed on transmitting information and more on developing students’ skills.*

- *Students are involved in higher-order thinking (analysis, synthesis, evaluation).*

- *Students are engaged in activities (e.g., reading, discussing, writing).*

- *Greater emphasis is placed on students’ exploration of their own attitudes and values.”* (pág. 2)

¹⁴Tradução livre para: “*involves students in doing things and thinking about the things they are doing*” (pág. 2)

¹⁵Tradução livre para: “*case studies are written objectively and include a brief overview of the situation along with descriptive information that both establishes a context for the problem and identifies the major decisions that must be made*” (pág. 38)

o aluno deve buscar o conhecimento para embasar seus argumentos e desenvolver o trabalho em grupo e a capacidade de se expressar.

- Jogos – bastante aplicado para o ensino de tomada de decisão, este método se utiliza de simulação (muitas vezes computacional) de sistemas ou, mais comumente, de ambientes empresariais. Como nos descreve BELHOT (1997, p.99):

“A partir dos jogos, jogos de empresas, entre outros, os estudantes podem ganhar experiência nas decisões de caráter tanto estratégico como operacional, através de exercícios intensivos de simulação, que podem ser feitas pelo computador...”

Vivenciando situações rotineiras de empresas, este método ajuda a aprimorar a capacidade de negociação e comunicação, já que depende do consenso do grupo na escolha sobre qual caminho tomar para atingir os objetivos propostos no jogo.

- Laboratórios – amplamente utilizados, desde o ensino fundamental até a pós-graduação e com diversos formatos, desde laboratórios computacionais (para o aprendizado de linguagens de programação, desenho técnico, matemática, modelagem e simulação, entre outros), passando por laboratórios de ciências básicas (como química, física e biologia), até laboratórios de ciências aplicadas (como resistência dos materiais ou eletrônica), nestes ambientes os alunos costumam formar grupos para resolver experimentos pré-estabelecidos e com isso aprender fazendo, aplicando a teoria que foi dada (mas não necessariamente recebida) em sala de aula, muito provavelmente de forma expositiva. É de grande valia para consolidar conhecimento teórico/técnico e, dependendo de como os envolvidos trabalham e apresentam os resultados, pode ajudar a desenvolver trabalho em grupo e a capacidade de se expressar.

- Representação ou RPG – bastante utilizada no ensino da linguagem, de história ou de valores éticos e morais, este método passa pela representação teatral, improvisada sobre um cenário estabelecido por um membro, ou ensaiada com base em um texto pré-selecionado. Esta metodologia leva o educando a, como nos esclarece CARVALHO (2013, p.48):

“...entrar em contato com conteúdos teóricos referentes às diferentes formas culturais presentes ao longo da história da humanidade, articular os conhecimentos históricos com a realidade presente e possibilitar o amadurecimento crítico, estético e reflexivo”.

- Problem-Based Learning – talvez o método de aprendizagem ativa mais adequado para boa parte do currículo de engenharia, no qual o instrutor expõe um problema ou projeto para os estudantes que, em grupos, investigam, debatem, interpretam e produzem possíveis soluções ou produtos. Assim eles são expostos desde cedo ao “modus operandi” da sua futura profissão e desenvolvem além de conhecimentos, características (habilidades e atitudes) necessárias para a boa condução de seu ofício. Como este método será o tema central deste trabalho, e em diferentes graus permeará todos os demais capítulos, cabe dar-lhe maior detalhamento, o que será feito a seguir.

4.2. Aprendizado Baseado em Problemas

Talvez devido a sua versatilidade e adaptabilidade, uma das correntes de aprendizagem ativa de maior sucesso, que será destaque neste estudo, é o Aprendizado Baseado em Problemas (ou sua sigla em inglês PBL – “Problem-Based Learning”). Por sua importância no ensino de engenharia e pela ênfase que se lhe pretende dar neste trabalho, decidiu-se por abordá-lo em separado das outras metodologias desta corrente.

4.2.1. Breve histórico

Muitos autores consideram que sua criação se deu na década de 1960, no curso de medicina da McMaster University, Ontário, Canadá, quando se consolidam várias tendências que ganham força no início do século XX, focadas na aprendizagem ativa, centradas no estudante, na interdisciplinaridade e na conexão entre fazer, pensar e aprender.

Um dos docentes que passou por esta universidade no início da adoção deste método foi o americano Howard Barrows, neurologista que uma década depois voltou para seu país de origem e ganhou notoriedade por disseminar o PBL nas escolas de medicina. Até hoje seu livro “*Problem-Based Learning: An Approach to Medical Education*”, de 1980 é amplamente citado e continua a ser uma referência importante em pesquisas nesta área.

Desde 1971, ano em que a primeira turma da McMaster University formada através dessa metodologia se graduou, o PBL tem sido adotado por um número

cada vez maior de escolas de medicina no mundo e hoje, conforme BARROWS (1996), é amplamente utilizado nos EUA e também em muitos outros países.

Visto o sucesso alcançado no ensino de medicina, a metodologia logo se alastrou para outras escolas das ciências biológicas, mas também para outras áreas, como arquitetura, direito, economia, administração, ciências sociais. Apesar de se encontrar, em 1993, no programa de engenharia mecânica da Universidade de Twente, na Holanda, um currículo com muitas das propriedades deste método, ainda não se falava em PBL nessa instituição. Foi em 1997 que a metodologia foi implementada pela primeira vez em engenharia com tal nome, segundo PASSOS *et al.* (2010), na Universidade de Aalborg, e em seguida na Universidade de Roskilde, ambas da Dinamarca. A década de 1990 é vista como uma década experimental para o PBL na engenharia, sendo então na primeira década do século XXI que os primeiros trabalhos que suportam sua boa adaptabilidade para tal área são publicados.

Esta tendência mundial levou à criação de uma cadeira permanente na UNESCO – UCPBL (UNESCO Chair in Problem-Based Learning in Engineering Education) - que realizou seu primeiro simpósio em 2008 na Universidade de Aalborg, hoje vista como precursora e referência mundial na aplicação institucional do método em escolas de engenharia.

Além da Universidade de Aalborg, alguns exemplos da aplicação desta metodologia em engenharia se apresentam nas seguintes instituições:

- Catholic University of Leuven (Bélgica)
- Delft University of Technology (Holanda)
- Melbourne University (Austrália)
- Nottingham University (Inglaterra)
- Programa Aeroastro do MIT (EUA)
- Roskilde University (Dinamarca)
- Stanford University (EUA)
- University College London (Inglaterra)
- University of Maastrich (Holanda)
- University of Manchester (Inglaterra)
- University of Twente (Holanda)
- University of Utrecht (Holanda)

No Brasil já há casos de aplicação do PBL em cursos de engenharia, como na PUC-SP, na Escola de Engenharia da Universidade Federal de São Carlos e

na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, mas não são adotados de forma integral e raramente são interdisciplinares.

Atualmente se encontra em diversas obras estas adaptações do PBL para a engenharia sendo chamadas de PjBL, onde o “P” de problema se transforma em “Pj” de projeto, outros de POPBL (LEHMANN *et al.* 2008, Problem-Oriented and Project-Based Learning), P5BL (Stanford em <http://pbl.stanford.edu/> - Problem, Project, Product, Process and People Based Learning) e há também quem chame de PLEE (POWEL e WEENK - 2003 - Project-led Engineering Education), mas assim como Kolmos e pesquisadores da área, que preferem manter as diferentes definições sob a mesma sigla (PBL), argumentando que na essência fazem parte da mesma metodologia, neste trabalho será utilizado somente o termo PBL e seu sentido deverá ser entendido como o mais amplo, ou seja, aquele que engloba o problema e o projeto e que se define pelas características que serão detalhadas mais à frente.

4.2.2. Características gerais

São frequentemente citadas na literatura como características básicas e essenciais do PBL:

- **foco no aprendiz** – o processo de ensino/aprendizagem tem seu foco transferido do conteúdo, quando tipicamente o professor está preocupado em cumprir com a ementa curricular, para partir do conhecimento prévio do aluno e fazê-lo avançar, sempre contextualizando tal conteúdo em sua realidade e adequando-o, quando necessário, para que alunos com diferentes carências ou facilidades sejam contemplados durante seu desenvolvimento.

- **aprendizagem pelo fazer** – deste modo o estudante sente-se estimulado a procurar por soluções para alcançar os objetivos e pode se questionar, durante o processo, sobre quais os conhecimentos que já domina, quais precisam ser aprofundados e quais são suas carências. A aprendizagem pelo fazer ajuda também a desenvolver a criatividade e o raciocínio direcionados para soluções de problemas.

- **projetos que abordem necessidades reais e que sejam de solução aberta** – a ideia é trazer as preocupações da sociedade, da indústria ou mesmo do educando para que não só sejam problemas estimulantes, mas também para que suas soluções tenham aplicações reais, favorecendo com isso que o aluno desenvolva desde cedo habilidades e atitudes que serão exigidas em sua

profissão. Não basta então chegar a uma solução, ela tem que ser viável (econômica, mas também legal e moralmente), deve cumprir com um prazo e ser comunicada de forma amigável ao “cliente”. No caso de projetos que estejam ligados ou sejam “encomendados” pela indústria ou alguma empresa externa à academia, um ambiente para que o aluno desenvolva ainda mais uma postura profissional (pois estará lidando com profissionais) é criado. Isso também pode facilitar sua contratação futura. Ambas as vantagens são também encontradas no estágio em empresa, mas ao serem tratadas antes deste, durante um projeto em PBL, podem inclusive melhorar a experiência em futuros estágios.

- **estudo baseado em busca e filtragem de conhecimento** – através dos questionamentos surgidos, os alunos se sentem impelidos a procurar as respostas, se engajando em procurar e filtrar o conhecimento encontrado. Assim, deixam de ser passivos ao receber informações de uma fonte a priori fidedigna (o professor) para ter que se utilizar de pensamento de alta ordem, analisando, comparando e criticando o conhecimento encontrado. Isso não só ajudará em sua profissão no futuro, onde deverá ter uma atitude de constante busca de inovação e saber utilizar os recursos para encontrar e filtrar o conhecimento; como também aumenta a absorção e fixação do conhecimento adquirido.

- **tutoria** – como uma das consequências do primeiro item (“foco no aprendiz”), o docente deixa de ter toda a responsabilidade de dar o conteúdo programado e sai de seu “palco” para assumir uma postura de tutor ou guia, que auxiliará o discente, agora mais do que nunca responsável pelo seu aprendizado, na busca do conhecimento necessário sem, no entanto, dar a resposta pronta ao problema. O tutor estará mais atento para o andamento das atividades, na justa distribuição de carga de trabalho entre os envolvidos, em manter as discussões na direção desejada não permitindo que percam o foco; e em um segundo plano atuará como apoio ao avanço do conhecimento, ajudando ao indicar fontes para pesquisa das mais diversas formas (vídeos, textos, livros, especialistas, minicursos ou até mesmo disciplinas). As características necessárias para este facilitador deixam de ser o pleno domínio do tema abordado – até porque, como se verá mais à frente, há um caráter de interdisciplinaridade muito forte - e passam a ser a condução do processo, começando por colocar questões de interesse e contextualizá-las sem, entretanto, restringir demasiadamente o conjunto de soluções. São importantes também a empatia e a liderança com o grupo, para que os estudantes não percam o curso de aquisição de conhecimento, devendo o tutor enfatizar a

importância do questionamento direcionado e do aprendizado coletivo, não deixando nenhum componente do grupo para trás.

- **trabalho em equipe** – característica simulada do ambiente de trabalho, este formato auxilia no desenvolvimento de habilidades e atitudes que serão bastante valorizadas na maioria dos postos de trabalho de engenharia. Para que haja a construção coletiva de conhecimento, o lecionando será levado a desenvolver habilidades como planejamento, comunicação, liderança, gerenciamento de conflito e de frustração, capacidade de refletir sobre o argumento e respeito pelo ponto de vista alheio, entre outros.

- **interdisciplinaridade**– projetos que apresentem uma grande interdisciplinaridade, combinando não só assuntos técnicos ou matérias das ciências exatas, mas também incluindo questões das ciências humanas e naturais, estão mais alinhados ao mercado que hoje reivindica do engenheiro uma capacidade para uma interpretação holística e complexa da realidade na qual seu trabalho está inserido. Desta forma, incluindo a interdisciplinaridade nos projetos abordados, o programa não só estará cumprindo com a proposta da terceira característica aqui descrita (*projetos que abordem necessidades reais*), mas estará também preparando os futuros profissionais para dilemas e situações que farão parte de seu cotidiano.

- **comunicação/apresentação do produto final** – habilidade bastante usada e incentivada no PBL, já foi abordada como componente de outras características, mas merece destaque por sua importância no mundo globalizado e na Era da Informação dos dias atuais. A preparação do futuro engenheiro para que não seja somente competente no saber técnico, mas também em apresentá-lo, tem sido deixada de lado para que ele próprio descubra esta competência, quando a descobre, muitas vezes perdendo assim ótimas oportunidades, no decorrer de anos de profissão. Por isso a urgência de desenvolvê-la ainda dentro da academia, pois caso se deseje efetivamente preparar os jovens para que assumam cargos de destaque, torna-se indispensável focar em dotá-los de conhecimento, visão e ética para que possam desempenhar bem a função, mas também com o ferramental necessário para conseguirem alcançar estes postos.

4.2.3.

Vantagens do método

Analisando as habilidades desenvolvidas (descritas no item anterior) ao se utilizar o PBL e comparando-as com aquelas que são esperadas para o

engenheiro do século XXI (citadas no capítulo 2) e também com aquelas exigidas pelo Ministério da Educação e Cultura através da Resolução 11 de 2002 (em parte citada anteriormente), percebe-se que este método responde às demandas para a formação deste profissional no futuro.

Como será discutido mais à frente, a adoção desta metodologia, se feita de forma responsável, consciente e institucional, viabiliza não só o desenvolvimento destas habilidades e atitudes, como também a garantia de que não haja uma perda no rigor da formação técnico-científica. Além disso, por ser um método que envolve o aluno e atrai seu interesse pelo conhecimento, se bem formulado, o problema/projeto pode aumentar a fixação do conhecimento para além da avaliação, o que hoje é um desafio para o método tradicional. Essa dificuldade é motivo de frequente reclamação dos docentes que percebem a falha na retenção de conhecimentos ministrados em disciplina pré-requisito.

Para além destas vantagens, que por si só já justificariam a adoção desta linha da aprendizagem ativa, há estudos (um deles será apresentado mais adiante) que apontam que este método aumenta a retenção dos alunos, pois é adequado às expectativas das gerações de hoje e, mais ainda, das gerações futuras que antes mesmo de falarem já sabem utilizar *tablets* e *smartphones*, têm urgência na informação e inquietude com o conhecimento.

A atratividade do curso também é uma questão e não podemos nos abster da responsabilidade em causar o interesse da juventude na engenharia. Não é só o imaginário sobre a profissão que atrai os jovens, mas também como eles encaram o curso de graduação.

O estudo de SALERNO *et al.* (2013) mostra que a taxa de desemprego da categoria, que já era historicamente baixa, caiu pela metade entre 2000 e 2010, assim como aumentaram a proporção dos engenheiros em ocupações típicas e o diferencial de salário entre exercer estes cargos e exercer outra ocupação. Isto sinaliza que, nesse período, o crescimento do número dos entrantes em engenharia não acompanhou o crescimento da necessidade de mercado em condições normais.¹⁶

No entanto esses atrativos não parecem ser suficientes. Se o apelo do curso de engenharia não é mais o mesmo de outrora, mesmo quando o mercado

¹⁶ *Cumprе salientar que o estudo citado chega a conclusões diversas às deste trabalho, colocando como razão principal para o sentimento de escassez de engenheiros no mercado na brecha geracional advinda da crise sofrida na profissão na década de 90.*

está aquecido (os dados apresentados são anteriores à crise econômica que se vive atualmente) não há como nos furtar a pensar que isso se deve também ao método pouco adequado a esses jovens, problema este que tende a se agravar para as próximas gerações.

Nesta altura o leitor mais crítico pode se questionar se não há uma forte influência da fraca formação matemática do pretendente anterior ao seu ingresso na universidade, o que leva que cada vez menos candidatos estejam dispostos a encarar o desafio da grande carga matemática que encontrarão na engenharia. Por mais que isso seja realidade, não exime o curso de engenharia da responsabilidade de atrair este público, pois cada um deve fazer sua parte na esperança de que outros agentes responsáveis enxerguem também as mudanças necessárias em outras esferas que estão fora do nosso alcance.

Finalmente, o método tem como característica básica ser aberto à revisão, que será detalhada posteriormente. Esta é uma grande vantagem - apesar de tomar tempo e dedicação por parte dos docentes, de necessitar de participação de outros funcionários, atores (especialistas, ex-alunos, indústria) e também dos discentes - pois a revisão obriga à constante adequação e melhoramento, através dos quais o primeiro reflexo encontrar-se-á na melhoria da formação do concluinte e irá muito além, aumentando o reconhecimento da excelência da instituição e de seu comprometimento com a sociedade e a indústria.

Neste ponto é adequada a analogia destas considerações com o próprio processo de fabricação: através de um ciclo de PDCA (Plan-Do-Check-Act) há a melhoria do “produto” (o recém-formado), adequando-o cada vez mais ao “mercado consumidor” (a sociedade, a indústria e de forma muito peculiar, os próprios alunos). Como fala KAMP (2011), os estudantes “são clientes, coprodutores e produto ao mesmo tempo”.¹⁷

4.2.4. Pesquisas sobre sua implementação e eficácia

A partir dos anos 2000 começaram a surgir diversos trabalhos que tratam sobre a implementação, os desafios e as impressões do método. Alguns trabalhos, tanto qualitativos quanto quantitativos foram feitos sobre a eficácia do método. A seguir será apresentado um apanhado de trabalhos considerados importantes, tendo em vista a abordagem dos diferentes tópicos de interesse.

¹⁷Tradução livre para: “are the customers, co-producers and product at the same time”. (pág. 3)

No artigo *Organização De Um Processo De Aprendizagem Baseado Em Projectos Interdisciplinares Em Engenharia*, CARVALHO e LIMA (2006) abordam a adoção do PBL em turmas do segundo semestre de Engenharia Industrial da Universidade de Minho. Eles tratam primeiramente de alguns pontos importantes antes de sua implantação, como o envolvimento e o apoio institucional, a mudança do espaço físico, o apoio pedagógico e o treinamento dos docentes. Em um segundo momento eles citam brevemente como é feito o planejamento do calendário e a organização dos grupos de alunos e docentes, bem como do papel dos tutores, e retratam a necessidade de documentação adequada e os pontos de controle e avaliação. Por último eles descrevem como se deu a primeira execução, citando como foi sua apresentação aos alunos, a formação dos grupos, o primeiro miniprojeto voltado ao entendimento de ferramentas básicas para a prática do PBL e concluem com os retornos positivos tanto dos docentes quanto dos alunos.

Nessa mesma linha, um pouco mais recentemente, no artigo "*Making curricular change - Case report of a radical reconstruction process*", KAMP e KLAASSEN (2013) tratam de todos os passos até a implementação de mudanças no currículo de engenharia espacial da Delft para a adoção deste método. Além de colocar os passos, as dificuldades encontradas e as soluções adotadas, eles citam várias fontes de trabalhos sobre o assunto que os ajudaram a escolher o caminho para as mudanças, assim como as metodologias de abordagem. Eles explicam como o apoio das lideranças é importante, assim como o envolvimento da equipe e das partes interessadas ("stakeholders"), mas citam também diversas estratégias e momentos para alcançar esses apoios e envolvimento.

ULSETH e JOHNSON (2014) escreveram para a IEEE um artigo intitulado "*100% PBL curriculum: Startup phase complete*", onde tratam da criação de uma instituição que tomou como base, em um primeiro momento, a Aalborg University da Dinamarca e depois, através de ciclos de PDCA (plan-do-check-act) reviu seus preceitos e os adequou melhor à realidade daquela instituição.

Nesse artigo há um resumo interessante do embasamento teórico para o uso do PBL, indicando, entre outros, o relatório da UNESCO sobre o tema e também os conceitos da APA (American Psychological Association) para o desenvolvimento de sistemas de aprendizagem ("desenvolvimento de perícia, reflexão, metacognição, suporte instrucional, motivação, atividade

contextualizada, comunidade de aprendizagem e identidade” – tradução livre)¹⁸. Os autores explicam brevemente cada conceito para justificar a adoção do PBL na base desta instituição, como forma de se atingir todos os níveis anteriormente descritos.

Por fim eles mostram uma pesquisa feita junto à comunidade industrial (23 entrevistados), onde se interrogam empregadores sobre os engenheiros recém-formados em instituições que utilizam o PBL contra aqueles de outras instituições. O resultado foi bastante favorável para o PBL, pois aqueles que estudaram através deste método superam os outros em todos os treze critérios analisados, dentre eles um dos pontos apontados por críticos do PBL, qual seja, o conhecimento técnico da área (matemática, ciência e engenharia aplicadas).

A publicação dedicada à educação da Universidade de Stanford intitulada “*Speaking of Teaching*” se dedica ao PBL em seu décimo primeiro volume, número um de 2001, onde faz um resumo das características, citando as vantagens e o alcance do método. O texto passa pela importância do sentido de autoria no aluno, fala do ganho dado pelo trabalho em grupo, dá sugestões de organização para esse tipo de trabalho, cita as características de problemas de forma a alcançar os objetivos (problemas de solução aberta) e como deve ser feita a avaliação.

O artigo evidencia a importância do instrutor nas mais diversas partes do método, servindo não somente como guia para a solução do problema, mas também como quem dá voz às questões cognitivas, auxilia o aluno a se tornar autodidata, media possíveis conflitos do grupo e também avalia tanto o progresso do grupo como um todo e de cada um de seus participantes, como a necessidade de alteração do método.

Um estudo brasileiro é apresentado por RIBEIRO e MIZUKAMI (2005), onde são entrevistados alunos que utilizaram o PBL durante o curso de engenharia civil da Universidade Federal de São Carlos. O resultado do questionário aplicado foi positivo e mostrou que os alunos perceberam o desenvolvimento de habilidades como a de resolver problemas e de trabalhar em equipe, muito embora tenham também se queixado da grande carga de trabalho, principalmente em horários considerados fora dos horários dedicados às aulas.

Ainda sobre o cenário brasileiro e mais atual, o capítulo 13 – “*Project-Based Learning (PBL) Experiences in Brazil*” escrito por SILVEIRA *et al.* (2009)

¹⁸ “*development of expertise, reflection, metacognition, scaffolding, motivation, situativity, learning community, and identity*” (pág. 4)

no livro “*Research on PBL Practice in Engineering Education*” faz uma descrição detalhada sobre a história da implementação do método no Brasil e traça um paralelo com alguns outros países, principalmente a França. Também levanta as necessidades de adoção do método considerando sua adequação para a formação do engenheiro da atualidade, suas vantagens e os desafios encontrados no Brasil para que as necessárias mudanças sejam executadas.

4.2.5. Críticas

Algumas pesquisas sobre a aplicação do PBL enumeram entraves ao sucesso do método. Conhecê-las pode favorecer o debate construtivo e o reconhecimento da diferença conjuntural entre os cenários analisados. Além disso pode também auxiliar no desenvolvimento de medidas ou adequações que visem aumentar a eficácia desta metodologia de aprendizagem.

Um estudo patrocinado por Bernard M. Gordon/MIT Engineering Leadership Program, realizado por Ruth GRAHAM em cursos de engenharia no Reino Unido que utilizam o PBL, concluiu que alguns fatores podem ser responsáveis pela diminuição da aplicação de métodos de aprendizagem ativa nas faculdades do Reino Unido. GRAHAM cita, no artigo intitulado “*UK approaches to engineering Project-Based Learning*” (2010), os seguintes elementos:

a) Tempo - o sistema de avaliações e financiamento das instituições de apoio à pesquisa no Reino Unido prioriza a produção acadêmica, especialmente a publicação de artigos em periódicos de alto impacto. Nesse contexto, as faculdades que aplicam o PBL saíam em desvantagem, pois este método demanda bastante tempo do corpo docente no planejamento e apoio dos cursos, diminuindo assim o tempo para a geração de publicações com consequente queda dessas universidades nas classificações dos órgãos ingleses de fomento à pesquisa.

b) Experiência - durante as entrevistas a autora constatou que o número de professores engenheiros com experiência na indústria vem diminuindo nas últimas décadas. A experiência no mercado de trabalho é uma importante característica para dar suporte a projetos que visam “simular” a realidade. Assim, muitos professores com perfil de pesquisadores especialistas ficam resistentes às mudanças no currículo por serem obrigados a sair da zona de conforto para se engajarem em novas áreas nas quais têm pouca experiência.

c) Formação de facilitadores - o PBL é um método que necessita de muitos colaboradores para auxiliar os alunos. Em geral os estudantes de doutorado e pós-doutorado podem fazer este papel. Entretanto muito desses estudantes não estão verdadeiramente engajados no desenvolvimento do grupo, dando o mínimo de orientação técnica possível. Esta falta de engajamento dos estudantes de doutorado e pós-doutorado pode ser explicada principalmente pela falta de experiência deles nesse tipo de método, já que suas formações universitárias provavelmente foram alcançadas basicamente pelo emprego de métodos tradicionais de ensino.

d) Eficácia do PBL - muitas instituições de ensino hesitam em aplicar o PBL integralmente, pois a superioridade de sua eficácia, quando comparada com a dos métodos tradicionais, ainda não está efetivamente comprovada.

e) Recursos - o PBL possui uma demanda maior de pessoal, materiais, equipamentos e recursos.¹⁹

f) Preocupações com a acreditação - muitos diretores de faculdades demonstraram preocupação com o reconhecimento dos cursos que utilizam o PBL como método. Entretanto GRAHAM relata que nenhum programa de engenharia no Reino Unido deixou de ser reconhecido devido à utilização do método.

g) Espaço de aprendizagem - muitas faculdades alegaram a falta de espaços de aprendizagem adequados como uma barreira para a implementação do PBL. Apesar disso, os últimos investimentos em estrutura física realizados nas universidades do Reino Unido contemplaram a construção de salas mais adaptadas à aprendizagem ativa.

Outro trabalho que apresenta os desafios do PBL é o de LIMA *et al.* (2007), intitulado “*A case study on Project led education in engineering: students’ and teachers’ perceptions*” e realizado com alunos e professores do primeiro ano do curso de Engenharia Industrial no norte de Portugal. Dele, podem-se citar as dificuldades apontadas pelos alunos tais como: o trabalho em grupo, a aprendizagem de conceitos feita de forma autônoma, o volume de trabalho e a falta de integração e comunicação entre os professores dos diferentes projetos.

¹⁹ *Transportando esta crítica para a realidade brasileira, a morosidade e a burocracia de alguns procedimentos, que por vezes exigem concurso (contratação de pessoal) ou licitação (como a compra de material ou contratação de serviço), podem ser vistas como mais um complicador para a adoção do PBL.*

No livro “*Project-Led Engineering Education*” de POWELL e WEENK (2003), que discute diversos aspectos do ensino por projeto em engenharia, seus autores listam alguns desafios do método. Eles dividem os pontos fracos em três grandes grupos: gestão, equipe e alunos.

Na gestão foram citados os altos custos da implantação, a organização de cursos e projetos de apoio para estudantes de disciplinas diversas e a avaliação em regime permanente, já que projetos em diferentes níveis acadêmicos podem gerar um impasse caso a avaliação não tenha sido cuidadosamente planejada. Além disso, o planejamento do currículo deve ser cuidadoso de forma a garantir que os alunos irão apreender assuntos mais abstratos.

No item equipe POWELL e WEENK apresentam questões bastante pertinentes concernentes ao currículo e aos tutores. Com a implantação do PBL, por exemplo, alguns aspectos do currículo antigo são relegados a segundo plano. Outro fator é a avaliação por competências dos alunos, que é mais complicada do que aquela por conteúdos. Além disso, o método exige mais preparo e tempo dos tutores, o que dificulta o desenvolvimento de outras atividades do corpo docente, tais como pesquisa e publicação.

Os autores discutem também sobre os desafios do método relacionados aos alunos. De acordo com eles, os alunos que ficam doentes ou que precisam se ausentar das aulas ficam mais prejudicados pois não há tempo para recuperar as atividades perdidas. Outro fator é a qualidade e/ou integração do grupo que pode comprometer a qualidade do projeto assim como do processo de aprendizado. Durante a realização de um projeto, os alunos recebem orientação de diferentes tutores, o que pode resultar em conselhos conflitantes. A quantidade de avaliações e o pouco tempo para se aprofundar nos conteúdos também é uma questão complicada para os alunos. Por fim, alguns professores não acreditam que o ensino por projeto possa ser utilizado com os alunos do primeiro ano pois os alunos não conhecem nada da teoria e da engenharia em geral. Entretanto os autores afirmam que os novos alunos respondem bem ao método e ficam bastante motivados.

Por último, outro ponto bastante relevante é levantado por Erik de GRAAFF e Anette KOLMOS no artigo *Characteristics of Problem-Based Learning* (2003): é a possível dificuldade do aluno na apreensão da teoria a partir da prática, de forma que este possa ter problemas em transferir conhecimento, teoria e métodos de áreas previamente aprendidas a novos projetos ou situações.

4.2.6. Desafios

Apesar de seu apelo como forma quase intuitiva de aprendizagem, o método PBL guarda diversos desafios em todas as fases de seu ciclo de vida. No item anterior foram citadas as principais críticas feitas a ele sem, no entanto, ressaltar como abordá-las. Neste item a proposta é de reconhecer seus pontos fracos e ameaças e tentar identificar onde e como devem ser tratados.

Conforme apontam HARMER e STOKES (2014) grande parte dos autores por eles pesquisados ressalta o trabalho em grupo, que apesar de ser uma habilidade bastante importante de ser aprimorada, reserva tensões e conflitos. A falta de reconhecimento no valor do trabalho coletivo é bastante frequente, principalmente dentre os alunos de desempenho anterior elevado. A atuação de guia e líder do tutor nestes momentos é de suma importância, valorizando o trabalho de cada um como parte de um avanço coletivo rumo ao sucesso do projeto.

Outro desafio muito recorrente nas pesquisas analisadas por estes autores é a adaptação das partes envolvidas (docentes, discentes e funcionários) ao novo “modus operandi”, durante a qual os papéis tradicionais de todos esses atores são postos em cheque e os novos papéis não necessariamente agradam a todos, em especial ao professor que está acostumado a seguir seu conteúdo programático e muitas vezes já tem todo o material pronto. Neste momento é importante lembrar ao docente que tanto o seu objetivo quanto o da instituição de ensino é o de ser formador, ou seja, todos estão ali para preparar, da melhor maneira possível, o futuro profissional. Também não custa apontar-lhe que esta nova maneira é interessante não somente ao aluno, mas a ele também, pois terá uma atividade mais criativa, onde discussões nunca serão as mesmas, onde será levado sempre a novas ideias e estará em maior sintonia com seus alunos.

No caso de alunos, aqueles que já são bem adaptados às aulas tradicionais podem ser bem resistentes à mudança, pois no ensino tradicional eles recebem tudo do professor – quando não o conhecimento em si, a melhor fonte onde podem encontrá-lo – e são preparados para ao final, responder questões que se enquadram naquilo que viram durante as aulas. Apesar de esta forma parecer, principalmente no ponto de vista do estudante, bastante lógica, afinal o professor só cobra em prova aquilo que ele deu em aula e da forma que deu em aula, isso em nada se assemelha à profissão que irão seguir, que espera deles preparo suficiente para resolver problemas “fora-da-caixa”. Cabe

novamente à instituição, seja na figura do tutor ou em alguma palestra inaugural, mostrar para o entrante a importância de se aprender desde cedo esta independência na busca da solução, na busca do conhecimento, justificando assim a adoção dessa metodologia.

A avaliação é um ponto bastante delicado e precisa de cuidado em sua aplicação. Apesar de a antiga forma de provas individuais (considerada demasiadamente objetiva) não se adequar para avaliar a extensa gama de conhecimentos (muitas vezes multidisciplinares), habilidades (como capacidade de comunicação e liderança) e atitudes (como busca pela informação e atualização), mesmo assim não se pode cair na tentação de deixar a avaliação ser um processo puramente subjetivo, correndo o risco de haver alunos desorientados sobre seus critérios e objetivos e conseqüentemente desestimulados.

É necessário estabelecer claramente, tanto para o corpo docente quanto para os alunos, como se dará o processo de avaliação (de preferência em vários níveis), justificando os diferentes pesos dados a cada uma de suas etapas à luz do progresso das características e de sua medição.

Outro grande desafio do método está na adequação da carga de trabalho dos alunos. Ao se propor um projeto, a equipe de especialistas/docentes deve analisar em qual nível se encontram as características dos alunos, quais delas eles desejam trabalhar e quanto pensam em avançá-las. O projeto então proposto deve (como analisado no item 4.2.2) abordar necessidades reais e que sejam de solução aberta e interdisciplinar, mas também deve ser factível pela maior parte dos grupos, senão o sentimento de frustração destrói o interesse, e todo o desenvolvimento e envolvimento desejado é perdido.

Para conseguir adquirir experiência sobre o tamanho da carga de trabalho que seja bom o suficiente para despertar o interesse pelo desafio sem ser grande demais para causar frustração, alguns autores como POWEL (2003) e CARVALHO e LIMA (2006) indicam fazer projetos pilotos, que envolvem alunos de forma voluntária.

Apesar de a carga de trabalho ser um desafio, com a experiência será mais fácil o controle desta característica neste tipo de aula do que no tradicional, pois este, não tendo interdisciplinaridade (disciplinas estanques), favorece o risco de que alguns professores acabem por sobrecarregar os alunos, prejudicando seu desempenho nas demais disciplinas.

Através de entrevistas GRAHAM (2010) percebeu que o PBL demanda muito tempo, tanto durante a sua fase de desenho (onde como já citado, há o

desafio de dimensioná-lo de forma correta) como na fase de execução. Porém, como em outras atividades, através da experiência o tempo gasto tende a diminuir, mas em um primeiro momento pode ser necessária a contratação temporária de pessoal para auxiliar os docentes nessas duas etapas, fazendo com isso que a curva de aprendizagem seja mais acentuada.

A adequação espacial para a nova conjuntura organizacional e a compra de equipamentos requer um investimento inicial que pode ser considerável, dependendo da estrutura anterior. Esta verba pode ser conseguida de várias formas, como financiamentos internos, investimentos da indústria ou incentivos de governo.

Por último e tão decisivo quanto o empenho de docentes e discentes está o envolvimento da instituição. Muitas vezes é difícil convencer que “time que está ganhando” pode estar fadado ao fracasso. Os sinais de que na realidade “o time não está ganhando” são muitos, mas muitas são também as tentações para refutar as mudanças, afinal a zona de conforto não recebe este nome à toa. Se os desafios anteriormente citados não tiram a vontade de um grupo para fazer a mudança, caso ele encontre oposição na alta gestão da instituição, sua jornada estará destinada ao insucesso. No entanto, em conseguindo o apoio institucional (questão que será tratada adiante), muitos dos outros desafios são facilmente contornados e até mesmo superados.

4.2.7.

Etapas e papéis em um projeto nos moldes do PBL

Ao se implantar esta metodologia de forma estruturada nos cursos de engenharia, para que se diminuam as chances de insucesso, além de todos os desafios citados anteriormente, é importante ter em vista a sequência de trabalho a ser respeitada, assim como as funções de seus envolvidos. Neste intuito, apresenta-se a seguirum descritivo que sintetiza o que foi encontrado na literatura nos seus casos de sucesso. Cabe salientar que a adoção desta cartilha é aconselhada nas primeiras implementações, de forma a dar segurança à equipe, mas que assim que se sentirem aptos e donos do processo, poderão e deverão fazer quantas revisões julgarem necessárias, para que este esquema fique bem adequado à realidade encontrada.

4.2.7.1. Adequação espacial

Como já citado anteriormente, possivelmente uma adequação espacial será necessária, visto que o foco deixa de ser a utilização de salas de aulas de médio porte com quadro negro à frente, para se tornar uma configuração em inúmeras salas menores com recursos de informática para reunião dos grupos, e algumas salas maiores, equipadas com mesas de reunião e recursos multimídias, para que os diversos grupos possam discutir e apresentar seus avanços.

Salas de reunião para as equipes de instrutores e docentes também precisarão ser programadas, pois cada projeto contará com sua equipe coordenadora.

4.2.7.2. Treinamento de pessoal

Para que a aplicação do método seja bem sucedida, é necessário que boa parte dos professores e instrutores sejam treinados nesta nova forma de ensino-aprendizagem. Para o treinamento podem ser convidadas também algumas pessoas-chave do corpo administrativo/gerencial da instituição de ensino, de forma a levá-los a uma melhor compreensão do método, de sua potencialidade e benefícios, mas também, muito importante, de seus desafios e necessidades. Assim será mais fácil ter sua aderência quando investimentos de pessoal e financeiro forem necessários.

Tal treinamento pode ser feito aplicando-se esta mesma metodologia, como no caso dos novos docentes da Universidade de Twente (Holanda) tal qual citado em WEENK *et al.* (2004). Neste artigo os autores ressaltam a oportunidade de o educador se colocar na posição de discente, enxergando melhor os desafios que os estudantes enfrentarão, e também de ter como “produto final” algo que possa auxiliar no desenvolvimento do seu futuro projeto, como por exemplo um “guia do estudante”, um desenho de um projeto ou até mesmo um início de revisão curricular.

Este será o primeiro contato que muitos terão com o método. Outros terão já alguma experiência prévia, mas não necessariamente com sua aplicação institucional. Portanto esta será a ocasião de demonstrar sua eficácia, superando resistências e até mesmo experiências anteriores fracassadas. Neste momento, a contratação de equipe experimentada neste treinamento faz bastante sentido,

pois ela conseguirá responder às dúvidas, auxiliar nas inseguranças e trazer dados importantes sobre como ser bem-sucedido na aplicação da metodologia institucionalmente.

4.2.7.3. Adequação do currículo

Quando o objetivo da adoção do PBL está no nível institucional, ou seja, quando este método será aplicado no curso de forma integral e não somente como opção de alguns docentes em adotarem o método isoladamente em suas disciplinas, os docentes devem ser convidados para uma bateria de reuniões, assim como os coordenadores de curso, os pedagogos e até parte da administração da instituição, para que façam uma revisão curricular. Neste momento deve-se aplicar como base do processo de ensino e aprendizagem o método escolhido, colocando outras soluções como complementares a ele, como laboratórios, seminários, palestras, minicursos e até disciplinas no intuito de suprir possíveis lacunas.

Uma vez dissecado o currículo e seus objetivos de aprendizagem, incluindo não somente os conhecimentos, mas também as habilidades e atitudes esperadas, diversos projetos devem então ser sugeridos. Cabe então indicar para cada um deles quais são as competências e a que nível de desenvolvimento elas são esperadas, de forma que suas progressões e o aprofundamento em suas complexidades sejam gradativos ao longo do percurso acadêmico.

Neste momento, ao se enxergar que ficou faltando alguma competência que não se adequa bem a nenhum dos projetos sugeridos e que também não cabe projeto específico somente para abordá-la, deve-se lançar mão de outras soluções educacionais, como as citadas anteriormente. Como exemplo tem-se o próprio funcionamento do PBL, que por ser novidade para a maioria dos entrantes de engenharia, merece uma aula inaugural, onde será exposto seu funcionamento, a postura esperada do aluno, como será medido seu progresso, e assim por diante.

Caso também se entenda que um conhecimento ou habilidade específica, que faz parte de um objetivo de um dos projetos sugeridos, mereça maior direcionamento para seu domínio, pode-se oferecer minicursos ou outras soluções neste sentido. Por exemplo, caso se observe que a maioria dos alunos está tendo dificuldades em aprender a usar um CAD (mesmo porque a maioria

tem licença paga), pode-se oferecer um minicurso para tal, ou então ter um laboratório para os discentes onde as máquinas tenham CAD instalado.

Por fim, deverá ser estabelecido um “prazo de validade” para este currículo em PBL, após o qual deverá ser feita revisão, para maior adequação aos anseios de todos os interessados (alunos, sociedade, academia e indústria). Para que tal revisão seja eficaz, é importante que sejam definidos os indicadores a serem medidos e seus pontos de controle. Revisões pontuais também podem ser efetuadas antes, caso anomalias sejam identificadas e estas mereçam correção imediata.

A decisão do intervalo de tempo tomado entre tais revisões é muito importante, pois caso seja muito curto, as revisões serão demasiadamente estafantes e perderão apoio e credibilidade, e caso sejam pouco frequentes, deixarão o processo desatualizado, tornando-o falho e desacreditado. Pelo encontrado na literatura, percebe-se que uma primeira revisão logo após a fase de testes é usual, e depois as revisões anuais são bastante utilizadas, principalmente nos primeiros anos de implementação. Imagina-se que revisões bienais ou até trienais possam ser adequadas para alguns currículos ou projetos quando a confiança e o domínio da equipe já são grandes, mas algo mais espaçado que isso corre o risco de deixar o tema abordado obsoleto quando comparado às realidades e necessidades da indústria.

4.2.7.4. Desenho de um projeto

Trata-se de tarefa para uma equipe coordenadora composta majoritariamente por docentes, mas que preferencialmente deve incluir um pedagogo para auxiliar no entendimento e implementação do método, principalmente nos primeiros ciclos. Se não houver pedagogo disponível, ao menos um docente com boa experiência no método deverá fazer parte da equipe de forma atuante.

Ao desenvolver um projeto, a equipe deverá levar em consideração todos os objetivos de aprendizagem, que deverão estar relacionados claramente com o currículo previsto. Estes objetivos devem perpassar todos os quatro níveis descritos por COSTA e KALLICK (apud Project-Based Learning - 2011). São eles:

1 - Atividades em aula - Qual o papel do estudante como parte deste projeto? Estas atividades devem trazer um contexto para o aprendizado e

auxiliar no entendimento dos conceitos chaves. Elas devem facilitar também a prática do processo de pensamento crítico, como comparação, análise e avaliação.

2 - Objetivos de Aprendizagem - Quais são os conceitos e habilidades essenciais que se deseja que os alunos adquiram durante este projeto? E como medi-los? O primeiro nível deverá levar os alunos ao entendimento dos conhecimentos e habilidades do conteúdo previsto. Este nível coloca bastante pressão em cima dos instrutores, pois estes estarão preocupados com a avaliação da aprendizagem, podendo fazer com que eles queiram focar neste ponto, negligenciando os próximos dois níveis, onde o processo de aprendizagem terá maior ênfase.

3 - Hábitos mentais - Quais habilidades mentais gostaríamos que os estudantes desenvolvessem durante este projeto? Estas competências serão críticas para a futura profissão e destacam aqueles que as têm dos demais. São características como pensamento crítico, persistência, capacidade de escutar com compreensão e empatia, metacognição, contínua busca (de atualização) de conhecimento, capacidade de tomada de riscos e de tomada de decisão.

4 - Autodidatismo - O que os discentes vão aprender sobre seu processo de aprendizado como resultado deste projeto? Em última instância, os projetos são oportunidades criadas para que os docentes transfiram aos alunos a capacidade de aprender de forma independente em todo tipo de contexto e cenário.

Como já mencionado anteriormente, um projeto deve ser interdisciplinar, deve ter o foco no aprendiz, deve abordar necessidades reais e ser de solução aberta. Ele deve ser dimensionado para um trabalho em equipe e deve levar em consideração o conhecimento anterior que os alunos possam ter do tema, não esquecendo que o progresso será através de estudo baseado em busca e filtragem de conhecimento e, portanto, deve-se ter cuidado para que os objetivos não sejam demasiadamente ambiciosos (importante evitar pistas falsas) a ponto de impossibilitar o sucesso, sem no entanto serem triviais, o que provavelmente levaria ao desinteresse e conseqüentemente à falha em alcançar os objetivos de níveis superiores (níveis três e quatro).

Como produto deste desenho, deve ser desenvolvido um material específico que será apresentado aos alunos, com o enunciado do problema/projeto, seus objetivos de aprendizagem (se a equipe julgar pertinente serem expostos), a forma como serão feitas as avaliações e com referência aos

recursos educacionais disponíveis que poderão auxiliar como livros, textos, vídeos, páginas web e por vezes laboratórios, palestras ou minicursos.

Além desse material, outro voltado para os tutores deverá ser desenvolvido, que inclua tudo o que será dito ao aluno, mas citando também quais pistas falsas a evitar, o que é esperado dos alunos, o que observar para medir o desenvolvimento e especificando mais detalhadamente os objetivos de aprendizagem, com seus graus de aprofundamento e onde se encaixam na árvore ou espiral do conhecimento.

Por fim um projeto pode acabar tocando em um conhecimento, habilidade ou atitude que não estava previsto nele e fazia parte de outro projeto a ser aplicado mais adiante ou que está sendo levado em paralelo. Desde que o foco para a resolução deste projeto não seja perdido e que não haja grande dispêndio de tempo para tal, isso pode ser encarado de forma positiva, pois ajuda o estudante a ver através de vários aspectos a mesma competência. Se, no entanto, muito tempo for perdido para este avanço e não houver como dissociá-lo do projeto, isso é sinal de que este último deve ser revisto, pois seu desenho não foi apropriado ou o direcionamento dado pelo tutor não foi adequado.

4.2.7.5.

Fases de um projeto

Serão usados como parâmetro projetos dimensionados para se desenrolarem em um semestre, mas há possibilidade de sua adequação para outras durações. Em projetos de final de curso, a extensão de um ano pode ser conveniente. Já para o desenvolvimento de competências mais simples, projetos desenvolvidos durante as férias podem ser bastante adequados.

- Fase inicial – geralmente dura uma semana, podendo se estender a duas dependendo principalmente do grau de domínio dos alunos sobre esta metodologia. Neste momento são definidos os grupos, é apresentado o calendário do curso, o projeto, com seu enunciado, seus objetivos de aprendizagem e as informações julgadas importantes pela equipe coordenadora, como apostilas para consulta e minicursos que servirão de apoio.

Ao final desta fase os grupos deverão apresentar um cronograma de trabalho, com seus objetivos gerais e específicos para o desenvolvimento daquele projeto.

- Fase de execução – com duração de 12 a 14 semanas, nesta fase os discentes vão buscar, com o apoio e orientação do tutor, cumprir com os

objetivos estabelecidos para ao final concluírem o projeto. É nesta fase que surgirão os diversos problemas que compõe o projeto e o tutor deve guiar o grupo para que alcance os objetivos de aprendizagem a cada problema, sem no entanto forçá-los nem muito menos desvendá-los, pois senão os estudantes não se sentirão agentes do processo. Não caberá ao tutor dar aula sobre o assunto, mas sim garantir que todos participem, focados no tema e tentando responder às questões.

Nesta etapa, além das reuniões tutoriais, poderá ser necessário o agendamento de reuniões do grupo para o desenvolvimento prático do projeto ou produto. Esta possibilidade deve ser esclarecida pelo tutor, mas a definição de sua necessidade e a responsabilidade de presença caberá ao grupo e a cada um de seus integrantes.

Durante este tempo deverão ser programadas todas as atividades de apoio previstas para o desenvolvimento do projeto, como minicursos, palestras, laboratórios ou visitas de especialistas.

- Fase final ou de entrega – com duração de uma a duas semanas, este tempo deverá ser utilizado para que os estudantes desenvolvam a apresentação do projeto, os relatórios individuais e em grupo (que servirão para a avaliação das competências adquiridas) e, se for o caso, finalizem o produto.

A apresentação do projeto e/ou produto deverá contar com a presença de todos os alunos, do tutor, da equipe de coordenação que desenhou o projeto e se possível, dependendo do estágio em que se apresenta no curso, de representante da indústria ou de grupo alvo do projeto. A presença da indústria ou de grupo alvo do projeto dará significativa importância ao seu desenvolvimento, que deverá fazer com que o empenho individual seja ainda maior.

4.2.7.6. Dinâmica de execução de um projeto

Desde a primeira seção, depois que os grupos estiverem definidos e os alunos já estiverem agrupados em suas mesas de reunião, a dinâmica de execução do projeto terá os seguintes passos:

- 1 - leitura do enunciado (ou novo problema) e esclarecimento de termos e conceitos;
- 2 – identificação do(s) problema(s);
- 3 - análise do(s) problema(s), formulação de hipóteses explicativas;

4 - resumo das hipóteses;

5 - formulação dos objetivos de aprendizagem para tentar identificar quais hipóteses são válidas e de tarefas para desenvolvimento do projeto;

6 - busca individual para responder às questões levantadas ou desenvolvimento de tarefas individuais ou coletivas;

7 - relato das informações encontradas, tarefas concluídas e novos problemas encontrados.

Os primeiros cinco passos serão desenvolvidos durante a reunião de grupo na presença do tutor. O passo seis deverá então ser desenvolvido durante o tempo que há até a próxima reunião, seja individualmente, no caso de busca por conhecimento ou tarefas individuais de projeto, seja em grupo, ao desempenhar tarefas ligadas ao desenvolvimento do projeto como, por exemplo, construção de modelo para testes. O último passo será levado ao grupo na reunião seguinte.

Reuniões de grupo na presença do tutor deverão fazer parte do calendário do curso entregue aos alunos e devem ser previstos dois encontros semanais, que devem ter duração de duas horas a duas horas e meia cada um. Assim o tutor conseguirá acompanhar de perto o avanço do grupo, guiando-os sempre que julgar necessário.

Os grupos tutorais, que trabalharão sobre os projetos deverão ser compostos de 6 a 10 alunos. Há duas funções específicas que dois alunos irão desempenhar, com rotatividade semanal, assim todos desempenharão todas as funções. São elas as de coordenador e secretário.

4.2.7.7.

Papéis dos diversos atores

Equipe coordenadora - como dito anteriormente, ela desenvolve o projeto. Ela é composta em sua maioria por docentes que dominam um ou mais temas abordados. Eles serão também responsáveis pela medição dos indicadores nos pontos de controle, assim como por fazer intervenções pontuais que julguem necessárias caso uma anomalia seja identificada. Essas intervenções devem ser evitadas quando possível, pois podem desacreditar o projeto, causando desconfiança entre os alunos.

Na fase final do projeto, eles farão parte da banca examinadora. Cabe a eles não só dar sua avaliação quanto ao desenvolvimento de cada competência de cada aluno, como também quanto à adequação daquele projeto sugerindo, se julgarem pertinente, mudanças para o novo ciclo.

Esta equipe deverá mudar alguns membros a cada ciclo, incorporando novas ideias, mudando algumas escolhas, evitando vícios, mas garantindo ao mesmo tempo o domínio e a fluidez dos trabalhos através dos remanescentes.

Tutor - tem papel de suma importância no desenvolvimento de um projeto em PBL. Ele deve ser um docente que conheça os temas abordados pelo projeto. Não é necessário que seja um especialista em cada tema, mas o bom domínio dos temas abordados dará uma visão global melhor para que ele possa então bem orientar os estudantes, evitando assim que as discussões saiam do foco. Neste ponto o material desenvolvido pela equipe coordenadora poderá auxiliá-lo no domínio de todos os temas abordados, assim como de todos os objetivos de aprendizagem.

Há uma grande tentação, quando o tutor é especialista em um dos assuntos, de ensinar o que deve ser aprendido. Isso deve ser evitado, pois desestimula a busca pelo conhecimento e atrapalha no desenvolvimento do projeto. O trabalho do tutor deve ser bem desempenhado para que o caminho seja produtivo. Assim, é função dele apresentar-se à turma e fazer com que se apresentem entre si, colocar o tema de forma clara, conferir as presenças – evitando assim conflitos de grupo quanto à assiduidade, e acompanhar de perto as discussões. Deve ficar claro que seu papel não está em dar a resposta certa, mas sim em garantir que as conversas sejam focadas no tema e que tenham sempre como base o projeto proposto como foi colocado pela equipe de coordenação.

Ele deverá lançar mão do conhecimento que tem sobre os temas a serem abordados, mas principalmente sobre os objetivos de aprendizagem pretendidos. Assim, de forma contínua, ele é o melhor observador para dizer quais objetivos estão sendo alcançados e se tem alguma orientação que possa dar para corrigir o rumo caso necessário, para que todos os requisitos sejam cumpridos.

Demais docentes - além dos docentes que compõem a equipe coordenadora, outros docentes poderão ter papel importante em um dado projeto. Eles podem ministrar minicursos e palestras ou organizar seminários que envolvam temas do projeto, podem estar disponíveis como especialistas para dar orientações (não aulas particulares) sobre algum ponto específico e poderão ser convocados, de acordo com sua especialidade, para serem avaliadores tanto do relatório final de projeto quanto na apresentação do projeto ou produto.

Coordenador - será responsável por dirigir a discussão para que todos participem de forma ordenada e agregadora. Cabe a ele fazer a leitura do

material entregue pelo tutor, identificando junto ao grupo possíveis dúvidas quanto a termos e conceitos.

Secretário - será responsável por anotar o que está sendo discutido de forma a tentar direcionar a discussão para que não regresse a pontos já abordados e que siga um caminho claro. Ao final do encontro ele deverá fazer uma ata desta reunião, onde deverá constar, após consenso do grupo, quais os próximos passos, incluindo o que deverá ser tema de estudo individual.

Demais integrantes da equipe - deverão participar ativamente, colocando esforços para que progridam com o assunto de forma metódica e ordenada, evitando perder o foco dos temas a serem abordados e seguindo as orientações dadas pelo coordenador. Ao final da seção tutorial, todos (incluindo coordenador e secretário) sairão de lá com tarefas a serem cumpridas que deverão ser apresentadas na próxima seção. Estas tarefas deverão constar em ata (feita pelo secretário) e verificadas na próxima seção pelo novo coordenador.

4.2.7.8. Avaliação dos alunos

A avaliação dos alunos no PBL pode ser encarada como um desafio, pois vários níveis deverão ser medidos. No método tradicional o aluno é avaliado sobre o quanto ele é capaz de repetir ou reproduzir aquela metodologia de solução apresentada em sala de aula. Já no PBL não há uma solução apresentada, mas sim competências a serem desenvolvidas.

Caso sejam conhecimentos, estes facilmente poderão ser medidos através de provas, mas preferencialmente, para condizer com a metodologia PBL, deverão ser identificados nos relatórios individuais que os alunos entregam ao final de cada projeto. Nestes relatórios também será possível identificar, através de uma análise de forma, o desenvolvimento de algumas habilidades (como expressão escrita) e atitudes (como organização). Esta avaliação poderá ser feita pelo tutor, mas merece passar pelo crivo da equipe coordenadora, pois através de sua análise os seus componentes poderão avaliar não só a progressão do aluno, como a adequação do projeto e a orientação do tutor.

Outras habilidades ou atitudes podem ser identificadas e mensuradas pelo tutor durante as seções tutoriais. Assim, deverá constar, no material desenvolvido pela equipe coordenadora para o tutor, quais as competências a serem acompanhadas dando destaque àquelas que serão medidas exclusivamente por ele.

Por fim, tanto através do relatório do grupo quanto na apresentação final, será possível fazer uma avaliação de habilidades e atitudes interpessoais, como trabalho em equipe, liderança e gerenciamento de projeto.

4.2.7.9. Avaliação dos projetos

A avaliação dos projetos far-se-á através do uso de quatro ferramentas: a medição dos indicadores (pré-estabelecidos quando do desenvolvimento do currículo), a análise do relatório do tutor, que deverá ser entregue na fase final do projeto, a análise dos relatórios individuais, mas principalmente de grupo, e a apresentação final do projeto ou produto.

É importante que todas as ferramentas tenham peso nesta avaliação, para que se pondere seus resultados, considerando criticamente os demais. Se por exemplo os indicadores mostrarem que não houve o desenvolvimento como esperado, mas a apresentação final e os relatórios tanto do tutor como dos alunos mostrarem claramente o satisfatório desenvolvimento das competências, pode ser necessário questionar estes indicadores e refazê-los, para que sirvam no futuro para auxiliar melhor no acompanhamento dos trabalhos.

Caso o relatório do tutor esteja dissonante com as outras três medidas, poderá ser necessário um treinamento mais aprofundado de suas habilidades, ou talvez maior esclarecimento dos objetivos do projeto em pauta.

Um dos grandes indicadores de que o projeto é demasiadamente ambicioso é o caso em que se pode enxergar uma grande evolução dos alunos (tanto nos relatórios individuais como do tutor), mas o relatório de grupo e principalmente a apresentação do projeto ou produto ficam bastante prejudicadas na maioria dos grupos. Mais uma vez, a análise da dissonância ajuda a perceber que uma revisão no projeto é necessária.

4.2.8. Premissas para sua adoção

Na literatura disponível encontra-se com frequência citações referentes a desafios enfrentados e a caminhos árduos que foram traçados para a implementação da metodologia. Alguns trabalhos também falam do insucesso da adoção do método. Na tentativa de entender as diferentes condições que levaram alguns a completarem com mais ou menos facilidade, enquanto outros desistiram, KOLMOS (2010) escreve um artigo, onde cita sete condições para

que a mudança seja alcançada de forma satisfatória. Um dos intuitos deste trabalho da presidente da cadeira na UNESCO para o PBL foi de direcionar aqueles que acreditam na mudança para construírem um cenário favorável, evitando o fracasso (ou até mesmo evitando a própria tentativa, caso a conjuntura seja desfavorável) e com isso acelerando o processo de mudança que em seu ponto de vista é lento atualmente. São premissas, ditas no texto, para que a mudança seja alcançada:

1 - Governança e política educacional – característica vista como a mais importante das sete, pois mesmo que a tendência mundial seja positiva e aponte para aprendizagem centrada no aluno (tomando com exemplo o processo de Bolonha), ainda assim a autonomia das instituições é essencial para que se alcance um resultado adequado às particularidades do seu contexto, dando a ela então o poder de decidir sobre todos os elementos de currículo, como métodos pedagógicos, seleção de conteúdos e avaliação.

2 – Pesquisa Educacional e pragmatismo político – mesmo que a mudança venha como resultado de um pragmatismo político, para se ter o apoio dos agentes envolvidos é necessário se basear em pesquisas educacionais e apresentar tanto os resultados positivos (para apoiar a decisão de mudança) quanto os negativos (para tentar evitar ou contornar). Quanto às demandas políticas, são listadas:

- “a. novas demandas para resultados de aprendizagem,*
- b. criação de um perfil mais moderno de universidade que possa atrair os estudantes,*
- c. recursos reduzidos,*
- d. questões de gestão e de financiamento, como a possibilidade de que PBL possa diminuir as taxas de abandono e melhorar a porcentagem de estudantes que concluem seus estudos em tempo hábil,*
- e. melhoria da qualidade de aprendizagem para os alunos.”²⁰*

²⁰Tradução livre para: *“a. new demands for learning outcomes,*
b. creation of a more modern university profile that might attract students,
c. decreased resources,
d. management and funding issues such as the possibility that PBL might decrease dropout rates and improve the percentage of students who finish their study on time,
e. improvement of the quality of learning for students.”(pág. 3)

3 - Mudança tanto em nível de sistema quanto em nível individual – A mudança deve ser motivada nos dois níveis ao mesmo tempo, contando com um envolvimento tanto da gestão ao sustentar uma mudança institucional, quanto dos professores, sustentando as mudanças em sala de aula. Se a mudança vem somente de baixo para cima, ela perde força e qualquer mudança na equipe de professores pode colocar tudo a perder. Se ela acontece de cima para baixo, ganha resistência junto aos docentes. Ao acontecer simultaneamente, as estratégias se complementam e conseguem vencer mais facilmente possíveis opositores nos dois setores (docentes e gestão).

4 - Motivação, Liderança e Visões – mudar a forma de ensinar quando um professor já se sente confortável com o método que adota há anos é bem difícil, principalmente quando ele não enxerga as dificuldades e a urgência que são claras para o corpo de gestão, como a falta de alunos ou a diminuição do financiamento público. A motivação pode vir quando a instituição estabelece um processo onde os docentes são levados a analisar as vantagens e desvantagens de suas práticas, comparando-as com novas práticas educativas. O envolvimento do corpo de professores e funcionários na formulação da visão de futuro da instituição é um fator chave para a motivação, pois faz com que eles se sintam autores e se tornem agentes da mudança.

5 - Estratégia de Implementação – Se o longo prazo deve ser planejado, são ações de curto prazo que são responsáveis pelo desenrolar das mudanças. Se a mudança é iniciada de baixo para cima, é necessário buscar por agentes de mudança na gestão da instituição. Se no entanto as mudanças são de cima para baixo, é necessário buscar por agentes de mudanças entre os professores. Outro agente importante de mudança está no setor de desenvolvimento do corpo docente, pois o treinamento é muito importante e também porque este segmento tem conhecimento amplo do sistema, assim como de novas práticas.

6 - Confiança no aprendizado dos alunos e nova seleção de conteúdo – uma das mudanças mais difíceis para os professores está na redução do tempo de suas aulas expositivas. Com isso eles são levados a selecionar novamente o conteúdo que darão e a ligá-lo aos resultados de aprendizagem que pretendem provocar nos estudantes. Este processo não é simples e deve ser apoiado por formação adequada.

A mudança da postura do docente é alcançada quando este começa a confiar na capacidade do aluno aprender por si só e também na metodologia de

aprendizagem aplicada. Somente após esta tomada de confiança o docente conseguirá enxergar o processo de aprendizagem equivalente a um de pesquisa e assim ser um facilitador, alguém que apresenta possibilidades.

7 - Comunidades regionais e globais como referências – Apesar das particularidades regionais bem distintas, com o desenvolvimento do PBL por todas as partes do globo, a formação de uma rede global e de comunidades regionais apresenta uma oportunidade de troca de experiências, que dá possibilidades de reflexão das próprias práticas, ajudando o desenvolvimento e o progresso não só do método e da área, como também de cada componente desta rede. Como a autora diz: *“Há muitas restrições para atingir um processo de mudança bem-sucedido, mas as estratégias para evitar obstáculos são usar os argumentos globais e focar em possibilidades.”*²¹

4.3. Currículo em Espiral

Apesar de se tratar de um método de organização curricular e não de um método de aprendizagem, como ele pressupõe uma participação mais ativa do aluno, cabe citá-lo neste capítulo, pois será utilizado no momento do projeto curricular para a proposta de implantação do PBL no ensino de engenharia que será apresentada no capítulo 6.

4.3.1. Breve histórico

Na década de 60 do século passado, Jerome Bruner propôs uma nova perspectiva de abordagem do currículo como veículo para o desenvolvimento do aluno, focando em aprendizagem e construção de significado, onde alunos de qualquer período poderiam ser verdadeiramente engajados na solução dos problemas centrais de quaisquer disciplinas desde que suas questões principais pudessem ser representadas de forma a convidar à experimentação e análise ao nível apropriado.

²¹Tradução livre para: *“There are many constrains in achieving a successful change process but the strategies to avoid obstacles are to use the global arguments and to focus on possibilities.”* (pág. 5)

4.3.2. Descrição e diretrizes

A chave desta ideia está em desenhar o currículo de tal forma que essas questões centrais sejam retomadas em níveis cada vez mais elaborados na medida em que o aluno avança em seu conhecimento e capacidade intelectual. Assim, o estudante passa a desenvolver um pensamento mais próximo à sua futura profissão, visto que aprende e participa de investigações de complexidade crescente, detalhadamente organizadas em torno de um tema central de escolha, e com isso absorve o conhecimento de forma mais natural e desenvolve características importantes para a resolução de problemas reais.

Para facilitar o desenvolvimento de um currículo em espiral, LOHANI e AKEN (2012) apresentam um procedimento que pode ser resumido nos sete passos a seguir:

1 - Identificação das proficiências que este profissional deve possuir, como desenvolver o projeto de um reator, desenhar uma planta, controlar o processo;

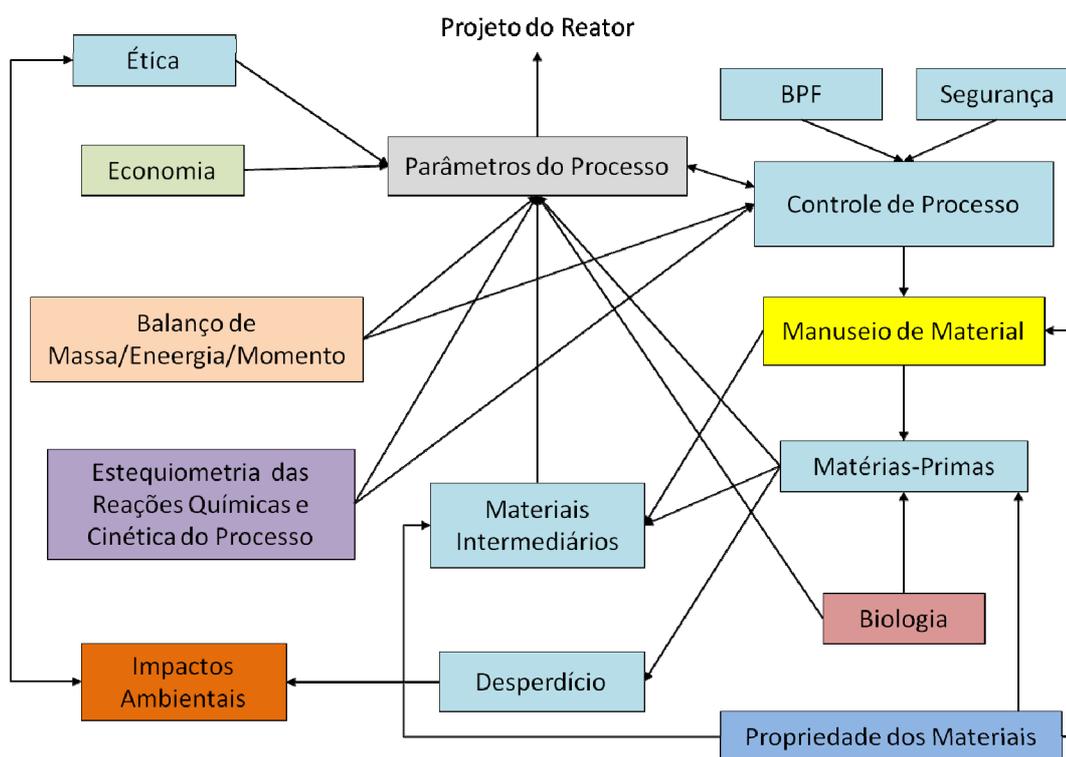


Figura 4.1 – Mapa conceitual para projetos de reatores - Fonte: Elaborada pelo autor

2 - Desenho do mapa conceitual para a obtenção das habilidades citadas no item anterior, como na Fig. 4.1 (baseada na apresentação de LOHANI e AKEN - 2012);

3 - Identificar o conhecimento necessário para a habilidade pretendida, colocando-o em diferentes níveis de aprofundamento. Na Figura 4.2 (baseada na apresentação de LOHANI e AKEN - 2012), encontram-se três níveis de aprofundamento de dois conhecimentos (mecânico e térmico) que se deve ter para poder operar uma unidade de bioprocessamento;

Operação de Unidade

<ul style="list-style-type: none"> •Mecânica: redução de tamanho, filtração, centrifugação, agitação •Térmica: destilação, secagem 	II
<ul style="list-style-type: none"> •Mecânica: redução de tamanho, peneiramento, filtração, centrifugação, ciclone, triagem •Térmica: destilação, secagem, fluidificação, esterilização, pasteurização, trocadores de calor, resfriamento rápido 	III
<ul style="list-style-type: none"> •Mecânica: ciclone, triagem •Térmica: fluidificação, esterilização, pasteurização, congelamento, resfriamento, trocadores de calor, criogenia, resfriamento rápido 	IV

Figura 4.2 – Níveis de aprofundamento da unidade de bioprocessamento - Fonte: Elaborada pelo autor

4 - Desenvolver objetivos de aprendizagem para cada nível de conhecimento. Para níveis iniciais eles podem ser, por exemplo, conseguir identificar e descrever os parâmetros que influem no processo, fazer o balanço de massa e entender alguns princípios básicos da engenharia de bioprocessamento. Já em níveis mais avançados os objetivos podem ser entender os princípios e aplicações de diversas operações de unidades de bioprocessamento, analisar a economicidade das operações, e até mesmo projetar um processo completo ou otimizar condições de processos;

5 - Desenvolver módulo de aprendizagem contendo problema, projetos e/ou atividades que facilitem os estudantes a alcançarem os objetivos;

6 - Incorporar estes módulos em disciplinas já existentes;

7 - Desenvolver novas disciplinas de forma a acomodar os módulos de aprendizagem restantes.

A Figura 4.3 apresenta um esquema resumido do Currículo em Espiral aplicado na Faculdade de Engenharia Mecânica da Virginia Tech (baseada na apresentação de LOHANI e AKEN - 2012).



Figura 4.3 – Currículo em Espiral da Faculdade de Engenharia Mecânica da Virginia Tech - Fonte: Elaborada pelo autor

A luz dessas considerações sobre os diversos métodos de aprendizagem ativa e sobre diferentes formas de organização curricular analisar-se-ão, no próximo capítulo, os cursos de Engenharia Mecânica e de Controle e Automação, em especial os currículos atuais destes cursos oferecidos na PUC – Rio de Janeiro.

5 Apresentação dos Cursos das Engenharias Mecânica e de Controle e Automação da PUC-Rio

Neste capítulo serão analisados os Projetos Pedagógicos de Curso (PPC) dos cursos de Engenharia Mecânica e de Controle e Automação da PUC-Rio, no intuito de mapear todos os conhecimentos, habilidades e atitudes que tais currículos pretendem abordar.

Em seguida serão apresentados os currículos de cada habilitação - visando discutir as soluções educacionais atualmente adotadas - assim como uma avaliação da aderência das disciplinas desses currículos à prática.

Através de tais análises será possível determinar quais as competências que faltam no currículo, quando comparadas àquelas do engenheiro do futuro - introduzidas no primeiro e abordadas novamente no quarto capítulo deste trabalho. Será então discutido como estas competências podem ser abordadas em projetos que envolvam a dinâmica e controle de bicicletas e motocicletas, de forma a não inchar as cargas horárias dos cursos.

Também serão brevemente discutidos os percursos curriculares existentes e sua estruturação, avaliando o papel desempenhado pelo ciclo básico e as consequências da inserção de novas disciplinas. Para finalizar apresentar-se-á uma síntese comparativa com o intuito de mostrar como o tema da bicicleta pode ser utilizado para abordar, para além das competências acima aludidas, boa parte das disciplinas dos currículos de Engenharia Mecânica e de Controle e Automação.

5.1. Linhas Gerais dos Projetos Pedagógicos dos Cursos (PPC)

As versões aqui analisadas datam de novembro de 2009, que são as últimas divulgadas pela Instituição de Ensino em questão até o momento da publicação deste trabalho. Revisões periódicas são aconselhadas e o intervalo destas não deveria ser maior do que dois anos. Estas versões estão já com quase sete anos e portanto uma atualização mais minuciosa destes documentos

poderá ser bastante benéfica, adequando-os aos anseios dos três interessados, diversas vezes já citados neste trabalho: estudante, indústria e sociedade.

Um projeto pedagógico de curso deve conter questões de médio e longo prazo. Questões de curto prazo deverão ser evitadas para que esta parte do documento não perca rapidamente sua razão de existir, mas poderão ser colocadas caso haja necessidade de correção de curso. Neste caso, aconselha-se uma revisão deste projeto assim que esta adversidade seja superada.

Valores de médio e longo prazo podem ser identificados nos PPC das duas engenharias analisadas e estão bastante alinhados à formação do engenheiro do futuro, com uma visão global e crítica de sua atuação. Já na segunda página do documento da Engenharia Mecânica há uma clara alusão ao que é requerido na diretriz curricular vigente, a Resolução CNE/CES nº 11, de 11 de março de 2002, quando diz que tem como objetivo “estimular o desenvolvimento de uma atitude crítica e humanística frente a questões profissionais, éticas e sociais, em atendimento às demandas da sociedade”.

Além disso, a lista de competências a seguir é uma reprodução da que pode ser encontrada na terceira página desse documento e está bastante em sintonia com o que se espera desse profissional no futuro:

- “- capaz de gerir seu próprio fluxo de informações: auto-reciclável, aprendeu a aprender;*
- capaz de criar, projetar e gerir intervenções tecnológicas: um solucionador de problemas de base tecnológica;*
- empreendedor: constrói seu futuro, procura seu nicho de trabalho, convive com o risco, enfrenta desafios;*
- capaz de trabalhar em equipes multidisciplinares, possuindo larga base científica e capacidade de comunicação;*
- capaz de avaliar os impactos sociais e ambientais de suas intervenções, reagindo eticamente.”*

Exemplos desses valores podem ser encontrados na página dois do PPC da Engenharia de Controle e Automação onde consta que “a universidade deve cultivar sua raiz não local e atemporal, que a mantém como a grande fonte geradora de cultura e questionamentos da sociedade”, ao mesmo tempo em que “a universidade deve desenvolver sua raiz local e atual, que a torna o grande fórum de discussão e busca de solução dos problemas...”.

Ênfase deve ser dada à escolha cuidadosa entre os verbos utilizados: cultivar e desenvolver. Fica evidente que na época de concepção do documento

esta instituição reconheceu que além de manter (cultivar) seu carácter como agente cultural importante, também era importante criar (desenvolver) uma atitude de ator frente aos problemas atuais que se encontravam fora de seu domínio, fora de seus muros.

Conclui-se então que há uma grande coerência nos objetivos dos PPC quando comparados aos requisitos expostos na resolução governamental citada, assim como em relação aos anseios das partes interessadas para a atualização do perfil do profissional. Cabe ainda analisar se os currículos adotados nesses documentos são suficientes para o alcance satisfatório de suas propostas e mesmo se as metodologias de ensino possibilitarão desenvolver algumas destas competências que, por terem carácter menos técnico, são de difícil explanação teórica, como por exemplo uma atitude de busca constante de reciclagem do conhecimento.

5.2. Descrição Sucinta do Percurso Acadêmico

Neste item serão apresentados os grandes grupos de disciplinas das engenharias Mecânica e de Controle e Automação, com uma breve descrição visando a comparação de metodologia e carga de tempo investida. Além disso, pretende-se também dar conta da questão citada no parágrafo anterior quanto ao desempenho dos currículos e das metodologias de ensino atuais no sentido de desenvolver as competências de carácter menos técnico. Os grupos serão divididos em ciclo básico, ciclo profissional comum a estas duas engenharias e ciclo profissional específico de cada uma delas.

5.2.1. Ciclo básico

Como descrito nos PPC dos cursos analisados, este ciclo é comum a todas as engenharias e tem por objetivo uma formação científica, com práticas laboratoriais, assim como formação humanística e uma introdução a projetos de engenharia.

A maioria das disciplinas está concentrada nos três primeiros períodos letivos, mas algumas podem se estender aos quarto ou quinto períodos. Desta forma esta universidade pretende permitir que o estudante escolha qual carreira seguir somente após o término do terceiro período, quando já teve oportunidade para melhor conhecer suas diferentes áreas de atuação.

A Tabela 5.1 lista todas as disciplinas deste grupo. Na periodização mostrada na tabela, a primeira coluna é relativa à Engenharia de Controle e Automação (ECA), enquanto a segunda coluna é da Engenharia Mecânica (EM). Esta visão será importante para a análise do momento no qual o aluno deve fazer a escolha de qual engenharia deseja cursar. Com isso será possível comparar a carga horária entre as disciplinas do ciclo básico, aquelas em comum e aquelas específicas em cada período.

Nesta tabela quatro pares de disciplinas, que estão realçadas em cinza, são complementares dentro de um mesmo par, onde para cada quatro a seis horas (caso isolado da disciplina Mecânica Newtoniana) de aula expositiva por semana, estão previstas duas horas de prática em laboratório, no intuito de fixar o conhecimento exposto teoricamente com experimentos bem definidos.

Período		Disciplina	Metodologia	Carga horária (horas totais)
ECA	EM			
1	1	Introdução à Engenharia	Projetos	60
1	1	Mecânica Newtoniana	Expositiva	90
1	1	Laboratório de Mecânica Newtoniana	Laboratório	30
1	1	Cálculo de uma Variável	Expositiva	120
1	1	Álgebra Linear I	Expositiva	60
1	1	Laboratório de Química Geral	Laboratório	30
1	1	Química Geral	Expositiva	60
2	2	O Humano e o Fenômeno Religioso	Expositiva	60
2	2	Fluidos e Termodinâmica	Expositiva	60
2	2	Laboratório de Fluidos e Termodinâmica	Laboratório	30
2	2	Programação I	Laboratório	60
2	2	Cálculo a Várias Variáveis I	Expositiva	90
3	2	Desenho Técnico I	Laboratório	30
3	3	Eletromagnetismo	Expositiva	60

Tabela 5.1 – Disciplinas do ciclo básico, suas metodologias e cargas horárias - Fonte: Elaborada pelo autor

Período		Disciplina	Metodologia	Carga horária (horas totais)
ECA	EM			
3	3	Laboratório de Eletromagnetismo	Laboratório	30
3	3	Programação II	Laboratório	60
3	4	Ciência e Tecnologia dos Materiais	Expositiva	30
3	4	Equações Diferenciais e de Diferenças	Expositiva	60
5	3	Optativas de Cristianismo	Expositiva	60

Tabela 5.1 – Disciplinas do ciclo básico, suas metodologias e cargas horárias (continuação) - Fonte: Elaborada pelo autor

É de ressaltar o fato que estas aulas de laboratório propiciam um melhor entendimento dos conceitos físicos citados nas aulas expositivas, mas não preparam o futuro profissional para a construção de experimentos que visem testar suas conjecturas, pois não o coloca como autor na fase de desenvolvimento dos mesmos, mas sim como mero reproduzidor de um passo a passo previamente roteirizado.

Além destas aulas de laboratório, as disciplinas Desenho Técnico I, Programação I e Programação II também dispõem de laboratórios, mas os formatos e objetivos são outros. Estes são laboratórios de computação, onde os alunos trabalham para desenvolver suas aptidões com os softwares requeridos muito mais do que com o conhecimento teórico. O intuito não é o de comprovar uma teoria adquirida anteriormente em uma aula expositiva e sim o de adquirir desenvoltura naquele tipo de linguagem ou forma de representação.

Durante estes três primeiros períodos os alunos são expostos a somente 60 horas de projeto de engenharia (na disciplina de Introdução à Engenharia). A ênfase dada a projetos é umas das menores do currículo, só ultrapassando em tempo a carga dada às disciplinas de Ciência e Tecnologia dos Materiais e Desenho Técnico I, ambas com 30 horas. Ainda assim, a carga horária do Desenho Técnico I, quando somada à do Desenho Técnico II (que será apresentado no currículo em comum na Tab. 5.2), se igualará à de projeto de engenharia. Como base de comparação tem-se uma ênfase de 90 horas para química, 120 horas para formação humanística (através de disciplinas teológicas), 120 horas em programação, 300 horas em física e 330 horas de matemática.

Cabe lembrar que através de disciplinas de projeto de engenharia o conhecimento abordado não está somente estrito ao gerenciamento de um projeto. Diferentemente das disciplinas expositivas citadas, durante o desenvolvimento de um projeto há a oportunidade, senão necessidade, de se perpassar por diversas áreas do conhecimento. Assim, dependendo do projeto se adquire e se aprofunda o conhecimento em física, matemática, química, programação, desenho técnico e outras áreas mais, contribuindo também para uma formação humanística e para uma atitude profissional perante os outros membros do grupo e da banca avaliadora.

5.2.2. Ciclo profissional comum

A proximidade entre os dois cursos é grande, o que torna o currículo profissional em comum bem vasto, facilitando com isso que os dois públicos estejam juntos em diversos momentos. Esta característica poderá e deverá ser explorada quando os grupos forem formados para o desenvolvimento dos projetos em PBL, permitindo que trabalhem juntos nos diversos campos que ambos dominam e que se complementem naqueles campos em que se diferenciam.

As disciplinas desta fase podem ser divididas em campos teórico ou científico (Álgebra Linear II, Estática, Cálculo a Várias Variáveis II, Probabilidade e Estatística, Dinâmica de Corpos Rígidos, Modelagem de Sistemas Dinâmicos) e tecnológico (Desenho Técnico II, Instrumentação Eletrônica, Automação da Manufatura). Observa-se aqui ainda uma ênfase pequena, menos de um terço da carga em horas deste grupo, no conhecimento tecnológico.

Entende-se por pertencente ao campo teórico a disciplina que, no caso das faculdades de engenharia, tem carácter propedêutico, ou seja, aquela disciplina que, apesar de ter conteúdo indispensável para a formação teórica, é como uma fase preparatória para que o entendimento das disciplinas seguintes seja possível. Como exemplos podem ser tomadas as cadeiras de Física e Cálculo.

O campo científico trata das disciplinas que, apesar de já serem aplicadas, são de carácter mais acadêmico ou de pesquisa e têm pouca ou nenhuma aplicação direta no campo profissional de um engenheiro, exceto pela pequena parte de formandos que se dedicará às áreas de P&D. Um exemplo é a disciplina Modelagem de Sistemas Dinâmicos.

Finalmente diz-se de disciplinas tecnológicas aquelas que têm como característica sua aplicação direta no dia-a-dia de um engenheiro, fazendo parte de um ferramental que o diferencia dos demais profissionais, e.g. a cadeira de Instrumentação Eletrônica ou de Automação da Manufatura.

Além das disciplinas coincidentes pela proximidade dos cursos analisados e divididas nos dois grupos citados acima (o primeiro englobando os campos teórico e científico e o segundo, o tecnológico), há também aquelas (realçadas em cinza na Tab. 5.2) que poderiam fazer parte do ciclo básico, mas por motivos administrativos ou logísticos foram alocadas neste ciclo. Estas disciplinas estão voltadas para uma formação integral dos estudantes, com ênfase em conhecimentos humanísticos e valores éticos. Elas são em geral comuns a todas as engenharias, com pequenas mudanças pontuais como, por exemplo, a disciplina jurídica para a Engenharia Ambiental que é “Direito Ambiental” no lugar de “Legislação Social”, dada para as engenharias aqui analisadas.

Período		Disciplina	Metodologia	Carga horária (horas totais)
ECA	EM			
2	2	Álgebra Linear II	Exp/Lab	45
4	3	Desenho Técnico II	Laboratório	30
4	3	Estática	Expositiva	60
4	3	Cálculo a Várias Variáveis II	Expositiva	60
4	5	Probabilidade e Estatística	Expositiva	60
5	5	Dinâmica de Corpos Rígidos	Expositiva	60
5	7	Introdução à Engenharia Ambiental	Expositiva	30
5	9	Legislação Social	Expositiva	30
6	3	Optativas de Filosofia	Expositiva	60
6	4	Ética Cristã	Expositiva	30
6	6	Instrumentação Eletrônica	Laboratório	60
7	5	Ética Profissional para Engenharia	Expositiva	30

Tabela 5.2 – Disciplinas do ciclo profissional comum, suas metodologias e cargas horárias - Fonte: Elaborada pelo autor

Período		Disciplina	Metodologia	Carga horária (horas totais)
ECA	EM			
7	7	Modelagem de Sistemas Dinâmicos	Expositiva	60
7	9	Automação da Manufatura	Exp/Lab	60
8	9	Administração para Engenheiros	Expositiva	30
8	9	Introdução à Economia para Engenheiros	Expositiva	60

Tabela 5.2 – Disciplinas do ciclo profissional comum, suas metodologias e cargas horárias (continuação) - Fonte: Elaborada pelo autor

Dentre elas, a “Ética Cristã” e a “Ética Profissional”, fazem junto com a “O Humano e o Fenômeno Religioso” (ciclo básico) um circuito de valores éticos, sendo que a última é pré-requisito para a primeira, que por sua vez é pré-requisito para a segunda. Elas são dadas de forma expositiva e podem ser bastante proveitosas, caso exemplos reais sejam abordados e discutidos.

Ainda no quesito da formação mais global encontram-se “Administração para Engenheiros” e “Introdução à Economia para Engenheiros”, no intuito de dar uma base, mesmo que bastante limitada, de administração de empresas e de microeconomia, respectivamente, e assim equipar os egressos o suficiente para que consigam dialogar com os gestores de empresas. O pouco aprofundamento alcançado pela carga horária restrita não os prepara satisfatoriamente para assumir cargos de administração e muitos que almejam seguir esta carreira se veem forçados a fazer um MBA ou formação complementar parecida.

Por último há as “Optativas de Filosofia”, com uma grande gama de opções, nas quais o intuito principal é “inquietar” o espírito crítico e reflexivo do aluno, a “Introdução à Engenharia Ambiental” que tem por objetivo suscitar a problemática ambiental e a consciência de seu impacto no trabalho do engenheiro e “Legislação Social”, que dá uma noção de direito do trabalho, preparando o egresso tanto para saber quais os seus direitos, como também para saber respeitar o direito de seus subordinados.

Novamente aqui cabe uma ressalva. Apesar da grande utilidade de uma noção de direito do trabalho para a profissão, deixa-se de fora, na única disciplina de direito no curso, partes essenciais do direito no que concerne o trabalho do engenheiro, como o direito de patente ou o direito ambiental. Com um currículo já bastante inchado, a solução proposta não seria de aumentar a

carga horária da atual disciplina, mas sim tratar destes temas (e outros deste grupo de disciplinas de formação integral) dentro de projetos, já que estes deverão estar ligados às realidades da profissão e da sociedade.

Das disciplinas apresentadas na Tab. 5.2, somente a Álgebra Linear II é dada no segundo período. Na Engenharia Mecânica, o currículo aconselhado compreende, além desta, outras três disciplinas ainda nos três primeiros períodos. Na Engenharia de Controle e Automação, esta é a única disciplina ainda dentro dos períodos compreendidos majoritariamente pelo ciclo básico.

Isso poderia falsamente levar a concluir que o aluno que focar seus esforços somente nas disciplinas do ciclo básico, deixando a opção de qual engenharia escolher para o final de seu terceiro semestre, caso opte por Controle e Automação, ficará “devendo” somente esta disciplina e não terá sua formação prejudicada de forma significativa. No entanto, nas disciplinas específicas que serão apresentadas a seguir, esta impressão será superada.

5.2.3. Ciclo profissional específico

As Tabelas 5.3 e 5.4 apresentam os ciclos profissionais específicos das Engenharia Mecânica e Engenharia de Controle e Automação, respectivamente. Além dos pares de aula expositiva teórica com sua respectiva aula de laboratório que foram realçados em cinza claro, um grupo de disciplinas que não tem ementa claramente definida foi realçado com cinza escuro, seja porque são na verdade agrupamentos de possíveis disciplinas (como eletivas ou optativas), seja porque são de natureza menos delineada (projeto de graduação, atividade complementar ou estágio supervisionado).

Tendo em vista a análise feita no ciclo profissional em comum às duas engenharias quanto à carga horária dedicada às disciplinas teóricas, científicas ou tecnológicas (citadas no segundo parágrafo de 5.2.2), e complementando-a com a comparação das disciplinas de cada um dos seus ciclos profissionais específicos, ficam evidentes conhecimentos técnicos de base bastante similar, que se diferenciam, no entanto, quanto ao aprofundamento e versatilidade. Enquanto a Engenharia Mecânica trata mais minuciosamente do campo de conhecimento que a tange, a Engenharia de Controle e Automação, por sua natureza multidisciplinar, abrange mais áreas tendo para tal que abdicar da profundidade com que as apresenta.

São exemplos da diferença de aprofundamento as disciplinas de Mecânica dos Sólidos I e II, Mecânica dos Fluidos I e II, Termodinâmica para Engenharia

Mecânica e Transmissão de Calor totalizando 360 horas no curso de Engenharia Mecânica, enquanto no curso de Controle e Automação teor similar é dado nas disciplinas de Introdução à Mecânica dos Sólidos e de Fenômenos de Transporte I e II, totalizando somente 90 horas.

São exemplos da multidisciplinaridade do curso de Engenharia de Controle e Automação, além de disciplinas em comum com a Engenharia Mecânica, aquelas em comum com a Engenharia Elétrica como Sinais e Sistemas, Circuitos Elétricos e Eletrônicos e Técnicas Digitais (dentro do quadro de optativas de sistemas digitais); as em comum com a Engenharia da Computação como Inteligência Computacional Aplicada e Microcontroladores e Sistemas Embarcados; além das disciplinas Integradora Básica I e II onde, como escrito na ementa da segunda, são “tratados tópicos de mecânica, eletroeletrônica e computação aplicados à engenharia de controle e automação”.

Ao se analisar as disciplinas apresentadas na Tab. 5.3 e na Tab. 5.4, verifica-se que outra diferenciação importante entre os dois currículos nesta fase se dá quanto ao conhecimento aplicado, o que fica evidente ao se retomar novamente a divisão entre disciplinas teóricas, científicas e tecnológicas.

Engenharia Mecânica			
Período	Disciplina	Metodologia	Carga horária (horas totais)
4	Termodinâmica para Engenharia Mecânica	Expositiva	60
4	Desenho Mecânico	Laboratório	60
4	Mecânica dos Sólidos I	Expositiva	60
4	Física Moderna	Expositiva	60
4	Laboratório de Física Moderna	Laboratório	30
5	Materiais de Engenharia	Expositiva	60
5	Eletrotécnica Geral	Expositiva	30
5	Laboratório de Eletrotécnica Geral	Laboratório	15

Tabela 5.3 – Ciclo profissional da Engenharia Mecânica, suas metodologias e cargas horárias - Fonte: Elaborada pelo autor

Engenharia Mecânica			
Período	Disciplina	Metodologia	Carga horária (horas totais)
5	Mecânica dos Fluidos I	Expositiva	75
5	Mecânica dos Sólidos II	Expositiva	60
6	Transmissão de Calor	Expositiva	60
6	Mecânica dos Fluidos II	Expositiva	45
6	Metrologia Dimensional	Expositiva	60
6	Comportamento Mecânico dos Materiais	Expositiva	75
6	Vibrações Mecânicas	Expositiva	60
6	Tecnologia Mecânica	Expositiva	90
7	Métodos Experimentais em Eng. Mecânica	Expositiva	60
7	Métodos Numéricos em Engenharia Mecânica	Expositiva	60
7	Elementos de Máquinas	Expositiva	60
7	Máquinas Térmicas	Expositiva	60
7	Processos de Fabricação	Expositiva	60
8	Eletivas Livres Dentro/Fora Departamento	Variável	150
8	Eletivas Livres Fora do Departamento	Variável	120
9	Controle de Sistemas	Expositiva	60
9	Projeto de Sistemas Mecânicos	Exp/Lab	45
9	Projeto de Sistemas Térmicos	Exp/Lab	45
9	Projeto de Graduação em Engenharia Mecânica	Não aplicável	90
9	Estágio Supervisionado em Eng. Mecânica	Não aplicável	165
20	Atividades Complementares	Variável	150

Tabela 5.3 – Ciclo profissional da Engenharia Mecânica, suas metodologias e cargas horárias (continuação) - Fonte: Elaborada pelo autor

Começando pela Engenharia Mecânica, onde menos da metade da carga, mais precisamente 645 horas (Desenho Mecânico, Materiais de Engenharia, Eletrotécnica Geral, Laboratório de Eletrotécnica Geral, Metrologia Dimensional, Tecnologia Mecânica, Métodos Experimentais em Eng. Mecânica, Elementos de Máquinas, Máquinas Térmicas, Processos de Fabricação, Projeto de Sistemas Mecânicos, Projeto de Sistemas Térmicos), é dedicada ao conhecimento tecnológico, enquanto 705 horas (Termodinâmica para Engenharia, Mecânica dos Sólidos I, Física Moderna, Laboratório de Física Moderna, Mecânica dos Fluidos I, Mecânica dos Sólidos II, Transmissão de Calor, Mecânica dos Fluidos II, Comportamento Mecânico dos Materiais, Vibrações Mecânicas, Métodos Numéricos Engenharia Mecânica e Controle de Sistemas) são aplicadas em conhecimento teórico ou científico.

Passando agora à Engenharia de Controle e Automação, observa-se outra realidade, nota-se que esta dispõe de 525 horas (Integradora Básica I, Integradora Básica II, Sistemas de Atuação, Circuitos Elétricos e Eletrônicos, Laboratório de Circuitos Elétricos e Eletrônicos, Integração da Manufatura, Inteligência Computacional Aplicada, Microcontroladores e Sistemas Embarcados, Projeto Automação Industrial) dedicadas ao conhecimento tecnológico, enquanto 465 horas (Introdução à Mecânica dos Sólidos, Fenômenos de Transporte I, Fenômenos de Transporte II, Sinais e Sistemas, Optativa de Sistemas Digitais, Controle e Servomecanismos, Laboratório de Controle e Servomecanismos e Controle Discreto, Otimização de Projetos) são voltadas para o conhecimento teórico ou científico.

Engenharia de Controle e Automação			
Período	Disciplina	Metodologia	Carga horária (horas totais)
2	Integradora Básica I	Expositiva	60
3	Introdução à Mecânica dos Sólidos	Expositiva	30
3	Fenômenos de Transporte I	Expositiva	30
3	Integradora Básica II	Expositiva	30

Tabela 5.4 – Ciclo profissional da Engenharia de Controle e Automação, suas metodologias e cargas horárias - Fonte: Elaborada pelo autor

Engenharia de Controle e Automação			
Período	Disciplina	Metodologia	Carga horária (horas totais)
4	Fenômenos de Transporte II	Expositiva	30
4	Sinais e Sistemas	Expositiva	60
4	Sistemas de Atuação	Expositiva	60
5	Circuitos Elétricos e Eletrônicos	Expositiva	90
5	Laboratório de Circuitos Elétricos e Eletrônicos	Laboratório	30
5	Integração da Manufatura	Expositiva	60
6	Inteligência Computacional Aplicada	Exp/Lab	60
7	Optativa de Sistemas Digitais	Variável	75
7	Controle e Servomecanismos	Expositiva	90
7	Laboratório de Controle e Servomecanismos	Laboratório	30
8	Microcontroladores e Sistemas Embarcados	Expositiva	60
8	Projeto Automação Industrial	Exp/Lab	75
8	Controle Discreto	Expositiva	60
9	Optimização de Projetos	Expositiva	60
9	Projeto de Graduação em Eng. Contr. Aut.	Não aplicável	90
9	Estágio Supervisionado em Eng. Contr. Aut.	Não aplicável	165
20	Optativas de Sistemas Mecatrônicos	Variável	300
20	Atividades Complementares	Não aplicável	150
20	Eletivas Livres Dentro/Fora Departamento	Variável	210
20	Eletivas Livres Fora do Departamento	Variável	120

Tabela 5.4 – Ciclo profissional da Engenharia de Controle e Automação, suas metodologias e cargas horárias (continuação) - Fonte: Elaborada pelo autor

À quantidade de horas de conhecimento tecnológico da Engenharia de Controle e Automação podem ser incorporadas 300 horas dadas nas optativas de sistemas mecatrônicos, já que o conteúdo destas é em sua grande maioria de cunho aplicado, conforme pode ser verificado na Tab. 5.5. Levando em conta estas optativas, chega-se a uma proporção de quase dois terços de cunho mais profissional, para um pouco mais de um terço com viés acadêmico.

Optativas de Sistemas Mecatrônicos	
Disciplina	Carga horária (horas totais)
Introdução a Sistemas Energia Elétrica	30
Eletromagnetismo I	60
Introdução à Análise Estatística de Dados	30
Instalações Elétricas	30
Conversão Eletromecânica de Energia	30
Laboratório de Conversão Eletromecânica de Energia	30
Modelos Matemáticos para Máquinas Síncronas	60
Acionamentos Elétricos	60
Processamento Digital de Sinais	60
Eletrônica Analógica	60
Laboratório de Eletrônica Analógica	45
Projetos de Eletrônica Analógica	60
Computação Digital	75
Arquitetura de Computadores	60
Eletrônica de Potência	60
Controle Inteligente de Sistemas Robóticos	60
Análise de Séries Temporais	60

Tabela 5.5 – Optativas de Sistemas Mecatrônicos e suas cargas horárias - Fonte: Elaborada pelo autor

Optativas de Sistemas Mecatrônicos	
Disciplina	Carga horária (horas totais)
Modelos de Regressão	60
Engenharia de Áudio	60
Modelagem de Sistemas Robóticos	60
Controle de Sistemas Robóticos	60
Introdução a Sistemas Automotivos	60
Fundamentos de Projetos de Veículos	60
Dinâmica de Veículos	60
Controle Sistemas Automotivos	60
Ensaio em Engenharia Automotiva	60
Software Básico	60
Programação Orientada a Objetos	60
Banco de Dados	60
Introdução à Robótica	45
Controle de Sistemas Robóticos	45

Tabela 5.5 – Optativas de Sistemas Mecatrônicos e suas cargas horárias (continuação) - Fonte: Elaborada pelo autor

O curso de Engenharia de Controle e Automação da instituição de ensino analisada deixa boa parte da formação profissional à escolha do aluno, oferecendo, além de 210 horas para eletivas dentro ou fora do departamento, 300 horas de optativas de sistemas mecatrônicos, que, como pode ser observado na Tab. 5.5, compõem uma lista extensa de disciplinas, que são dadas por diversos departamentos de engenharia e também de informática. Assim o estudante pode, desde que respeitando os pré-requisitos estabelecidos em cada disciplina, moldar um currículo com mais de um décimo da carga personalizada.

Retomando como referência a parte da resolução do Conselho Nacional de Educação citada no quarto capítulo deste trabalho que fala sobre a formação esperada do engenheiro, percebe-se que não foram devidamente tratadas

nesses currículos as seguintes competências: planejar, supervisionar, elaborar e coordenar projetos e serviços de engenharia; comunicar-se eficientemente nas formas escrita, oral e gráfica; atuar em equipes multidisciplinares; compreender e aplicar a ética e responsabilidade profissionais; avaliar o impacto das atividades da engenharia no contexto social e ambiental; assumir a postura de permanente busca de atualização profissional.

Quando muito, algumas delas são abordadas somente como forma de conhecimento, mas sem a preocupação de desenvolvimento da atitude ou da habilidade necessária e adequada. Assim pode-se afirmar com considerável nível de confiança que elas não cumprem com o papel esperado para a formação integral do profissional, sendo somente uma forma de cumprimento das exigências formais.

Já o método PBL, por sua natureza e estruturação, imerge o aluno em contexto de projeto, levando-o a se organizar tal qual fará em sua profissão. Com isso ele desenvolverá, com a supervisão do tutor, competências intrínsecas aos projetos. Novamente resgatando a lista do CNE, estas são: planejar, supervisionar, elaborar e coordenar projetos e serviços de engenharia; atuar em equipes multidisciplinares.

Os principais produtos de cada semestre, ou seja, o relatório e a apresentação serão responsáveis então pelo desenvolvimento paulatino da comunicação eficiente nas formas escrita, oral e gráfica.

Novamente por sua natureza de trabalho, durante um projeto em PBL surgem espontaneamente situações de conflito e de opiniões divergentes em tomadas de decisão, nas quais os discentes são defrontados com questões morais e valorativas. Questões dessa ordem, bem como conflitos e divergências, não devem ser desconsiderados ou vistos como fatos a serem evitados: pelo contrário, nesse contexto os discentes serão estimulados à discussão e por vezes mesmo orientados a encarar consequências de seus atos (serem preteridos em projetos futuros, por exemplo). Com a mediação do tutor, eles desenvolverão o hábito de escutar, reconhecer e respeitar o ponto de vista do outro, alcançando aos poucos atitude ética e responsabilidade profissional.

Cada proposta em PBL, ao ser desenvolvida, deve almejar o progresso de diversos conhecimentos (e também habilidades e atitudes) dos estudantes. Este progresso deve ser alcançado através de atitude de busca do próprio discente. Assim, ao tentar suprir suas lacunas tendo em vista cumprir com os requisitos de cada projeto, os alunos desenvolverão o hábito da busca cognitiva, aprendendo

os melhores meios para fazê-lo, incorporando assim uma postura de permanente busca de atualização profissional.

Por último, a consciência socioambiental, citada nessa resolução como “avaliar o impacto das atividades da engenharia no contexto social e ambiental”, tem oportunidade de ser desenvolvida justamente pela temática escolhida, qual seja a bicicleta. Pode-se ainda discutir, além da diminuição do impacto ambiental evidente da bicicleta como meio de transporte, também formas de democratizá-la ainda mais, tornando-a acessível para a maior parte da população, bem como a utilização de meios de produção e matérias-primas alternativos (e.g. bambu). Além disso, temas relacionados à bicicleta que incluem impacto socioambiental estão ligados à reorganização do espaço urbano, como discutido por ILLICH (1974) de forma contundente.

Aqui se insere o intuito de sinalizar como o ensino por projetos é um método que pode alcançar os objetivos de formação do engenheiro do futuro, tendo sempre como premissa colocar o estudante em posição de destaque, como autor e não como paciente, aspirando com isso uma formação duradoura, completa e interessante do ponto de vista do sujeito, mas também da indústria e da sociedade.

5.3. Estrutura Curricular

O intuito de permitir ao aluno fazer a escolha de qual engenharia cursar após o término do terceiro período na prática não é mais válido sem que ele pague seu devido preço. Como pode ser observado nos ciclos profissionais apresentados (Tab. 5.2, Tab. 5.3 e Tab. 5.4), os dois cursos analisados têm cinco disciplinas cada um (sendo somente a Álgebra Linear II em comum) que não fazem parte do ciclo básico, mas são aconselhadas para os três primeiros períodos. Isso induz ao aluno que faça a escolha prévia de qual carreira seguir já no final do primeiro período, e sua postergação tem como consequência o acúmulo de carga para o ciclo profissional com provável extensão do tempo do curso.

O enxerto excessivo de carga de trabalho no currículo das engenharias é uma das consequências da adequação às necessidades curriculares sem a devida revisão da grade como um todo. Aos poucos foram adicionadas disciplinas que não fazem parte do conhecimento técnico central da formação, mas que são de extrema importância para a atualização do futuro profissional

quanto ao perfil dele esperado. Este processo aumentou a carga dos primeiros períodos e também deslocou algumas disciplinas que eram dadas mais tarde para o início do currículo, dificultando o adiamento da decisão de qual percurso acadêmico seguir para o final do ciclo básico.

Ao se adicionar esta carga ao currículo, sem se preocupar com sua ligação com o tronco central do mesmo, as redundâncias e complementariedades são ignoradas e a carga além de excessiva, fica desordenada e enfadonha, dificultando o entendimento do aluno quanto à pertinência de cada uma das disciplinas dadas à sua formação, tendo como resultado a desmotivação e muitas vezes o abandono do curso.

Uma revisão curricular aprofundada, ou seja, uma análise crítica dos conhecimentos, habilidades e atitudes que se propõem ensinar, possibilita perceber todas as características que podem ser exploradas para montar um currículo otimizado. Este planejamento não deve visar necessariamente a diminuição de carga para o aluno. Ele deverá estar voltado para fomentar o interesse do estudante ao mesmo tempo em que, sendo adequado às exigências dos diversos interessados, deve estar aberto a revisão sem perder de vista sua missão.

Por tratar de assuntos ligados a questões do mundo real, a metodologia de aprendizagem por projetos tem como principais características a promoção do interesse do aluno e abertura a revisões, ao mesmo tempo em que o prepara para a profissão na qual irá se inserir. Quando bem aplicado, este método pode se adequar às expectativas das partes interessadas sem perder o foco da missão da instituição de ensino.

O PBL também possibilita a discussão e análise de conhecimentos de diversas áreas diferentes em um mesmo projeto, utilizando-se de suas complementariedades para que seu aprendizado seja dinâmico e duradouro. Esta ferramenta pode ajudar na diminuição da carga horária que o aluno dedica ao processo formal de aprendizagem.

5.4. Análise Comparativa

As características da bicicleta foram analisadas e seus tópicos ou conceitos foram listados. A partir desta lista, procurou-se correlacionar cada um desses conceitos com as disciplinas onde eles devem ser abordados. Como

resultado dessa análise, elaboraram-se a Tab. 5.6 (componentes), a Tab. 5.7 (características) e a Tab. 5.8 (contexto).

É de se notar que as disciplinas contempladas nestas tabelas constituem a maior parte do currículo de ambas as engenharias. Cabe ressaltar que todas aquelas não abordadas são de departamentos externos à Engenharia, com exceção de: Transmissão de Calor, Métodos Experimentais em Engenharia Mecânica, Métodos Numéricos em Engenharia Mecânica, Optativa de Sistemas Digitais, Optativas de Sistemas Mecatrônicos e Sinais e Sistemas.

Ao se verificar as disciplinas externas às engenharias, pode-se perceber que se tratam de três campos do conhecimento, a saber: Matemática, Física e Ciências Humanas. As pertencentes ao campo da Matemática (Cálculo de uma Variável, Cálculo a Várias Variáveis I e II, Equações Diferenciais e de Diferenças, Álgebra Linear I e II), apesar de não serem tratadas diretamente no âmbito da bicicleta, constituem fundamentos indispensáveis para o entendimento e a aplicação das disciplinas da engenharia a ela relacionadas. A única proveniente do departamento de Física (Física Moderna) não se relaciona em nada com sistemas mecânicos atuais e pode até ter questionada sua permanência no currículo de Engenharia Mecânica. Já aquelas de Ciências Humanas (O Humano e o Fenômeno Religioso, Optativas de Cristianismo, Ética Cristã, Ética Profissional para Engenharia, Optativas de Filosofia e Legislação Social) são responsáveis por uma formação mais global do estudante e apesar de não abordadas como conceitos que envolvem a bicicleta, poderão e deverão ser consideradas durante o desenvolvimento de qualquer projeto de engenharia. Criar esse hábito ajudará os estudantes a assumirem uma atitude condizente às consciências ética e socioambiental, esperadas pela sociedade em sua vida profissional.

Para além das disciplinas constantes nos currículos em questão, outros tópicos foram relacionados à bicicleta. São eles: ergonomia, vida útil, "design", vendas, manutenção, atendimento ao cliente, logística e urbanismo.

Síntese comparativa - Componentes da bicicleta e disciplinas			
Partes da Bicicleta	Tópico	Disciplina de Engenharia Mecânica	Disciplina de Engenharia de Controle e Automação
Quadro	Treliça	Estática	Estática
		Mecânica dos Sólidos I	Introdução à Mecânica dos Sólidos
		Mecânica dos Sólidos II	
	Material	Ciência e Tecnologia dos Materiais	Ciência e Tecnologia dos Materiais
		Materiais de Engenharia	Introdução à Mecânica dos Sólidos
		Comportamento Mecânico dos Materiais	
Freio	Atrito	Dinâmica de Corpos Rígidos	Dinâmica de Corpos Rígidos
		Modelagem de Sistemas Dinâmicos	Modelagem de Sistemas Dinâmicos
Guidão	Torque	Mecânica Newtoniana	Mecânica Newtoniana
		Laboratório de Mecânica Newtoniana	Laboratório de Mecânica Newtoniana
Rodas	Momento Angular	Mecânica Newtoniana	Mecânica Newtoniana
		Laboratório de Mecânica Newtoniana	Laboratório de Mecânica Newtoniana
		Dinâmica de Corpos Rígidos	Dinâmica de Corpos Rígidos
		Mecânica dos Sólidos I	Introdução à Mecânica dos Sólidos

Tabela 5.6 – Correlação entre os componentes da bicicleta e as disciplinas das Engenharias - Fonte: Elaborada pelo autor

Síntese comparativa - Componentes da bicicleta e disciplinas			
Partes da Bicicleta	Tópico	Disciplina de Engenharia Mecânica	Disciplina de Engenharia de Controle e Automação
Rodas	Momento de Inércia	Mecânica Newtoniana	Mecânica Newtoniana
		Laboratório de Mecânica Newtoniana	Laboratório de Mecânica Newtoniana
		Dinâmica de Corpos Rígidos	Dinâmica de Corpos Rígidos
		Mecânica dos Sólidos I	
	Efeito Giroscópio	Dinâmica de Corpos Rígidos	Dinâmica de Corpos Rígidos
	Cinemática Rotacional	Mecânica Newtoniana	Mecânica Newtoniana
		Laboratório de Mecânica Newtoniana	Laboratório de Mecânica Newtoniana
	Coluna de Direção + Garfo	Alavanca	Estática
Mecânica Newtoniana			Mecânica Newtoniana
Laboratório de Mecânica Newtoniana			Laboratório de Mecânica Newtoniana
Torque		Mecânica Newtoniana	Mecânica Newtoniana
		Laboratório de Mecânica Newtoniana	Laboratório de Mecânica Newtoniana
Material		Ciência e Tecnologia dos Materiais	Ciência e Tecnologia dos Materiais
		Materiais de Engenharia	Introdução à Mecânica dos Sólidos
		Comportamento Mecânico dos Materiais	

Tabela 5.6 – Correlação entre os componentes da bicicleta e as disciplinas das Engenharias (continuação) - Fonte: Elaborada pelo autor

Síntese comparativa - Componentes da bicicleta e disciplinas			
Partes da Bicicleta	Tópico	Disciplina de Engenharia Mecânica	Disciplina de Engenharia de Controle e Automação
Coluna de Direção + Garfo	"Trail"	Mecânica Newtoniana	Mecânica Newtoniana
		Laboratório de Mecânica Newtoniana	Laboratório de Mecânica Newtoniana
Amortecedor + Suspensão	Amortecimento	Fluidos e Termodinâmica	Fluidos e Termodinâmica
		Laboratório de Fluidos e Termodinâmica	Laboratório de Fluidos e Termodinâmica
		Fenômenos de Transporte I	Fenômenos de Transporte I
		Mecânica dos Fluidos II	
	Resposta em Frequência	Vibrações Mecânicas	Controle e Servomecanismos
		Controle de Sistemas	Laboratório de Controle e Servomecanismos
		Modelagem de Sistemas Dinâmicos	Modelagem de Sistemas Dinâmicos
			Controle Discreto
Sistema de Transmissão	Forças	Mecânica Newtoniana	Mecânica Newtoniana
		Laboratório de Mecânica Newtoniana	Laboratório de Mecânica Newtoniana
		Estática	Estática
	Trabalho	Mecânica Newtoniana	Mecânica Newtoniana
		Laboratório de Mecânica Newtoniana	Laboratório de Mecânica Newtoniana

Tabela 5.6 – Correlação entre os componentes da bicicleta e as disciplinas das Engenharias (continuação) - Fonte: Elaborada pelo autor

Síntese comparativa - Componentes da bicicleta e disciplinas			
Partes da Bicicleta	Tópico	Disciplina de Engenharia Mecânica	Disciplina de Engenharia de Controle e Automação
Sistema de Transmissão	Energia Cinética	Mecânica Newtoniana	Mecânica Newtoniana
		Laboratório de Mecânica Newtoniana	Laboratório de Mecânica Newtoniana
		Dinâmica de Corpos Rígidos	Dinâmica de Corpos Rígidos
Pedal + Pé de Vela	Torque	Mecânica Newtoniana	Mecânica Newtoniana
		Laboratório de Mecânica Newtoniana	Laboratório de Mecânica Newtoniana
	Momento Angular	Mecânica Newtoniana	Mecânica Newtoniana
		Laboratório de Mecânica Newtoniana	Laboratório de Mecânica Newtoniana
	Cinemática Rotacional	Mecânica Newtoniana	Mecânica Newtoniana
		Laboratório de Mecânica Newtoniana	Laboratório de Mecânica Newtoniana
Pneu	Atrito	Dinâmica de Corpos Rígidos	Dinâmica de Corpos Rígidos
		Modelagem de Sistemas Dinâmicos	Modelagem de Sistemas Dinâmicos
	Amortecimento	Fluidos e Termodinâmica	Fluidos e Termodinâmica
		Laboratório de Fluidos e Termodinâmica	Laboratório de Fluidos e Termodinâmica
		Mecânica dos Fluidos I	Fenômenos de Transporte I
		Mecânica dos Fluidos II	
	Selim	Ergonomia	

Tabela 5.6 – Correlação entre os componentes da bicicleta e as disciplinas das Engenharias (continuação) - Fonte: Elaborada pelo autor

Síntese comparativa – Características da bicicleta e disciplinas			
Características da Bicicleta	Tópico	Disciplina de Engenharia Mecânica	Disciplina de Engenharia de Controle e Automação
Dinâmica	Modelagem de Dinâmica Multi-Corpos	Dinâmica de Corpos Rígidos	Dinâmica de Corpos Rígidos
		Modelagem de Sistemas Dinâmicos	Modelagem de Sistemas Dinâmicos
Estabilidade Dinâmica	Efeito Giroscópio	Dinâmica de Corpos Rígidos	Dinâmica de Corpos Rígidos
	"Trail"	Mecânica Newtoniana	Mecânica Newtoniana
		Laboratório de Mecânica Newtoniana	Laboratório de Mecânica Newtoniana
	Distribuição de Massas	Modelagem de Sistemas Dinâmicos	Modelagem de Sistemas Dinâmicos
		Mecânica dos Sólidos I	Introdução à Mecânica dos Sólidos
		Mecânica dos Sólidos II	
	Controle	Controle de Sistemas	Controle e Servomecanis.
			Laboratório de Controle e Servomecanismos
			Controle Discreto
	Resposta em Frequência	Vibrações Mecânicas	Controle e Servomecanis.
		Controle de Sistemas	Laboratório de Controle e Servomecanismos
		Controle Discreto	

Tabela 5.7 – Correlação entre as características da bicicleta e as disciplinas das Engenharias - Fonte: Elaborada pelo autor

Síntese comparativa – Características da bicicleta e disciplinas				
Características da Bicicleta	Tópico	Disciplina de Engenharia Mecânica	Disciplina de Engenharia de Controle e Automação	
Manobrabilidade	Momento Linear	Mecânica Newtoniana	Mecânica Newtoniana	
		Laboratório de Mecânica Newtoniana	Laboratório de Mecânica Newtoniana	
	Momento Angular	Mecânica Newtoniana	Mecânica Newtoniana	
		Laboratório de Mecânica Newtoniana	Laboratório de Mecânica Newtoniana	
		Dinâmica de Corpos Rígidos	Dinâmica de Corpos Rígidos	
		Mecânica dos Sólidos I	Introdução à Mecânica dos Sólidos	
	Atrito	Dinâmica de Corpos Rígidos	Dinâmica de Corpos Rígidos	
		Modelagem de Sistemas Dinâmicos	Modelagem de Sistemas Dinâmicos	
	Confiabilidade	Distribuições de Probabilidade	Probabilidade e Estatística	Probabilidade e Estatística
		Taxa de Falhas	Probabilidade e Estatística	Probabilidade e Estatística
Comportamento dos Materiais		Ciência e Tecnologia dos Materiais	Ciência e Tecnologia dos Materiais	
		Materiais de Engenharia	Introdução à Mecânica dos Sólidos	
		Comportamento Mecânico dos Materiais		

Tabela 5.7 – Correlação entre as características da bicicleta e as disciplinas das Engenharias (continuação) - Fonte: Elaborada pelo autor

Síntese comparativa – Características da bicicleta e disciplinas			
Características da Bicicleta	Tópico	Disciplina de Engenharia Mecânica	Disciplina de Engenharia de Controle e Automação
Mantenabilidade	Distribuições de Probabilidade	Probabilidade e Estatística	Probabilidade e Estatística
	Tipos de Manutenção		
Durabilidade	Vida Útil		
Estética	Design		
	Vendas		

Tabela 5.7 – Correlação entre as características da bicicleta e as disciplinas das Engenharias (continuação) - Fonte: Elaborada pelo autor

Síntese comparativa - Contexto da bicicleta e disciplinas			
Relativo à Bicicleta	Tópico	Disciplina de Engenharia Mecânica	Disciplina de Engenharia de Controle e Automação
Projeto	Modelagem de Sistemas Multi-Corpos	Dinâmica de Corpos Rígidos	Dinâmica de Corpos Rígidos
		Modelagem de Sistemas Dinâmicos	Modelagem de Sistemas Dinâmicos
	Concepção, Desenho	Desenho Técnico I	Desenho Técnico I
		Desenho Técnico II	Desenho Técnico II
		Desenho Mecânico	
		Metrologia Dimensional	
		Elementos de Máquinas	

Tabela 5.8 – Correlação entre o contexto da bicicleta e as disciplinas das Engenharias - Fonte: Elaborada pelo autor

Síntese comparativa - Contexto da bicicleta e disciplinas			
Relativo à Bicicleta	Tópico	Disciplina de Engenharia Mecânica	Disciplina de Engenharia de Controle e Automação
Projeto	Concepção, Desenho	Projeto de Sistemas Mecânicos	
Aerodinâmica	Escoamento de Fluidos, Arrasto e Camada Limite	Fluidos e Termodinâmica	Fluidos e Termodinâmica
		Laboratório de Fluidos e Termodinâmica	Laboratório de Fluidos e Termodinâmica
		Mecânica dos Fluidos I	Fenômenos de Transporte I
		Mecânica dos Fluidos II	Fenômenos de Transporte II
Fabricação	Processos	Tecnologia Mecânica	Integração da Manufatura
		Metrologia Dimensional	Optimização de Projetos
		Elementos de Máquinas	
		Processos de Fabricação	
	Automação da Fabricação	Automação da Manufatura	Automação da Manufatura
			Integração da Manufatura
Automação da Bicicleta	Conceito de Sistema	Modelagem de Sistemas Dinâmicos	Modelagem de Sistemas Dinâmicos
	Modelagem de Sistemas Multi-corpos	Modelagem de Sistemas Dinâmicos	Modelagem de Sistemas Dinâmicos

Tabela 5.8 – Correlação entre o contexto da bicicleta e as disciplinas das Engenharias (continuação) - Fonte: Elaborada pelo autor

Síntese comparativa - Contexto da bicicleta e disciplinas			
Relativo à Bicicleta	Tópico	Disciplina de Engenharia Mecânica	Disciplina de Engenharia de Controle e Automação
Automação da Bicicleta	Simulação	Modelagem de Sistemas Dinâmicos	Modelagem de Sistemas Dinâmicos
	Controle	Controle de Sistemas	Controle e Servomecanismos
			Laboratório de Controle e Servomecanismos
			Controle Discreto
Bicicleta Inteligente	Sensores	Instrumentação Eletrônica	Instrumentação Eletrônica
			Microcontroladores e Sistemas Embarcados
			Circuitos Elétricos e Eletrônicos
			Laboratório de Circuitos Elétricos e Eletrônicos
	Atuadores		Microcontroladores e Sistemas Embarcados
			Sistemas de Atuação
Desenvolvimento de Aplicativos Dedicados	Linguagem de Programação	Programação I	Programação I
		Programação II	Programação II
	Aprendizado de Máquina		Inteligência Computacional Aplicada
Motorização (a Combustão)	Máquinas Térmicas	Fluidos e Termodinâmica	Fluidos e Termodinâmica

Tabela 5.8 – Correlação entre o contexto da bicicleta e as disciplinas das Engenharias (continuação) - Fonte: Elaborada pelo autor

Síntese comparativa - Contexto da bicicleta e disciplinas			
Relativo à Bicicleta	Tópico	Disciplina de Engenharia Mecânica	Disciplina de Engenharia de Controle e Automação
Motorização (Combustão)	Máquinas Térmicas	Laboratório de Fluidos e Termodinâmica	Laboratório de Fluidos e Termodinâmica
		Máquinas Térmicas	
		Termodinâmica para Engenharia Mecânica	
		Projeto de Sistemas Térmicos	
Motorização (Eletricidade)	Indução Eletromagnética	Eletromagnetismo	Eletromagnetismo
		Laboratório de Eletromagnetismo	Laboratório de Eletromagnetismo
		Eletrotécnica Geral	Sistemas de Atuação
	Acumuladores	Eletromagnetismo	Eletromagnetismo
		Laboratório de Eletromagnetismo	Laboratório de Eletromagnetismo
		Química Geral	Química Geral
			Circuitos Elétricos e Eletrônicos
			Laboratório de Circuitos Elétricos e Eletrônicos
	Emissão Zero	Ecologia	Introdução à Engenharia Ambiental
Química		Química Geral	Química Geral
Vendas	Pesquisa de Mercado	Administração para Engenheiros	Administração para Engenheiros

Tabela 5.8 – Correlação entre o contexto da bicicleta e as disciplinas das Engenharias (continuação) - Fonte: Elaborada pelo autor

Síntese comparativa - Contexto da bicicleta e disciplinas			
Relativo à Bicicleta	Tópico	Disciplina de Engenharia Mecânica	Disciplina de Engenharia de Controle e Automação
Vendas	Pesquisa de Mercado	Introdução à Economia para Engenheiros	Introdução à Economia para Engenheiros
Pós-Venda	Atendimento ao Cliente		
	Manutenção		
Meio de Transporte	Urbanismo		
	Logística		

Tabela 5.8 – Correlação entre o contexto da bicicleta e as disciplinas das Engenharias (continuação) - Fonte: Elaborada pelo autor

Através do exame cuidadoso das três tabelas anteriores, no intuito de melhorar a visualização das correlações existentes, elaborou-se um esboço de mapa conceitual da bicicleta, ligando-o aos currículos das engenharias Mecânica e de Controle e Automação. O produto final deste exercício é a Fig. 5.1, a qual, ainda que dê melhor noção da visão geral, fica de difícil compreensão, dado o espaço restrito neste documento. Para facilitar a leitura, optou-se por dividir essa figura em cinco partes: um esboço de mapa conceitual da bicicleta (Fig. 5.2) e as correlações dos tópicos desse esboço com o ciclo básico (Fig. 5.3), com o ciclo profissional comum a ambas as engenharias (Fig. 5.4), com o ciclo profissional exclusivo da Engenharia Mecânica (Fig. 5.5) e finalmente com o ciclo profissional exclusivo da Engenharia de Controle e Automação (Fig. 5.6).

Na Figura 5.1, os tópicos sinalizados em cinza escuro estão relacionados à bicicleta, mas não são tratados por nenhuma disciplina prevista no currículo de ambas as engenharias. Por conseguinte, projetos de bicicleta poderão envolvê-los e a aprendizagem de alguns deles pode ser importante para desempenho futuro do profissional. Neste ponto nota-se o potencial de projetos de engenharia no sentido de preencher eventuais lacunas do currículo atual.

Por razões de formatação optou-se por colocar os comentários das Fig. 5.2 a Fig. 5.6, logo após a apresentação das mesmas.

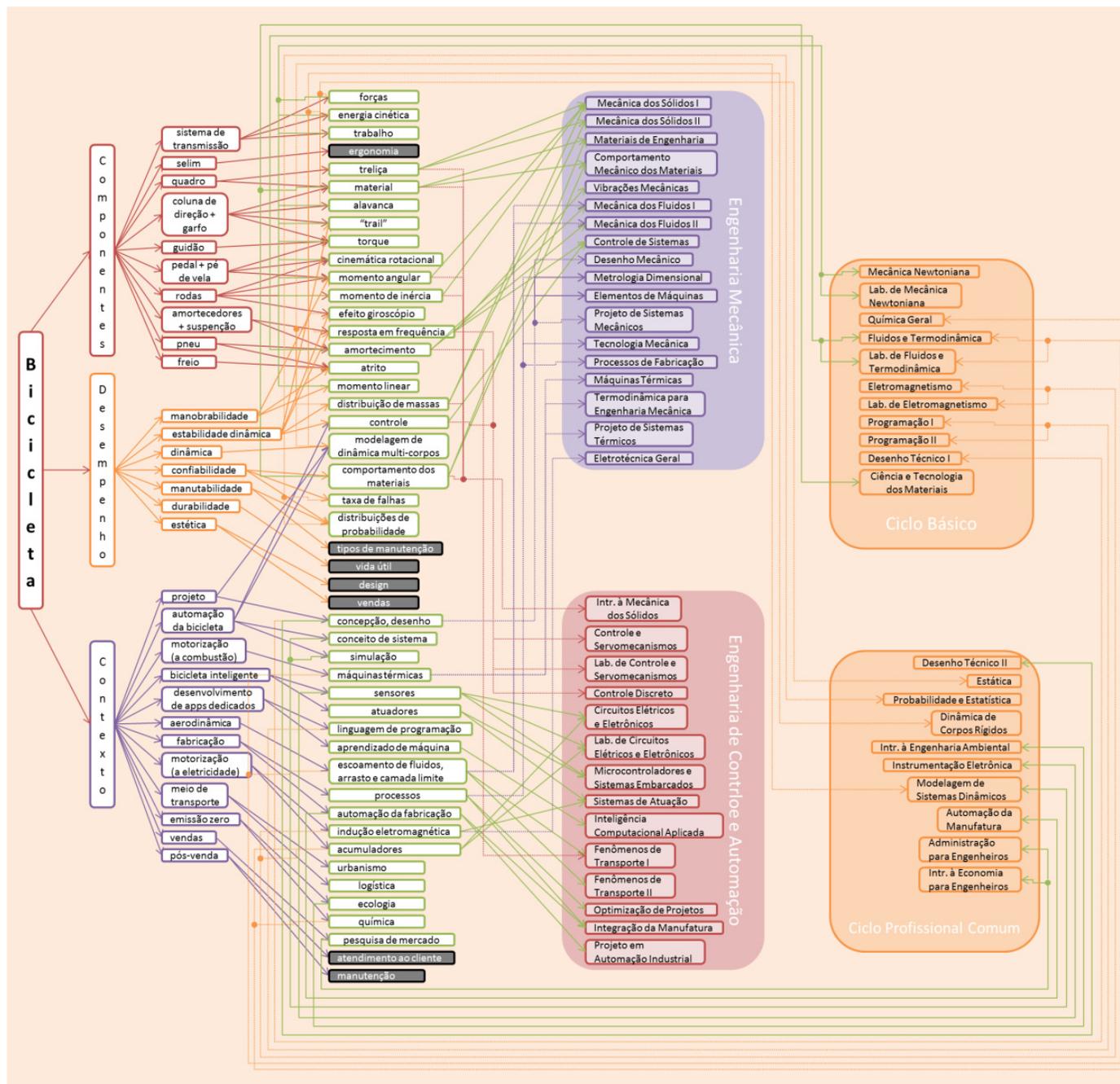


Figura 5.1 – Conceitos ligados à bicicleta e às disciplinas das Engenharias analisadas - Fonte: Elaborada pelo autor

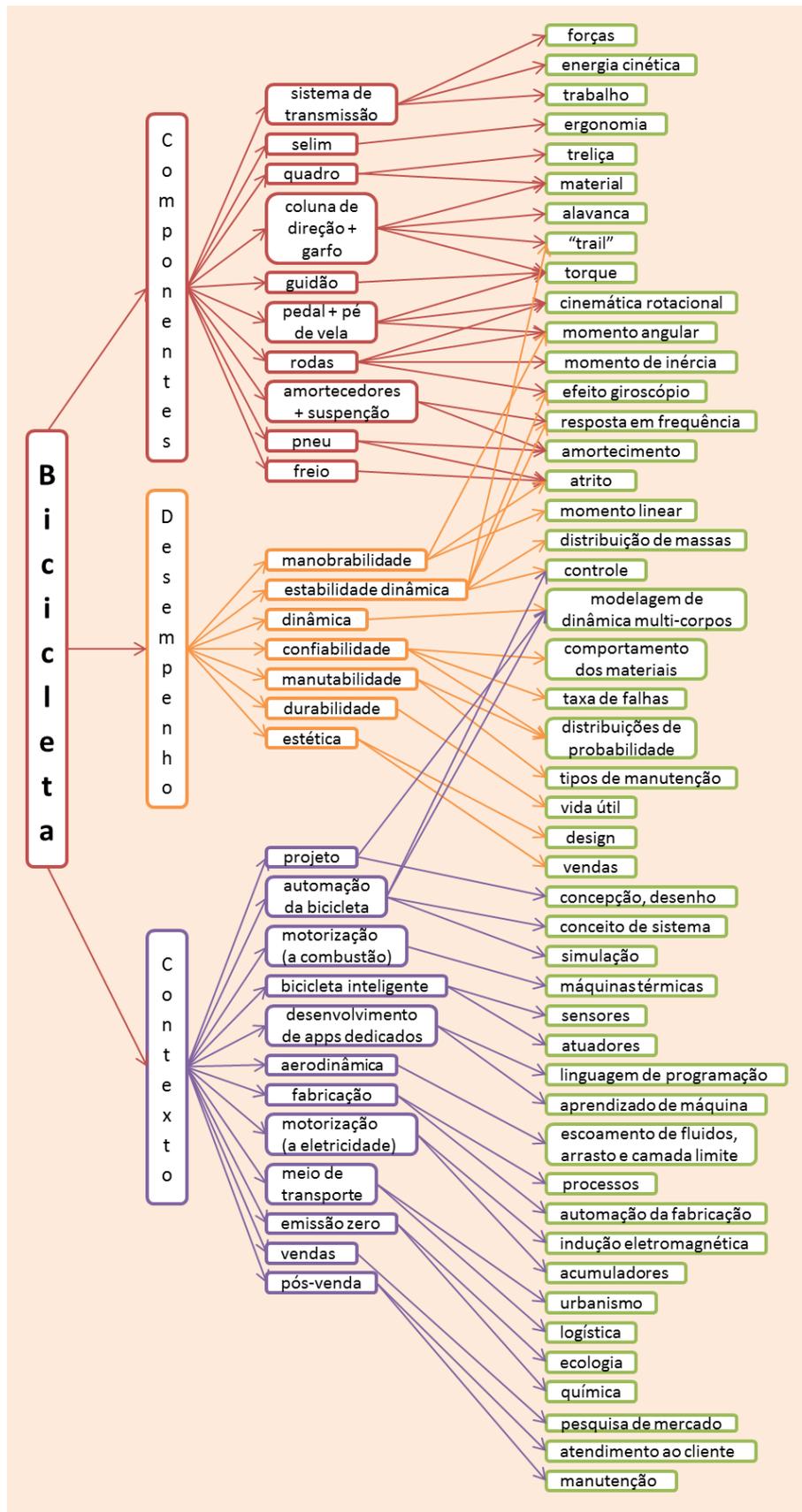


Figura 5.2 – Esboço de Mapa Conceitual da bicicleta - Fonte: Elaborada pelo autor

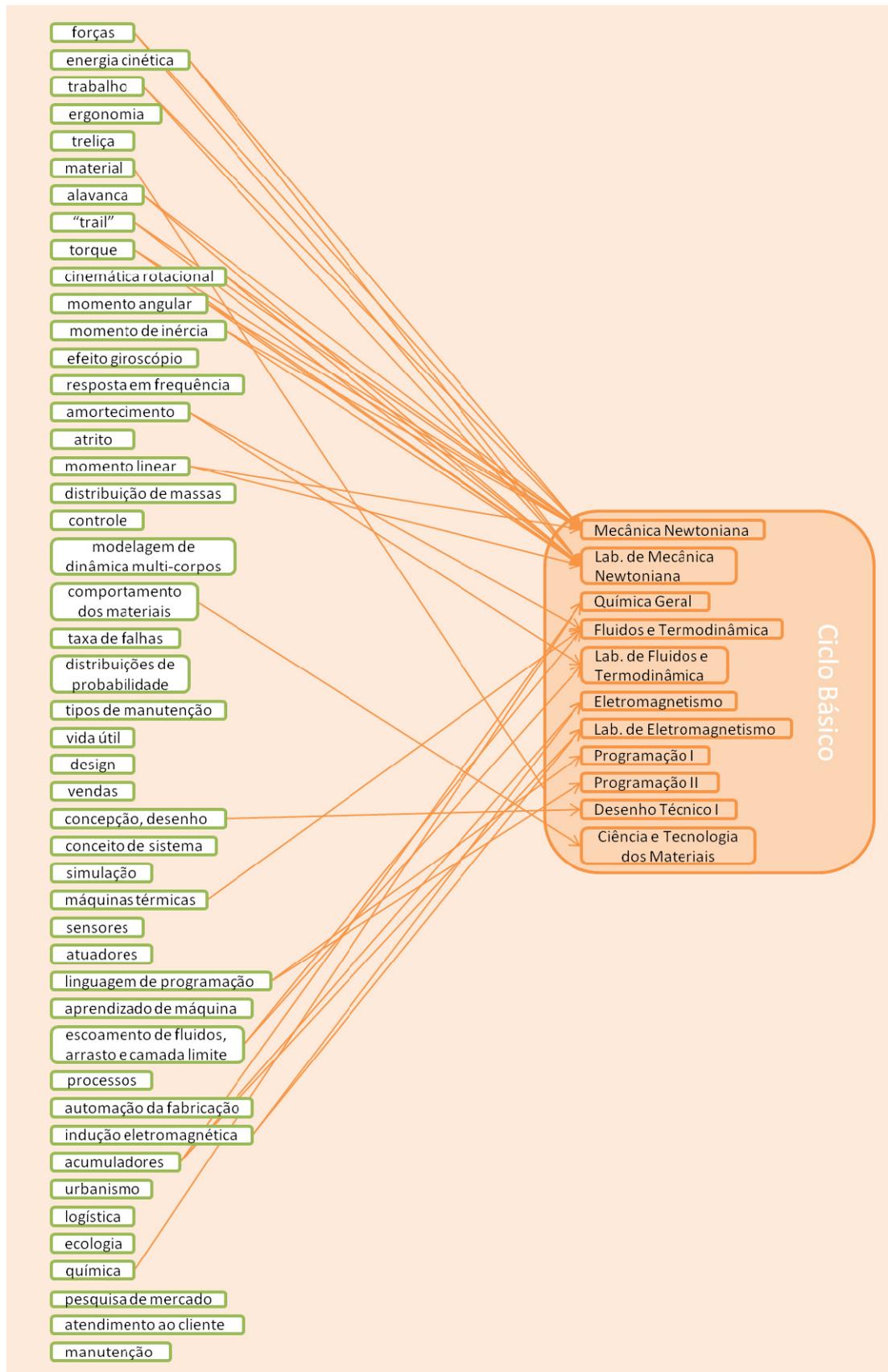


Figura 5.3 – Correlações dos tópicos da bicicleta com o ciclo básico -

Fonte: Elaborada pelo autor

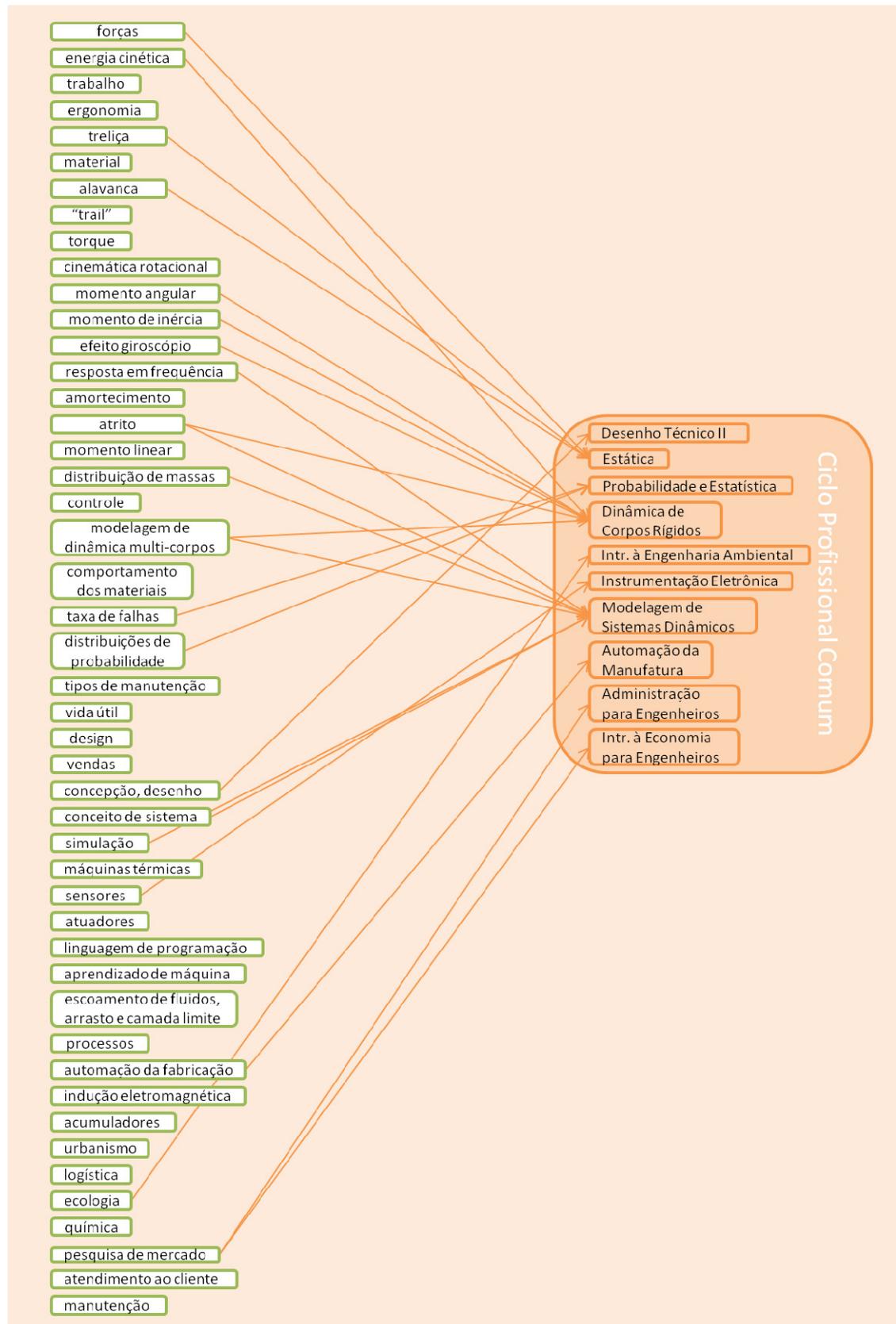


Figura 5.4 – Correlações dos tópicos da bicicleta com o ciclo profissional comum a ambas as engenharias - Fonte: Elaborada pelo autor

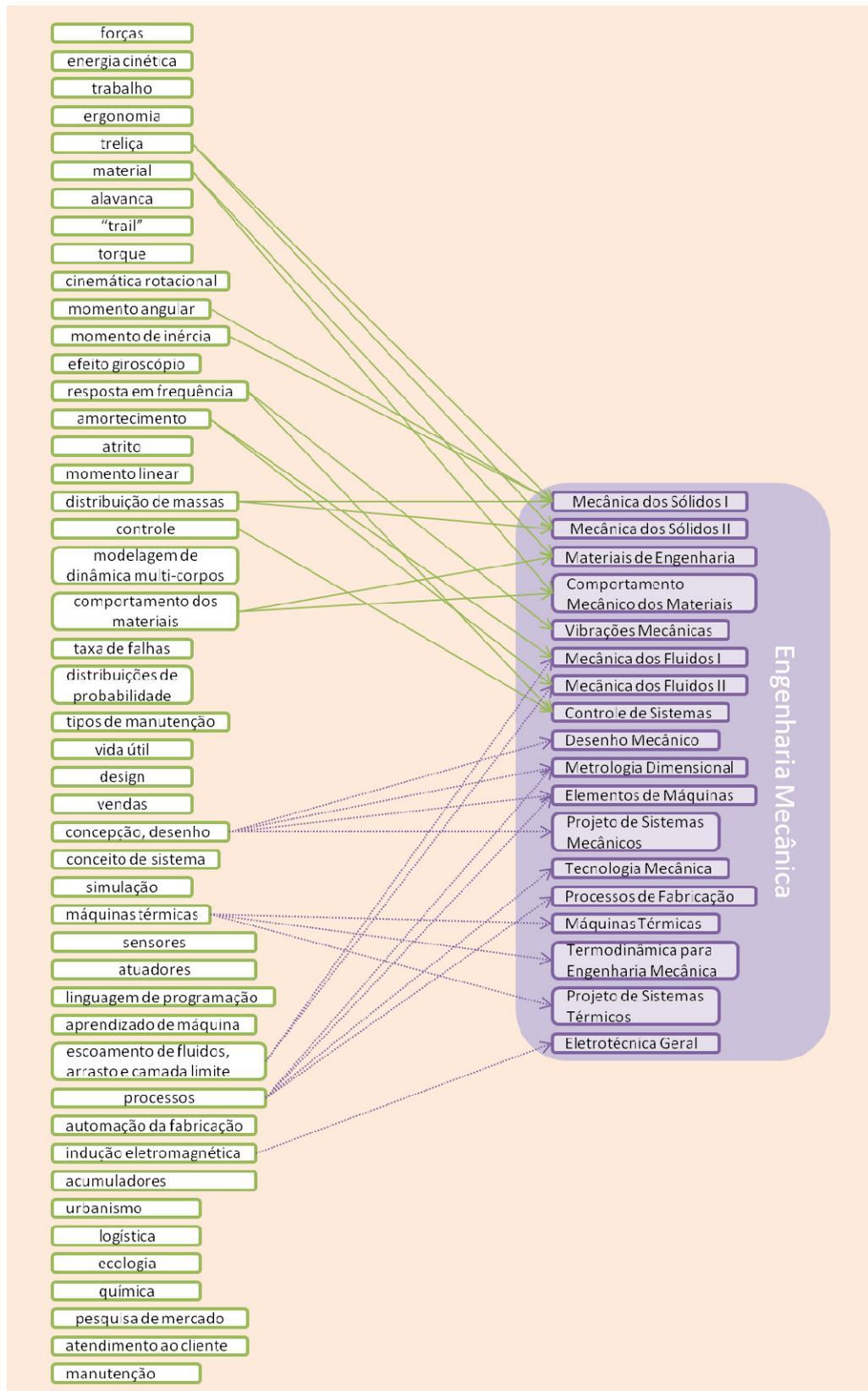


Figura 5.5 – Correlações dos tópicos da bicicleta com o ciclo profissional específico da Engenharia Mecânica - Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 5.2 é um esboço de mapa conceitual da bicicleta. O mapa conceitual é uma ferramenta que foi desenvolvida pelo pesquisador norte-americano Joseph Novak na década de 1970. Essa ferramenta, de grande utilidade e potencial, quando bem aplicada tem como uma de suas características principais auxiliar na compreensão e também no resgate do que foi aprendido. Diz-se neste trabalho que a Fig. 5.2 é somente um esboço, pois esta não seguiu todos os preceitos da ferramenta, abdicando, por exemplo, das palavras (usualmente verbos) utilizadas na ligação entre conceitos. Em parte isso se deve ao escasso domínio deste autor na ferramenta, e em parte ao seu entendimento de que a figura, tal como construída, já alcança o objetivo: melhorar a visualização do que estava antes em forma de tabela.

Ao se observar as Fig. 5.3 a Fig. 5.6, pode-se ter a ideia equivocada de que, ao tratar dos conceitos citados, as disciplinas a eles relacionadas terão necessariamente todos os seus conteúdos cobertos. No entanto, isso será mais a exceção do que a regra. É possível que muitos interpretem esse fato como uma fraqueza na abrangência de métodos baseados em projetos. Contudo essa constatação pode ser vista também como uma oportunidade para a reflexão: ao comparar a prática da engenharia com as ementas das disciplinas dadas, caso haja conteúdo não abordado, tal dissonância seria atribuível à prática ou currículo?

Exemplos de desmedida típica do mundo acadêmico são disciplinas oferecidas nas escolas de engenharia nas quais conteúdos, metodologias e sobretudo os docentes são desligados da futura realidade profissional do aluno de engenharia, pois são provenientes de departamentos como matemática, física e química, nos quais estas ciências são desenvolvidas com total autonomia e descompromisso quanto a suas aplicações práticas. Disciplinas como Química e Física Moderna, cujos conteúdos são inteiramente desvinculados da realidade das profissões em pauta, são amostras dessa problemática. Estas desmedidas são por vezes mais sutis, restringindo-se a partes da ementa de uma disciplina, descompromissadas com as possibilidades de atuação do engenheiro.

Mas certamente as falhas não serão sempre atribuíveis ao campo acadêmico, pois este tem a missão de oferecer uma formação abrangente, ou seja, entre outras coisas, deve se preocupar com a generalização dos conceitos que ali são aprendidos. De fato, a generalização é um ponto crítico da utilização de projetos como metodologia de ensino/aprendizagem. Deve-se atentar a todo momento para que os conceitos aprendidos durante esse processo tenham suas abrangências exploradas. Não há método isento de deficiências e reconhecê-las

é importante para que se possam tomar as devidas providências para atenuá-las ou mesmo saná-las.

Essa apreensão quanto à generalização dos conhecimentos passados através de projetos práticos deverá nortear a leitura do próximo capítulo, no qual a atitude do tutor deverá estar de acordo com esse papel. Cabe ressaltar que, com os projetos apresentados no capítulo 6, não se pretende tratar as ementas de cada uma das disciplinas a eles relacionadas, o que está em concordância com a discussão anterior, relativa à questão da desmedida acadêmica.

6

O Uso da Bicicleta/Motocicleta em Ensino e Pesquisa nas Engenharias Mecânica e de Controle e Automação

Neste capítulo serão inicialmente apresentados, a título de exemplo, três projetos em PBL a serem aplicados em diferentes fases dos cursos de Engenharia Mecânica e de Controle e Automação da PUC-Rio. Em seguida serão propostas seis outras sugestões de temas para desenvolvimento futuro. Ao final do capítulo as competências tratadas durante estes percursos serão mapeadas e comparadas com os currículos apresentados no capítulo anterior.

O intuito com tais exemplos não é o de cobrir todos os conhecimentos, habilidades e atitudes que os currículos de Engenharia Mecânica e de Controle e Automação pretendem abordar, já que esses três projetos ainda não seriam suficientes para se construir um currículo inteiro de formação através da filosofia de ensino do PBL. No entanto, precisamente com o intuito de se aproximar desse objetivo, colocam-se também seis outros temas com valor complementar para esses três projetos, com a pretensão de cobrir, no seu todo, a maior parte possível dos currículos das engenharias em questão. Tomou-se como exemplo as universidades de Aalborg (Dinamarca) e Maastricht (Holanda), onde o PBL está integrado aos currículos, fazendo com que o aluno tenha projetos a desenvolver a cada semestre.

Tanto na elaboração dos exemplos que serão apresentados em 6.1 quanto na concepção dos temas que serão sugeridos em 6.2 tomaram-se como base as análises comparativas feitas no capítulo 5, principalmente na Tab. 5.6, na Tab. 5.7 e na Tab. 5.8, assim como na Fig. 5.1 a Fig. 5.6. Deste modo a visualização da abrangência de cada projeto, assim como de suas interseções e complementaridades, foram facilitadas. Aconselha-se portanto a utilização de tais ferramentas (ou outra ferramenta de análise de conhecimento) quando se for construir um currículo em PBL baseado em currículo já existente.

6.1. Concepção de Projetos em PBL

Para os modelos de projetos aqui concebidos, que incluem o material adequado para sua aplicação, foram escolhidos períodos nas diferentes fases do ciclo de formação de um engenheiro (início do ciclo básico, início do ciclo profissional e projeto de final de curso). A intenção foi a de melhor demonstrar a diferença de abordagem que há, dependendo do grau de intimidade que o aluno (e muitas vezes o tutor) tem com o método, como constatado por BONNSTETTER (apud SLOUGH e MILAM - 2013), que diz que o docente passa ao discente paulatinamente o controle da investigação.

A cada projeto proposto, sua motivação será dada, seguida do material necessário para desenvolvê-lo, ou seja, uma apostila voltada para o aluno (com descrição e contextualização do projeto, problemas a serem discutidos e bibliografia aconselhada) e outra para o tutor (com informações complementares como atividades aconselhadas, objetivos de aprendizagem, direcionamento pretendido e pontos para observar/avaliar).

Cabe ressaltar ainda que as apostilas deste subcapítulo foram desenvolvidas visando exemplificar o que poderia ser o material para aplicação real do método proposto. Assim, sua leitura deve ser feita sob essa ótica. Ainda que o texto possa ser repetitivo, o leitor deve-se lembrar de que ele é destinado a diferentes públicos: alunos de três períodos distintos e tutores.²² Portanto o conhecimento do leitor "típico" de cada apostila não pressupõe qualquer referência ao conteúdo das demais e depende fortemente de seu grau de familiaridade com o método. Acrescente-se que a natureza do texto das apostilas é a de guia de projeto - o que constitui a razão do caráter repetitivo de sua forma.

6.1.1. Bicicleta do futuro (para alunos do ciclo básico)

Este projeto está voltado para os calouros de engenharia mecânica e de controle e automação e, como tal, parte do princípio de que os alunos não têm experiências anteriores com o PBL. Sendo assim, como ressaltado por POWELL e WEENK (2003), o objetivo central deste primeiro projeto é auxiliar na transição da escola para a universidade, mostrando ao iniciante como se

²²No caso de apostilas para aluno, utilizou-se livremente a 1ª pessoa do singular assim como a 3ª pessoa do plural.

desenvolverá o currículo nesta nova forma de aprendizagem, ou seja, como aprender através do fazer e como analisar e resolver problemas de solução aberta. Também deverá modificar sua postura quanto ao conteúdo, aumentando o diálogo acadêmico entre discentes e docentes, assim como entre os próprios discentes.

Ainda que este primeiro projeto tenha foco na transição citada, é essencial que haja uma apresentação prévia (aula inaugural ou palestra) mostrando o funcionamento da nova metodologia e esclarecendo como serão a rotina de estudos, o grupo de discussão, as atribuições de cada um e as avaliações do progresso individual e do grupo. Isso faz com que a nova forma de comportamento tenha um carácter institucional e seja assimilada como um aspecto cultural da universidade.

É recomendável a distribuição de apostilas informativas que poderão ser baseadas nos subitens 4.2.1 (Breve histórico) e 4.2.2 (Características gerais), bem como nas partes “Fases de um Projeto”, “Dinâmica de Execução de um Projeto”, “Avaliação dos Alunos” e “Avaliação dos Projetos” do subitem 4.2.7 (Etapas e papéis em um projeto nos moldes do PBL) deste trabalho.

Neste primeiro momento pretende-se abordar a profissão e as áreas de atuação, assim como utilizar o projeto de uma bicicleta para exemplificar as fases de um produto. Serão então apresentadas as características básicas das bicicletas, passando pelos seus subsistemas e dinâmica rudimentar, mas também aproveitando para introduzir habilidades e atitudes como planejamento e gestão de projetos de engenharia, trabalho em equipe e apresentação oral e escrita do projeto - sempre ressaltando a importância da integração com a indústria.

As habilidades e atitudes citadas deverão ser aprofundadas aos poucos no decorrer da vida acadêmica do aluno, pois farão parte de todos os projetos. Seria um objetivo demasiadamente ambicioso requerer dos recém-chegados o domínio de competências tão complexas em somente um semestre letivo. Há que se ter em mente que um projeto em PBL deve ser desafiador o suficiente para criar entusiasmo, mas de ambições controladas para não correr o risco de causar a frustração do insucesso.

6.1.1.1. Apostila do estudante

A - Histórico: a cidade do Rio de Janeiro, por sua topologia natural (geografia predominantemente plana) e cultural (população bastante ligada a hábitos saudáveis e com crescente consciência ecológica), foi escolhida pelo fabricante multinacional de bicicletas X para ser a sede de sua mais nova fábrica de bicicletas. As obras já começaram e eles estão com previsão de início de funcionamento para o primeiro semestre do próximo ano.

Além de um corpo de experientes profissionais, eles estão com diversas vagas em diferentes setores para engenheiros recém-formados (trainees) e abriram junto às universidades da cidade uma competição que visa à seleção dos futuros empregados juniores.

O título da competição é: como seria a bicicleta do futuro?

Os requisitos dados são: grupos de no máximo 10 alunos de último ano devem entregar um relatório e apresentar aos diretores da empresa um projeto factível (viável tanto técnica quanto economicamente), com especificações claras e desenhos. Um protótipo é desejável, mas não será determinante na classificação dos projetos.

O projeto é bem aberto, não tem descrição clara e visa à contratação de jovens criativos, mas sabe-se também que esta empresa não preza somente a criatividade, mas também as demais características de um bom engenheiro.

O salário é atraente (20% acima do mercado), as condições de trabalho são compatíveis com as melhores da Europa (35 horas semanais, seis semanas de férias por ano), as oportunidades de crescimento profissional e de trabalho no exterior são grandes, visto se tratar de uma empresa multinacional em pleno crescimento.

Suponham que vocês já estivessem em seu último ano de Engenharia Mecânica ou Engenharia de Controle e Automação, tivessem que desenvolver um projeto de final de curso e que quisessem ao mesmo tempo participar desta competição.

B – Projeto: foi aceito pelo departamento (incentivado na verdade) que o projeto de graduação atenda as especificações do concurso citado anteriormente.

C – Perguntas a serem pesquisadas

C1 – Quais vagas posso postular? (quais as áreas de atuação de um(a) engenheiro(a)?)

C2 – Quais são as características principais de um(a) bom(a) engenheiro(a) e como defini-las? (agora é a hora de pensar quais competências quero adquirir/desenvolver durante meu curso)

C3 – Quais as fases de um projeto?

C4 – Como planejar e gerenciar um projeto de engenharia?

C5 – Quais são as características de um relatório de projeto e como apresentá-lo?

C6 – Quais os subsistemas que compõem a bicicleta e como funcionam?

C7 – Quais são as características principais de uma boa bicicleta e como defini-las?

C8 – Qual será a bicicleta do futuro?

D – Cronograma

D1 – A primeira semana servirá para dividir os grupos, responder dúvidas surgidas quanto aos termos mencionados em A, B e C e criar o cronograma do projeto.

D2 – Criem um cronograma para o projeto que preveja a resposta de cada uma das perguntas acima ao mesmo tempo em que desenvolvem o projeto da bicicleta conforme encomendado. Este cronograma deverá ser discutido e aceito pelo tutor até o último encontro da primeira semana.

D3 – Separem a penúltima semana para terminarem o relatório final do projeto e sua apresentação. As respostas às perguntas do item C não precisam estar explicitadas na apresentação nem no relatório final, mas deverão guiar os conteúdos neles escritos ou expostos.

D4 – A última semana será dedicada às apresentações que deverão ser feitas aos avaliadores (professores e/ou profissionais da empresa interessada).

E – Recursos

E1 - Fontes indicadas

As diversas fontes de informação aqui indicadas pretendem somente dar um norte às pesquisas, mas não exaurem o assunto e nem eximem os alunos de outras buscas.

Gerenciamento de projetos

- <http://www.elirodrigues.com/2014/08/13/como-gerenciar-um-projeto/>

Cronograma

- <http://www.elirodrigues.com/serie-como-fazer-um-cronograma/>

Características de um bom engenheiro

- RESOLUÇÃO CNE/CES 11, DE 11 DE MARÇO DE 2002
- Procurar por estudos sobre “o engenheiro do futuro”, o que “a indústria busca em um engenheiro” e o que “a sociedade espera do engenheiro”.

Conceitos de Física com foco em Mecânica

- <https://www.youtube.com/playlist?list=PLzjR7HXQnrcf1rHb6E33Rbo5xP7ZbMM6s> (revisão de cinemática do segundo grau)
- <https://www.youtube.com/playlist?list=PLzjR7HXQnr5texPyBTomAFef7oN2Bd0> (revisão de dinâmica do segundo grau)
- RESNICK, R.; WALKER, J.; HALLIDAY, D. Fundamentos de Física, volume 1: Mecânica 9ª edição; Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- NUSSENZVEIG, H. M. Curso de Física Básica volume 1 Mecânica 1ª edição; São Paulo: Edgard Blcher LTDA, 1996.
- YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. Física I: Mecânica, Sears & Zemansky; São Paulo: Addison Wesley, Pearson, 2008.
- <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html> (em *Mechanics*)
- <https://pt.khanacademy.org/science/physics> (diversos vídeos)
- <https://www.youtube.com/watch?v=whB7IX3NQpg&list=PLF5913294770697BF> (mecânica dos sólidos em vídeo-aulas)

Funcionamento de uma bicicleta

- <https://www.youtube.com/watch?v=2Y4mbT3ozcA> (equilíbrio)
- <https://www.youtube.com/watch?v=oZAc5t2lkvo> (equilíbrio)
- <http://www.technologystudent.com/gears1/gearat1.htm> (marchas)
- <http://mtbbrasil.com.br/2015/07/26/a-importancia-da-geometria-na-construcao-dos-quadros-de-bicicleta/> (noções práticas sobre o quadro)

- <http://www.revistabicicleta.com.br/bicicleta.php?freios&id=4051> (guia prático sobre freios)
- <https://audaxsp.wordpress.com/dicas/> (resumo prático dos componentes)
- <http://www.sheldonbrown.com/> (informações práticas sobre componentes e seus funcionamentos)

Dinâmica de bicicletas

- ASTROM, KLEIN e LENNARTSSON, Bicycle Dynamics and Control, de, 2005. Pode ser encontrado em: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1499389>
- <https://www.youtube.com/watch?v=2Y4mbT3ozcA> (Why bicycles do not fall: Arend Schwab at TEDx Delft)
- Aparatos educacionais do Laboratório de Desenvolvimento de Sistemas Mecatrônicos (LDSM) conforme descrito no capítulo 3 deste trabalho.
- Capítulo 2 deste trabalho.

Ecologia e Meio-Ambiente

- BRAGA, B.; HESPANHOL, I.; CONEJO, J. G. L. Introdução à Engenharia Ambiental; São Paulo: Prentice Hall, 2005.
- CALIJURI, M. C.; CUNHA, D. G. F. Engenharia Ambiental: Conceitos, Tecnologia e Gestão; Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.
- VESILIND, P. A.; MORGAN, S. M. Introdução à Engenharia Ambiental, Tradução da 2ª Ed. Norte - Americana; São Paulo: CENGAGE LEARNING, 2011.
- MACEDO, R. K. Ambiente e Sustentabilidade Metodologias para Gestão; Rio de Janeiro: LTC, 2015.

E2 – Ferramentas Disponíveis

Com exceção de programa para edição de textos, as ferramentas aqui apresentadas não precisam ser utilizadas, haja vista que seus usos podem ser por vezes demasiadamente complexos. No entanto é aconselhada a familiarização gradual com tais ferramentas (ou ferramentas análogas disponíveis no mercado), pois seu domínio facilitará as tarefas para as quais são dedicadas. Cabe ressaltar que tais ferramentas são recorrentemente requisitadas no meio profissional.

- MS Word para o relatório
- MS Excel para cálculos, planilhas e tabelas
- MS Powerpoint para apresentação
- MS Project para construção e acompanhamento do cronograma
- CorelDRAW ou InDesign para desenho artístico
- Adobe Photoshop para edição e tratamento de imagens
- AutoCAD ou Solidworks para desenho técnico

Lembrete: ainda que a internet seja um grande repositório de dados, estes somente se transformam em informação quando são filtrados. Em outras palavras, quando se encontra a “agulha no palheiro” neste universo, o dado “capturado” somente pode ser considerado uma informação a ser utilizada após a verificação de sua pertinência, aplicabilidade e veracidade.

F – Avaliações: a média das notas individuais será igual à nota final do grupo.

Nota final de cada aluno = F2 do aluno + F1-Média das F2 dos componentes do grupo

F1 – Nota do Grupo (dadas pelo docente e/ou especialista):

- Adequação do projeto à proposta (25%)
- Qualidade e conteúdo da apresentação (25%)
- Qualidade e conteúdo do relatório (25%)
- Cumprimento do cronograma proposto (25%)

F2 – Nota parcial de cada membro do grupo:

- Avaliação individual (25%) – dada pelo docente
- Participação nas equipes (25%) – dada pelo docente
- Avaliação dos pares (25%) – dada pelos demais discentes do grupo
- Autoavaliação (25%) – dada pelo discente

A nota final de cada aluno dependerá do desempenho de seu grupo e de seu desempenho dentro do grupo.

Exemplo: Grupo 1 se ateve à proposta (nota 10), fez uma boa apresentação (nota 8), entregou um relatório razoável (nota 7) e

conseguiu cumprir a maior parte do cronograma (nota 9). A nota do grupo ficou então em 8,5.

O aluno 1, membro do Grupo 1, pelo entendimento de seu tutor, teve uma evolução muito boa (nota 8,5), mas não participou tanto do grupo (nota 6,5). Seus colegas sentiram sua ausência apesar de suas contribuições pontuais terem sido boas (nota 7) e ele reconheceu que poderia ter se dedicado mais ao projeto, mas achou que suas ideias foram cruciais (nota 8). Sua nota parcial é 7,5.

Da mesma forma, os outros integrantes do Grupo 1 foram avaliados, ficando com as seguintes notas parciais:

- Aluno 2 – 8
- Aluno 3 – 9,7
- Aluno 4 – 8,2
- Aluno 5 – 6
- Aluno 6 – 4,8
- Aluno 7 – 9,3
- Aluno 8 – 6,5

A média dos alunos deu 7,5, um ponto abaixo da média dada para o grupo. Com isso, as notas finais dos alunos serão um ponto acima (nota máxima igual a 10, mínima igual a zero), ou seja, as notas finais dos alunos serão:

- Aluno 1 – 8,5
- Aluno 2 – 9
- Aluno 3 – 10
- Aluno 4 – 9,2
- Aluno 5 – 7
- Aluno 6 – 5,8
- Aluno 7 – 10
- Aluno 8 – 7,5

F* - Avaliação (alternativa) – deve ser escolhida uma das duas formas de avaliação para figurarem no caderno do estudante e é aconselhado que não se altere frequentemente a forma de avaliação, para que se torne clara. A primeira forma é uma tentativa de refletir a nota do grupo para cada integrante, de acordo com seus esforços individuais, mas a segunda é mais simples.

F1 – Adequação do projeto à proposta (15%)

F2 – Qualidade e conteúdo da apresentação (15%)

F3 – Qualidade e conteúdo do relatório (15%)

F4 – Cumprimento do cronograma proposto (15%)

F5 – Avaliação individual (10%)

F6 – Participação nas equipes (10%)

F7 – Avaliação dos pares (10%)

F8 – Autoavaliação (10%)

Obs.: as notas F1 a F6 são atribuídas pelo docente/especialista.

6.1.1.2.

Apostila do tutor

I – Recomendações gerais

A primeira semana deve ser utilizada para as apresentações (dos temas, das expectativas e dos envolvidos), definições de datas importantes, cronograma institucional (total de encontros, feriados, dias dedicados às apresentações) e também para descrever como serão feitas as avaliações.

Serão dois encontros semanais onde os alunos receberão tarefas individuais (que eles farão fora do horário letivo) e em grupo (nos encontros ou em momentos reservados nas salas destinadas para tal uso).

II – Objetivos de ensino

Pretende-se abordar a profissão, as características de um bom engenheiro e suas áreas de atuação. O projeto de uma bicicleta será utilizado como referência para exemplificar as fases de um produto (planejar, projetar, executar, vender, dar suporte e manutenção, reformar, ampliar e descartar), apresentando as características básicas das bicicletas, seus subsistemas e sua dinâmica rudimentar (mencionando que uma boa revisão de mecânica newtoniana de segundo grau é valiosa), mas também aproveitando para introduzir habilidades e atitudes como planejamento e a gestão de projetos de engenharia, apresentação oral e escrita do projeto, trabalho em equipe e aspectos ligados a impactos socioambientais - sempre ressaltando a importância da integração com a indústria.

Tais habilidades e atitudes deverão ser aprofundadas aos poucos no decorrer da vida acadêmica do aluno, em todos os projetos. O intuito não é requerer dos recém-chegados o domínio de competências tão complexas em somente um semestre letivo. Não se deve esquecer que um projeto em PBL

deve ser desafiador o suficiente para criar entusiasmo, mas de ambições controladas, para não correr o risco de causar a frustração do insucesso.

Cabe lembrar que o papel do tutor não é o de dar as respostas, mas sim o de garantir que os estudantes sigam o caminho certo para alcançá-las.

III – Esboço do cronograma

III.1 – Primeira semana

No primeiro encontro, a primeira hora deve ser dedicada às apresentações e para ler o histórico (tópico A da apostila do aluno) junto à turma, discutindo os termos que são levantados como dúvida. Além de dúvidas de vocabulário, temas que também podem vir à tona são: ecologia, impacto e meio-ambiente; engenheiro do futuro; possíveis papéis de um engenheiro em uma fábrica (além do desenvolvimento de produtos).

Não haverá aqui muito tempo para o aprofundamento destas questões; o objetivo é criar nos discentes a consciência de que ecologia, impacto e meio-ambiente são temas atuais e importantes, mas principalmente discutir o que a sociedade e as empresas esperam de um engenheiro nos dias atuais. Também é importante desmistificar a profissão, falando que uma parcela pequena dos engenheiros desenvolve no dia-a-dia cálculos e projetos avançados e de alta tecnologia, e que a maioria será envolvida em funções de gerenciamento de pessoas e projetos onde seu modo de pensar de engenheiro ajudará a solucionar problemas rotineiros de forma organizada, metódica e ao mesmo tempo criativa. Deve-se também ressaltar que a forma com que o engenheiro apresenta essas soluções para os demais é crucial para aceitação e consequente aplicação da mesma.

É recomendável instigar a discussão dos campos de atuação típicos para um engenheiro, visto que este deverá estar apto a atuar nas diversas fases de um produto, além de vários outros campos que há algumas décadas eram vistos atípicos, como mercado financeiro e cargos de gerência (este se tornando cada vez mais comum).

Na segunda parte deste primeiro encontro, deve-se separar um tempo para desenvolver junto aos alunos um “brainstorming” (tempestade de ideias) sobre quais os subsistemas que compõem a bicicleta (uma parte da sexta pergunta). Neste momento o tutor deve atentar para que os discentes não cheguem a dissecar a bicicleta por cada um de seus

componentes (cada parafuso e arruela) e sim pelos seus subsistemas. Isso não deve durar mais de meia hora.

Os subsistemas são: guidão e garfo, quadro, transmissão e marchas, freios, mecanismos das suspensões e rodas/pneus. Após o estabelecimento destes subsistemas, o tutor deve pedir para cada aluno escolher um entre eles (deixando-os livres para escolher, desde que o número de integrantes em cada subsistema seja equilibrado) e passar como tarefa individual para a próxima aula que os alunos procurem entender os princípios físicos do funcionamento dos subsistemas, que deverão ser apresentados a todos no segundo encontro desta primeira semana. Não é esperado neste estágio o domínio da modelagem físico-matemática de cada componente. O objetivo é desenvolver nos alunos o entendimento físico do funcionamento de cada subsistema, para que, mais à frente, quando adquirirem o ferramental apropriado, saibam aplicá-lo corretamente.

A última meia hora deve ser utilizada para dividir os alunos nas equipes definitivas, cada uma com no máximo 10 alunos. Esta segunda divisão da turma tem o intuito de formar grupos com um ou dois “especialistas” de cada subsistema (todos os subsistemas devem ter pelo menos um representante), montando assim grupos que deverão ter integrantes que entendam de cada subsistema da bicicleta.

O tutor deve falar brevemente sobre o cronograma que cada grupo (definitivo) deve desenvolver, apresentando o calendário de encontros previstos no semestre e ressaltando a importância de o cronograma respeitar o que foi pedido. Em outras palavras, deve-se prever a resposta de cada uma das perguntas do item C e ao mesmo tempo o desenvolvimento do projeto da bicicleta, lembrando que a penúltima semana deve ser separada para terminarem o protótipo/relatório final e a última semana será dedicada às apresentações aos avaliadores.

Esta tarefa será a primeira que deverá ser desenvolvida em equipe, fora do horário dos encontros semanais, mas antes do próximo encontro. Como não precisarão de recursos avançados para esta tarefa (editor de texto ou planilha bastam), não há a necessidade de reserva de sala especial ou laboratório. Deve-se aconselhar que os alunos separem de uma a duas horas para desenvolver isso em grupo.

O segundo encontro desta primeira semana deve começar pela demanda dos cronogramas, pois o funcionamento dos subsistemas

analisados deverá consumir bastante tempo e encaixar-se-á melhor ao ocupar o tempo restante.

Como não foram discutidas previamente metodologias e ferramentas para desenvolver e acompanhar cronogramas, é de se esperar que os alunos voltem com dúvidas ou com tabelas simples e pouco descritivas. Aqui se abre a oportunidade de discutir brevemente as perguntas C3 e C4, e abordar a pergunta C5.

Para auxiliá-los no entendimento da organização e metodologia de trabalho no campo da engenharia, o tutor deve discutir com os alunos fases gerais de um projeto, como:

- projeto conceitual (necessidade a atender, solução para problema, encomenda de cliente ou visão de futuro);
- planejamento (Estudo de Viabilidade Técnica e Econômica (EVTE) e cronograma);
- projeto detalhado (cronograma detalhado, detalhes do produto, divisões de tarefas por equipes);
- simulação computacional, produção de protótipo e testes;
- produção.

Os alunos devem ser lembrados de que este projeto tem como requisito as três primeiras fases e caso alguma proposta no final seja escolhida pelo fabricante de bicicletas X, aí sim deverão ser desenvolvidas as duas últimas fases.

Como tarefa individual deve ser proposta pesquisa de como planejar e gerenciar um projeto de engenharia, quais as ferramentas e metodologias disponíveis e qual delas melhor se adequa a este projeto.

Logo após, os alunos devem ser agrupados pelos subsistemas estudados e orientados para a apresentação sucinta de seus funcionamentos, incentivando que eles complementem as ideias uns dos outros, mas sempre respeitando o espaço para cada um expor o que encontrou. Se for identificada alguma dificuldade de compreensão do princípio físico de funcionamento de algum dos subsistemas, pode ser aconselhado algum material explicativo adicional ou até mesmo a utilização de uma bicicleta para melhorar a sua visualização.

Caso exista disponível algo semelhante ao Laboratório de Desenvolvimento de Sistemas Mecatrônicos apresentado aqui no capítulo 3, uma visita a tal laboratório pode ser bastante proveitosa (em horário a

agendar fora do horário dos encontros) para os grupos que ainda tiverem dificuldades, já que os aparatos educativos ali idealizados facilitam a visualização de várias propriedades das bicicletas.

Através dessa atividade será possível criar a noção de especialista, onde aqueles que se interessaram e aprofundaram no subsistema de seu grupo demonstrarão aos demais, no segundo encontro, serem detentores de conhecimento valioso.

Neste momento cabe provocar temas atuais que envolvem o exercício da profissão, como:

- ética profissional;
- trabalho em equipe – reconhecer liderança e conhecimento;
- preocupação com meio-ambiente e segurança – o desafio da saúde econômica;
- uso intenso de tecnologia – como ferramenta, não como solução;
- globalização de recursos (materiais e humanos) e mercado – desafios e benefícios;
- resultado ótimo em comparação ao suficiente – quando escolher um ou outro;
- teoria e prática – necessidade de simplificação para modelagem.

Como tarefa de grupo, os discentes deverão retornar na semana seguinte com uma proposta de bicicleta (projeto conceitual rudimentar) para o desenvolvimento de seu projeto. Por terem um final de semana entre os encontros, a carga de trabalho pode ser um pouco maior que aquela dada para este encontro.

III.2 – Segunda semana

O terceiro encontro, agora já na segunda semana letiva, deve começar com a apresentação de cada proposta, incentivando troca de ideias e comentários. Conflitos poderão surgir e saber mediá-los para que a solução seja encontrada pelos próprios alunos é de suma importância. Caso haja disputa de quem é o detentor original de alguma ideia, discutir sobre ética profissional, segurança da informação, benchmarking e espionagem industrial pode ser muito proveitoso.

Na segunda metade da aula, todos os alunos devem ser envolvidos em outro “brainstorming”, desta vez sobre a pergunta C7, onde deverão ser levantadas, entre outras, características como manobrabilidade,

estabilidade e confiabilidade. Estas duas últimas podem ser aglutinadas em uma só característica, que é a segurança. Deve-se passar como tarefa individual o entendimento destas três propriedades e ressaltar a importância da compreensão de quais as características de uma bicicleta que dão estabilidade a ela.

Após terminado este exercício com todos, deve-se voltar aos grupos e pedir que os alunos discutam entre eles o que encontraram sobre planejamento e gerenciamento de projeto e que, como tarefa em grupo, revisem o cronograma e apresentem sua versão final no próximo encontro. É importante enfatizar para os alunos que o cumprimento do cronograma entregue será uma das formas de avaliação: de forma análoga a como se procede em uma empresa o cumprimento de prazos é de suma importância para o bom andamento de um empreendimento.

Serão pontos de avaliação: a adequação do projeto à proposta, a qualidade do relatório e da apresentação; a participação em grupo (dada pelo tutor sobre a participação de cada indivíduo no seu grupo), avaliação individual (dada pelo tutor sobre o que percebeu de seu progresso), a avaliação de pares (todos os integrantes em um grupo devem avaliar os demais integrantes) e a autoavaliação.

No último encontro desta semana devem-se revisar, junto aos grupos, seus cronogramas, atentando para a viabilidade e exequibilidade dos tempos e tarefas propostas, dentro dos limites já estabelecidos pelo cronograma institucional. Nesta ocasião se abre uma oportunidade para a discussão sobre os requisitos impostos pela empresa: um projeto factível (viável tanto técnica quanto economicamente), com especificações claras e desenhos. Fica como tarefa individual a pesquisa sobre o que é um EVTE e quais são as ferramentas mais comuns para desenhos de engenharia (CAD). E finalmente cabe esclarecer aos alunos que o trabalho final deverá estar nos moldes da resposta à pergunta C5 (relatório e apresentação).

III.3 – Terceira semana em diante

A partir deste momento, com o cronograma validado, a tarefa será acompanhar os alunos, mediar os possíveis conflitos, auxiliá-los na tentativa de responder à pergunta C8 e conseguir desenvolver uma boa apresentação, junto com um bom relatório de uma proposta “inovadora” de bicicleta.

As dúvidas dos alunos devem ser utilizadas para guiá-los a novas fontes de informação, aconselhando-os também a ter conversas com professores que sejam especialistas nos assuntos em questão.

Recomenda-se o acompanhamento do revezamento nas funções (coordenador, secretário e demais integrantes da equipe, conforme “Papéis dos Diversos Atores” em 4.2.7) e o desenvolvimento do relatório de projeto juntamente com o próprio desenvolvimento do projeto.

IV – Avaliação

São pontos de atenção para a avaliação (citados no item F do caderno do aluno):

IV.1 - Adequação do projeto à proposta – este quesito deve ter acompanhamento contínuo, para que desvios observados sejam corrigidos o quanto antes. Ele é a medida de quanto o projeto escolhido pelo grupo está dentro do solicitado na proposta, assim como de quanto ele ajuda a responder às perguntas colocadas (item C do caderno do aluno). A nota deve ser dada observando os conteúdos do relatório e da apresentação, mas também do que foi observado nos encontros periódicos.

IV.2 - Qualidade e conteúdo da apresentação – a apresentação ao público (docentes, especialistas e/ou comunidade) deve servir para avaliar quão bem os alunos conseguem expor seu projeto, não se atendo somente ao conteúdo, mas também à forma. Uma postura profissional deve ser encorajada (sem tolher a criatividade). Deve-se lembrar de que são calouros e devem ser encorajados a se desenvolver, o que significa avaliá-los de acordo com o grau de competência deles esperado.

IV.3 - Qualidade e conteúdo do relatório – no decorrer do semestre, durante os encontros semanais, conteúdos e formas de relatórios de projeto de engenharia devem ser recorrentemente discutidos. Além disso, a correção gramatical e a terminologia da área devem ser incentivadas e, portanto, devem ser também avaliadas. Novamente cabe ressaltar que eles devem ser avaliados de acordo com o grau de competência deles esperado.

IV.4 - Cumprimento do cronograma proposto – já no final da segunda semana, durante o quarto encontro, cada equipe deverá entregar um cronograma de projeto. Ele deve especificar os grandes marcos (entregas ou fases), seus responsáveis, as tarefas a desenvolver

para cada um deles e seus prazos. O domínio e o reconhecimento de sua importância podem ser fracos e não devem ser muito exigidos neste primeiro momento. O importante é utilizar esta avaliação para destacar sua importância e seus pontos de melhoria.

IV.5 - Avaliação individual – o que deve ser medido aqui é o compromisso com as atividades individuais, assim como o progresso ou o desenvolvimento de cada aluno dentro dos objetivos traçados. São objetivos de aprendizagem deste projeto: desenvolver o sentimento físico dos subsistemas de uma bicicleta (conhecimento); introduzir o planejamento e a gestão de projetos de engenharia e aspectos de ecologia, impacto e meio-ambiente (atitude/conhecimento); desenvolver as capacidades de trabalhar em grupo e de fazer apresentação oral e escrita do projeto (atitude/habilidade).

IV.6 - Participação nas equipes – esta nota deve ser dada de acordo com a assiduidade de cada aluno aos encontros, sua participação ativa nas discussões e seu desempenho enquanto coordenador ou secretário da equipe (de acordo com item 4.2.7 - Papéis dos Diversos Atores).

IV.7 - Avaliação dos pares – cada integrante deve avaliar os demais integrantes do grupo. Não deve haver avaliação intergrupos, mas somente intragrupos. Os critérios que norteiam a avaliação de um aluno sobre o desempenho de seu colega devem ser: participação, compromisso e contribuição.

IV.8 - Autoavaliação – dada pelo próprio aluno, deve ser feita em conversa com o tutor, que deve chamar um a um para uma conversa de no máximo cinco minutos. A nota deve ser justificada e pode ser até questionada pelo tutor, mas a palavra final desta avaliação deve ser estritamente do discente.

6.1.1.3.

As origens deste projeto: um experimento real

Este projeto teve como base outro já aplicado pelo autor deste trabalho em uma turma de alunos do penúltimo ano do ensino médio que tinha interesse na profissão de engenheiro. O projeto foi desenvolvido como disciplina de Introdução à Engenharia na PUC-Rio no segundo semestre de 2012 ministrada

para tal público e seus resultados, de acordo com a avaliação dos alunos, foram acima do esperado.

O objetivo geral do projeto original foi ligeiramente diferente daquele aqui desenvolvido, já que o ciclo de encontros e palestras visou apresentar aos alunos a profissão de engenheiro através do desenvolvimento de um projeto e da construção de uma bicicleta, perpassando a estrutura de cursos dos departamentos de engenharia da PUC-Rio.

Ao total foram ministradas 10 aulas semanais (sendo duas de três horas de duração e o restante de 2 horas de duração, totalizando 22 horas) e três participações em palestras (palestra inicial de apresentação do programa pretendido nas aulas, palestra de engenharia de controle e automação e palestra final para apresentação dos trabalhos).

Após a apresentação sucinta de cada aluno e de suas expectativas para o curso, foi requisitado do grupo o modelo mental do que um engenheiro faz em sua profissão e seus possíveis campos de atuação, para que pudessem ser identificados eventuais desvios e pontos que necessitavam de esclarecimento.

Através desta etapa, foi possível observar que é censo comum a base físico-matemática sólida do profissional, no entanto a grande maioria do grupo não tinha nenhum conhecimento da organização e metodologia de trabalho. Tal constatação foi base para traçar um roteiro de aula, que constava da abordagem desses temas através do desenvolvimento do projeto e da construção de uma bicicleta.

As primeiras noções exercitadas foram o trabalho em equipe e a aquisição de conhecimento. Para tal os alunos foram divididos em cinco grupos (de sete ou oito integrantes), cada qual responsável por um sistema da bicicleta: freios, suspensão, pneus, marchas (e pedais) e estrutura (quadro e guidão). Foram criados grupos em comunidade virtual para que a interação dos membros de cada grupo fosse facilitada e foi estimulada a busca por informações na internet, discutindo como filtrá-las. Os alunos foram incentivados a apresentar na aula seguinte, para o restante da turma, o conhecimento adquirido por cada grupo.

Através desta atividade, foi possível criar a noção de especialista, onde aqueles que se interessaram e aprofundaram no sistema de seu grupo demonstraram aos demais serem detentores de conhecimento valioso. Na segunda divisão da turma, o intuito foi formar três grupos (de 12 a 13 alunos) para o desenvolvimento de um projeto e a construção de uma bicicleta. Nesse momento aqueles alunos que mostraram conhecimento aprofundado de sistema específico foram valorizados e disputados pelos grupos. Ainda havia aqueles

que traziam conhecimento prévio, visto que já montavam suas próprias bicicletas, adquirindo os diversos componentes no mercado.

Duas aulas foram utilizadas para uma apresentação simplificada dos conceitos que envolvem a estabilidade de uma bicicleta, utilizando exemplos e experiências simples para explicar noções como efeito giroscópio, modelagem por pêndulo duplo invertido, ação do condutor sobre o guidão e o selim.

Nas aulas seguintes foram provocados temas atuais que envolvem o exercício da profissão, como:

- ética profissional;
- trabalho em equipe – reconhecer liderança e conhecimento;
- preocupação com meio-ambiente e segurança – o desafio da saúde econômica;
- uso intenso de tecnologia – como ferramenta, não como solução;
- globalização de recursos (materiais e humanos) e mercado – desafios e benefícios,
- resultado ótimo em comparação ao suficiente – quando escolher um ou outro;
- teoria e prática – necessidade de simplificação para modelagem.

Também foram discutidos os campos de atuação possíveis para um engenheiro, visto que ele está apto a atuar nas diversas fases de um produto (planejar, projetar, executar, vender, dar suporte e manutenção, reformar, ampliar e descartar), além de vários outros campos que podem ser vistos como desvios, como mercado financeiro e cargos de gerência. Noções de estágios de um produto e de gerenciamento (PDCA – Plan, Do, Check, Act) foram abordadas.

Para auxiliar os discentes no entendimento da organização e metodologia de trabalho no campo da engenharia, foram apresentados temas que envolvem um projeto de forma geral, como:

- projeto conceitual (necessidade a atender, solução para problema, encomenda de cliente ou visão de futuro);
- planejamento (EVTE e cronograma);
- projeto detalhado (cronograma detalhado, detalhes do produto, divisões de tarefas por equipes);
- simulação computacional, produção de protótipo e testes;
- produção.

Por fim, cada grupo começou a fazer o projeto de uma bicicleta, mas encontraram bastante dificuldade, principalmente de conhecimentos básicos de estática, de dinâmica e de ferramentas como CAD. Outro desafio foi conciliar as atividades regulares de suas escolas com o tempo e a dedicação que um projeto de engenharia, por mais simples que seja, demanda. Por esses motivos, somente a fase de projeto conceitual foi concluída, sendo que um grupo (do total de três) iniciou a fase de planejamento, conseguindo fazer um EVTE rudimentar (preço de mercado das peças necessárias e valor de mercado pretendido da bicicleta).

Ao final, para que pudessem perceber a falta que faz desenvolver todas as fases de um projeto até começar a execução do mesmo, foi proposta a construção de uma bicicleta de bambu a partir de uma bicicleta comprada no mercado. Essa bicicleta foi desmontada, seu quadro foi cortado, foram retiradas três partes e bambu foi encaixado no local (conforme Fig. 6.1). Mesmo em tarefa aparentemente tão simples, os alunos perceberam o quanto fez falta um maior planejamento e um projeto detalhado, resultando em vários retrabalhos, desperdícios e incerteza da qualidade do produto final.



Figura 6.1 – bicicleta com partes em bambu - Fonte: Elaborada pelo autor

Apesar dos desafios enfrentados e da não conclusão do projeto de uma bicicleta, foi possível observar que o objetivo geral foi em grande parte alcançado, visto que a maior parte dos alunos pôde ao final do período concluir

com maior certeza se desejava fazer a faculdade de engenharia (em especial mecânica) e principalmente se gostava da profissão.

A importância de todas as fases de desenvolvimento de um produto foi acentuada, esclarecendo então o valor da engenharia e do conhecimento adquirido na faculdade para embasar as diversas fases.

Ainda que voltada para um público distinto do almejado por esta tese, essa primeira experiência concreta e bem sucedida sinaliza a adequação da bicicleta como objeto apropriado para o desenvolvimento de projetos pedagógicos em engenharia aplicando a metodologia PBL.

6.1.2.

Bicicleta para adulto aprendiz (para alunos do ciclo profissional)

Este projeto está voltado para os alunos de Engenharia Mecânica e de Controle e Automação de quinto período, ou seja, que terminaram o ciclo básico e presumivelmente já têm boa formação físico-matemática, além de experiência em quatro outros projetos, o que significa boa familiaridade com o método PBL e alguma desenvoltura com competências conhecidas como “soft skills”. Conforme citado por diversos autores, como SLOUGH e MILAM (2013), CAMPOS *et al.* (2012), KOLMOS *et al.* (2006) e POWELL e WEENK (2003), algumas delas são de mais difícil assimilação e por isso devem ser desenvolvidas no decorrer do percurso acadêmico, como é o caso de trabalho em equipe, liderança e comunicação escrita e oral.

Neste projeto pretende-se discutir a estática e a dinâmica da bicicleta, introduzindo conceitos de estabilidade dinâmica e de modelagem, e aprofundando habilidades e atitudes como o planejamento e gestão de projetos de engenharia, conceitos de mercado, importância da integração com a indústria e apresentação do projeto.

Por serem assuntos de complexidade elevada, aconselha-se disponibilizar minicursos (de até 10 horas cada) específicos de dinâmica de corpos rígidos, metodologia de determinação do Lugar Geométrico das Raízes (incluindo transformada de Laplace) e modelagem por Grafo de Ligação e por Fluxo de Potência.

6.1.2.1. Apostila do estudante

A - Histórico: com a crescente procura por meios de transporte “ecologicamente corretos”, consequência de maior conscientização do impacto humano sobre o meio ambiente, o fabricante multinacional de bicicletas X contratou a empresa de consultoria Y para observar se havia um nicho de mercado ainda pouco explorado.

Após pesquisas de mercado em nível nacional e internacional, ouvindo mais de 10 mil pessoas de diferentes idades, a consultoria Y concluiu que há, nas grandes cidades, muitas pessoas na faixa etária entre 30 e 45 anos que não aprenderam a andar de bicicleta, pois fazem parte de uma geração bastante urbanizada e voltada para a utilização do carro. Com a emergência da consciência ecológica, essa geração, ao buscar novos estilos de vida, passou a almejar tal aprendizado.

Essas pessoas afirmaram que não teriam começado a tentar aprender por não estarem dispostas a pagar o preço dos percalços do processo natural de aprendizagem (tombos, arranhões, ferimentos, etc.).

A fábrica X, não tendo em seu quadro nenhum engenheiro de desenvolvimento de novos produtos com conhecimento suficiente para solucionar a questão, contratou o escritório de engenharia Z para desenvolver uma proposta de bicicleta atrativa para um público classe B, entre 30 e 45 anos, que ainda não saiba andar de bicicleta.

A empresa Z é nova no mercado (menos de cinco anos de atuação), mas já ganhou destaque por seu quadro de engenheiros jovens e inovadores, sendo conhecida por projetos ousados e “out of the box” e aceitou o desafio de desenvolver uma bicicleta para adultos iniciantes, que seja mais fácil de aprender e não provoque quedas constantes em seus aprendizes.

B – Projeto: enquanto engenheiros da Z, vocês foram incumbidos de desenvolver uma bicicleta para adulto que auxilie no aprendizado. Para impressionar seu primeiro grande cliente, o presidente e proprietário da Z colocou quatro equipes trabalhando neste projeto e espera que, dentro do prazo estipulado de três meses, possa apresentar para a X quatro projetos diferentes de qualidade, com seu detalhamento, desenhos e se possível protótipo.

C – Perguntas a serem pesquisadas

C1 – Quais são as características principais de uma boa bicicleta e como defini-las?

C2 – Como modelar a dinâmica de uma bicicleta para determinar se ela tem essas características?

C3 – O que podemos fazer para aumentar a estabilidade da bicicleta?

C4 – Quais tecnologias existentes já são aplicadas para aumentar a estabilidade de bicicletas e quais ainda podem ser aplicadas?

C5 – Quais são as características de um relatório de projeto e como apresentá-lo?

C6 – Qual projeto de bicicleta para adulto aprendiz será proposto? O que tem de diferente?

D – Cronograma

D1 – A primeira semana servirá para dividir os grupos, responder dúvidas surgidas quanto aos termos aqui mencionados e para a criação do cronograma do projeto.

D2 – Façam um planejamento de projeto e criem um cronograma que preveja a resposta a cada uma das perguntas acima ao mesmo tempo em que desenvolvem o projeto da bicicleta conforme encomendado. Este planejamento e este cronograma deverão ser discutidos e aceitos pelo tutor até o primeiro encontro da segunda semana.

D3 – Separem a penúltima semana para terminar o protótipo (se houver), a apresentação e o relatório final.

D4 – A última semana será dedicada às apresentações aos avaliadores (professores e/ou profissionais da empresa interessada)

E – Recursos

E1 - Fontes indicadas

As diversas fontes de informação aqui indicadas pretendem somente dar um norte às pesquisas, mas não exaurem o assunto e nem eximem os alunos de outras buscas.

Planejamento e Gerenciamento de Projetos (espera-se que o aluno já tenha visto estas fontes em projetos anteriores)

- https://pt.wikipedia.org/wiki/Planejamento_de_projeto

- https://pt.wikipedia.org/wiki/Ger%C3%A7%C3%A3o_de_projetos

- https://pt.wikipedia.org/wiki/Project_Management_Body_of_Knowledge
- ISO 21500
- A Guide to the Project Management Body of Knowledge - 4ª Edição (Guia PMBok® - 4th Edition)

Dinâmica e modelagem

- BEER, F.P.; JOHNSTON, E.R.; CLAUSEN, W.E. Dinâmica 7a. Edição; Rio de Janeiro: McGrawHill, 2006.
- SANTOS, I.F. Dinâmica de Sistemas Mecânicos; São Paulo: Makron B, 2000.
- BURTON, T.D. Introduction to Dynamic System Analysis; New York: McGraw-Hill, 1994.
- ROSENBERG, R.C; KARNOPP, D.C. Introduction to Physical System Dynamics; New York: McGraw-Hill, 1983.
- SPERANZA NETO, M., "Procedimento para Acoplamento de Modelos Dinâmicos Através do Fluxo de Potência", XV COBEM, Águas de Lindóia, 1999. Disponível em: <http://www.abcm.org.br/app/webroot/anais/cobem/1999/pdf/AAABIJ.pdf>

Exemplo de modelagem de bicicleta comercial e estabilidade

- ASTROM, KLEIN e LENNARTSSON, Bicycle Dynamics and Control, de, 2005. Pode ser encontrado em: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1499389>
- <http://bicycle.tudelft.nl/schwab/Bicycle/>
- <https://www.youtube.com/watch?v=2Y4mbT3ozcA> (Why bicycles do not fall: Arend Schwab at TEDx Delft)
- Aparatos educacionais do Laboratório de Desenvolvimento de Sistemas Mecatrônicos (LDSM) conforme descrito no capítulo 3 deste trabalho.
- Capítulo 2 deste trabalho

Método de determinação da estabilidade dinâmica

- OGATA, K. Engenharia de Controle Moderno 3ª Ed; Rio de Janeiro: Prentice Hall do Brasil, 1997.
- SOUZA, A F. D. Design of Control Systems; New Jersey: Prentice Hall, 1988.

- Os 25 primeiros vídeos de: https://www.youtube.com/watch?v=0Bc_BHxw78s&list=PLUMWjy5jgHK1NC52DXXrriwihVrYZKqjk&index=1

E2 – Ferramentas Disponíveis

As duas últimas ferramentas aqui apresentadas não precisam ser utilizadas, haja vista que seus usos podem ser por vezes demasiadamente complexos. No entanto é aconselhada a familiarização gradual com tais ferramentas (ou ferramentas análogas disponíveis no mercado), pois seu domínio facilitará as tarefas para as quais são dedicadas. Cabe ressaltar que tais ferramentas são recorrentemente requisitadas no meio profissional.

- MS Word para o relatório
- MS Excel para cálculos, planilhas e tabelas
- MS Powerpoint para apresentação
- MS Project para construção e acompanhamento do cronograma
- CorelDRAW ou InDesign para desenho artístico
- Adobe Photoshop para edição e tratamento de imagens
- AutoCAD ou Solidworks para desenho técnico
- Simulink/Matlab para modelagem e simulação por métodos numéricos
- Ansys para modelagem e simulação por elementos finitos

F – Avaliações: a média das notas individuais será igual à nota final do grupo.

Nota final de cada aluno = F2 do aluno + F1-Média das F2 dos componentes do grupo

F1 – Nota do Grupo (dadas pelo docente e/ou especialista):

- Adequação do projeto à proposta (25%)
- Qualidade e conteúdo da apresentação (25%)
- Qualidade e conteúdo do relatório (25%)
- Bom gerenciamento do projeto e cumprimento do cronograma proposto (25%)

F2 – Nota parcial de cada membro do grupo:

- Avaliação individual (25%) – dada pelo docente
- Participação nas equipes (25%) – dada pelo docente

Avaliação dos pares (25%) – dada pelo discente

Autoavaliação (25%) – dada pelo discente

A nota final de cada aluno dependerá do desempenho de seu grupo e de seu desempenho dentro do grupo.

Exemplo: Grupo 1 se ateuve à proposta (nota 9), fez uma boa apresentação (nota 8), entregou um relatório razoável (nota 7) e conseguiu cumprir a maior parte do cronograma (nota 8). A nota do grupo ficou então em 8.

O aluno 1, membro do Grupo 1, pelo entendimento de seu tutor, teve uma evolução muito boa (nota 8), mas não participou tanto do grupo (nota 6). Seus colegas sentiram sua ausência e falta de comprometimento (nota 6) e ele reconheceu que poderia ter se dedicado mais ao projeto e à equipe (nota 6). Sua nota parcial é 6,5.

Da mesma forma, os outros integrantes do Grupo 1 foram avaliados, ficando com as seguintes notas parciais:

Aluno 2 – 9

Aluno 3 – 9,7

Aluno 4 – 8,2

Aluno 5 – 9,2

Aluno 6 – 7,6

Aluno 7 – 9,3

Aluno 8 – 8,5

A média dos alunos deu 8,5, meio ponto acima da média dada para o grupo. Com isso, as notas finais dos alunos serão meio ponto abaixo (nota máxima igual a 10, mínima igual a zero), ou seja, as notas finais dos alunos serão:

Aluno 1 – 6

Aluno 2 – 8,5

Aluno 3 – 9,2

Aluno 4 – 7,7

Aluno 5 – 8,7

Aluno 6 – 7,1

Aluno 7 – 8,8

Aluno 8 – 8

F* - Avaliação (alternativa) – deve ser escolhida uma das duas formas de avaliação para figurarem no caderno do estudante e é aconselhado que não se altere frequentemente a forma de avaliação, para que se torne clara. A primeira forma é uma tentativa de refletir a nota do grupo para cada integrante, de acordo com seus esforços individuais, mas a segunda é mais simples.

F1 – Adequação do projeto à proposta (15%)

F2 – Qualidade e conteúdo da apresentação (15%)

F3 – Qualidade e conteúdo do relatório (15%)

F4 – Bom gerenciamento do projeto e cumprimento do cronograma proposto (15%)

F5 – Avaliação individual (10%)

F6 – Participação nas equipes (10%)

F7 – Avaliação dos pares (10%)

F8 – Autoavaliação (10%)

Obs.: as notas F1 a F6 são atribuídas pelo docente/especialista.

6.1.2.2.

Apostila do tutor

I – Recomendações gerais

A primeira semana deve ser utilizada para as apresentações (dos temas, das expectativas e dos envolvidos), definições de datas importantes, cronograma institucional (total de encontros, feriados, dias dedicados às apresentações) e também para descrever como serão feitas as avaliações. Ressalte-se a importância de um relatório bem detalhado, lembrando que os discentes já têm experiência suficiente para fazer uma apresentação oral e escrita de nível profissional.

Serão dois encontros semanais e dever-se-á passar para os alunos tarefas individuais (que eles farão fora do horário letivo) e em grupo (nos encontros ou em momentos reservados nas salas destinadas para tal uso).

II – Objetivos de ensino

Pretende-se abordar áreas do conhecimento de engenharia como dinâmica de corpos rígidos, modelagem de sistemas mecânicos, controle de sistemas, discutindo principalmente o conceito de estabilidade (utilizando o Lugar Geométrico das Raízes), assim como o uso e a aplicação de tecnologia existente, sempre utilizando o projeto de uma bicicleta como exemplo, mas tendo

em mente a necessidade de generalização de tais conhecimentos, ou seja, sempre discutindo com o aluno como seria a aplicação deles em outros sistemas mecânicos, em outros projetos.

As habilidades e atitudes que se pretendem introduzir são a utilização de softwares de modelagem e simulação, a busca por tecnologia existente aplicável e se possível empreendedorismo. Pretende-se também aprofundar planejamento e gestão de projetos de engenharia, liderança, trabalho em equipe e apresentação oral e escrita do projeto.

Nunca se deve esquecer que um projeto em PBL deve ser desafiador o suficiente para criar entusiasmo, mas de ambições controladas, para não correr o risco de causar a frustração do insucesso. Cabe sempre lembrar que o papel do tutor é o de um guia a garantir que os alunos sigam o caminho certo para alcançar os objetivos.

III – Esboço do cronograma

III.1 – Primeira semana

No primeiro encontro recomenda-se separar a primeira hora para as apresentações e para ler o histórico (tópico A da apostila do aluno) junto à turma, discutindo os termos que são levantados como dúvida. Além de dúvidas de vocabulário, temas que também podem vir à tona são: ecologia, impacto e meio-ambiente; nicho de mercado e empreendedorismo; controle e estabilidade, estática e dinâmica; emprego de tecnologia existente e estado da arte; desenho, modelagem e simulação.

Não haverá aqui muito tempo para o aprofundamento destas questões, o objetivo é criar neles a consciência de que ecologia, impacto e meio-ambiente são temas atuais e importantes; passar uma visão de que todo produto deve se encaixar num nicho de mercado (ou criar seu próprio, como o caso de alguns produtos da Apple, por exemplo); mas também discutir como buscar tecnologias já desenvolvidas para solucionar novos problemas. Um exemplo emblemático, apesar de ter sua veracidade questionada, foram as supostas soluções dadas para o problema da escrita em gravidade zero pelos norte-americanos e pelos russos.²³

²³ Enquanto os engenheiros da NASA dispenderam muito tempo e dinheiro desenvolvendo uma caneta que funciona nessas condições, os astronautas russos utilizaram o lápis, empregando

Na segunda parte deste primeiro encontro, um tempo deve ser dedicado para apresentar a primeira pergunta do tópico C e desenvolver junto aos alunos um brainstorming (tempestade de ideias) sobre estas características. As principais características para este projeto são: manobrabilidade, estabilidade (estática e dinâmica) e confiabilidade (as duas últimas podem ser agrupadas em segurança). Além destas, outras características podem vir à tona como: versatilidade e aplicação (passeio, “trekking”, corrida, etc.), transportabilidade (peso e tamanho), manutenibilidade²⁴ (facilidade e custo de manutenção), desempenho (aerodinâmica, perdas nas juntas e transmissão), conforto, assistência (motor elétrico ou a combustão), material utilizado, entre outras.

Neste momento abre-se a oportunidade de enfatizar a importância de os alunos atentarem para as características relevantes para este projeto e também de passar como tarefa individual para a próxima aula que eles entendam os princípios físicos e matemáticos das estabilidades estática e dinâmica, que deverão ser tema de discussão dentro dos grupos no segundo encontro desta primeira semana.

A última meia hora pode ser utilizada para dividir os grupos (máximo de 8 alunos) e lembrá-los a respeito do planejamento de projeto e do cronograma que cada grupo deve desenvolver, apresentando o calendário de encontros previstos no semestre. Visto que os alunos já estão no ciclo profissional, aconselha-se destacar a importância do planejamento e gerenciamento do projeto e o papel do cronograma neste quesito, lembrando que a penúltima semana deve ser separada para terminarem o protótipo/relatório final e a última semana será dedicada às apresentações aos avaliadores.

Esta tarefa será a primeira que deverá ser desenvolvida em equipe, fora do horário dos encontros semanais, antes do terceiro encontro. Como não precisarão de recursos avançados para esta tarefa (MS Word ou Excel), não há a necessidade de reserva de sala especial ou laboratório. Caso decidam, porém, pela utilização do MS Project (que deve ser incentivada), um laboratório com tal recurso deve ser disponibilizado.

assim uma tecnologia já existente (lápiz) para a solução de um novo problema (escrita na gravidade zero).

²⁴ Para este conceito, além da grafia utilizada, encontram-se também: manutenibilidade, manutabilidade e manutenibilidade. Cabe ressaltar que até o momento da publicação deste trabalho nenhum destes quatro termos foi reconhecido pela Academia Brasileira de Letras.

O segundo encontro desta primeira semana pode ser iniciado com a discussão nos grupos sobre o que os discentes encontraram quanto a controle e estabilidade e quais as ferramentas utilizadas para sua análise. Caso algum grupo tenha chegado a alguma ferramenta ou metodologia de determinação (e.g. LGR – Lugar Geométrico das Raízes), a sua apresentação para os demais pode ser bastante proveitosa.

Neste momento muitas dúvidas podem surgir, principalmente devido à complexidade matemática dos métodos. Deve-se aconselhar a busca da bibliografia indicada, dos vídeos (<https://www.youtube.com/playlist?list=PLUMWjy5jgHK1NC52DXXrriwihVrYZKqjk>) de Brian Douglas no Youtube e de minicursos, se houver. Há uma grande margem para aprendizagem neste campo, que será essencial para o projeto e também para a formação do futuro engenheiro e portanto este encontro poder-se-á resumir a somente esta tarefa, com possíveis tarefas individuais para o aprofundamento deste entendimento.

Caso haja tempo, deve-se iniciar uma breve discussão sobre modelagem de sistemas dinâmicos, perguntando aos alunos o que entendem do assunto e como pretendem modelar a bicicleta para depois poder analisar se seu modelo tem maior estabilidade quando comparada às bicicletas já existentes. Caso fique claro que ainda precisam aprofundar a discussão sobre estabilidade antes de começar este tema, esta tarefa pode ser postergada para a terceira aula.

III.2 – Segunda semana

O terceiro encontro, agora já na segunda semana letiva, deve se iniciar com a validação dos planejamentos de projeto e dos cronogramas, atentando para a viabilidade e exequibilidade dos tempos e tarefas propostas, dentro dos limites já estabelecidos pelo calendário institucional. A partir de então, seu gerenciamento e sua execução deverão ser acompanhados. Ressalte-se que o bom gerenciamento de projeto e o cumprimento do cronograma entregue serão avaliados, de forma análoga ao procedimento adotado em uma empresa. Isso não deve levar mais de meia hora.

Após esta validação, abre-se para discussão sobre a conceituação de estabilidade, suas metodologias e teorias. Caso ainda persistam dúvidas, aqueles que entenderam poderão auxiliar os que ainda têm dificuldades. Explicar é a melhor forma de tomar consciência do que

realmente se aprendeu e fixar este conhecimento. Esta atividade não deve levar mais de uma hora. Caso se observe que precisarão mais que isso, aconselhe-se que façam em outro momento, fora dos horários destes encontros periódicos.

No tempo restante, deve-se incentivar a discussão sobre modelagem de sistemas dinâmicos. Caso já se tenha feito uma introdução no encontro anterior, passa-se então para a verificação do que conseguiram encontrar. Caso tenham feito pesquisas individuais, deve-se incentivar a discussão em grupo e caso algum grupo tenha evoluído mais que outros (ou pelo contrário, algum grupo tenha ficado para trás), o compartilhamento das descobertas deve ser incentivado.

Para um maior aprofundamento individual no assunto, deve-se aconselhar o minicurso (se houver), a bibliografia citada (inclusive a modelagem da bicicleta comercial para comparação, como no capítulo 2 deste trabalho) ou material explicativo adicional. Mais à frente (em encontros futuros), caso os alunos tenham dúvidas pontuais em suas modelagens, uma boa oportunidade abrir-se-á para que seja procurado o auxílio de especialistas, devendo-se então indicar os docentes experientes na área para um agendamento de reunião consultiva da equipe com tal especialista.

Caso exista disponível algo semelhante ao Laboratório de Desenvolvimento de Sistemas Mecatrônicos apresentado aqui no capítulo 3, uma visita a tal laboratório pode ser bastante proveitosa (em horário a agendar fora do horário dos encontros) para que as equipes possam testar e validar algumas de suas hipóteses e modelagens, já que há diferentes aparatos educativos ali idealizados para tal fim.

No último encontro desta semana deve-se revisar o que os alunos sabem sobre modelagem de sistemas dinâmicos e estabilidade e passar como tarefa individual a pesquisa sobre como se pode aumentar a estabilidade (C3) e quais as tecnologias existentes (C4).

As características de um relatório de projeto e o método de apresentá-lo (pergunta C5) devem ser passados aos grupos, ressaltando a importância da qualidade do que vão apresentar, visto já serem de quinto período e que uma qualidade semiprofissional já é esperada tanto na apresentação quanto no relatório.

Pela falta de domínio de simulação computacional, a produção de protótipo ainda não deve ser exigida, mas caso se perceba que a equipe

tem fôlego para fazê-lo sem atrapalhar o desenvolvimento das outras tarefas, seu desenvolvimento não deve ser desestimulado.

III.3 – Terceira semana em diante

A partir deste momento, com o planejamento de projeto e o cronograma validados, a tarefa será acompanhar os alunos, mediar os possíveis conflitos e auxiliá-los na tentativa de responder à pergunta C6 e conseguir desenvolver uma proposta de bicicleta mais estável para que adultos possam aprender com poucas surpresas desagradáveis a conduzir este veículo.

As dúvidas dos alunos devem ser utilizadas para guiá-los a novas fontes de informação, aconselhando-os também que conversem com professores que sejam especialistas nos assuntos em questão.

Recomenda-se o acompanhamento nas funções (coordenador, secretário e demais integrantes da equipe, conforme “Papéis dos Diversos Atores” em 4.2.7) e o desenvolvimento do relatório de projeto juntamente com o próprio desenvolvimento do projeto.

IV – Avaliação

São pontos de atenção para a avaliação (citados no item F do caderno do aluno):

IV.1 - Adequação do projeto à proposta – este quesito deve ter acompanhamento contínuo, para que desvios observados sejam corrigidos o quanto antes. Ele é a medida de quanto o projeto escolhido pelo grupo está dentro do solicitado na proposta, assim como de quanto ele ajuda a responder às perguntas colocadas (item C do caderno do aluno). A nota deve ser dada observando os conteúdos do relatório e da apresentação, mas também do que foi observado nos encontros periódicos.

IV.2 - Qualidade e conteúdo da apresentação – a apresentação ao público (docentes, especialistas e/ou comunidade) deve servir para avaliar quão bem os alunos conseguem expor seu projeto, não se atendo somente ao conteúdo, mas também à forma. Uma postura profissional deve ser encorajada nos alunos (sem tolher a criatividade). Por já estarem no ciclo profissional, uma postura condizente deve ser exigida, o que significa avaliá-los de acordo com o grau de competência deles esperado.

IV.3 - Qualidade e conteúdo do relatório – no decorrer do semestre, durante os encontros semanais, conteúdos e formas de relatórios de projeto de engenharia devem ser recorrentemente discutidos. Além disso, a correção gramatical e a terminologia da área devem estar presentes e, portanto, devem ser também avaliadas. Novamente cabe ressaltar que eles devem ser avaliados de acordo com o grau de competência deles esperado.

IV.4 – Bom gerenciamento do projeto e cumprimento do cronograma proposto – já no início da segunda semana, durante o terceiro encontro, cada equipe deverá entregar o planejamento de projeto e um cronograma. Apesar de não ser ainda requisitado um nível profissional, o planejamento deve conter um inventário do trabalho a ser executado e deve identificar os recursos necessitados para executar cada tarefa do projeto assim como algumas dependências entre tarefas. Deverá também conter algumas condições para que o projeto seja completado e um cronograma, cujo cumprimento também deve ser acompanhado e avaliado.

IV.5 - Avaliação individual – o que deve ser medido aqui é o compromisso com as atividades individuais, assim como o progresso ou o desenvolvimento de cada aluno dentro dos objetivos traçados. São objetivos deste projeto: aprender métodos e ferramentas de modelagem de sistemas dinâmicos e de controle e estabilidade de sistemas (conhecimento); aprimorar o planejamento e gestão de projetos de engenharia (habilidade/conhecimento), assim como as capacidades de trabalhar em equipe e de fazer a apresentação oral e escrita do projeto (atitude/habilidade); ética profissional; constante busca de atualização profissional e consciência do impacto socioambiental da profissão (atitude).

IV.6 - Participação nas equipes – esta nota deve ser dada de acordo com a assiduidade de cada aluno aos encontros, sua participação ativa nas discussões e seu desempenho enquanto coordenador e como secretário da equipe (de acordo com item 4.2.7 - Papéis dos Diversos Atores).

IV.7 - Avaliação dos pares – cada integrante deve avaliar os demais integrantes do grupo. Não deve haver avaliação intergrupos, mas somente intragrupos. Os critérios que norteiam a avaliação de um aluno

sobre o desempenho de seu colega devem ser: participação, compromisso e contribuição.

IV.8 - Autoavaliação – dada pelo próprio aluno, deve ser feita em conversa com o tutor, que deve chamar um a um para uma conversa de no máximo cinco minutos. A nota deve ser justificada e pode ser até questionada pelo tutor, mas a palavra final desta avaliação deve ser estritamente do discente.

6.1.3. Bicicleta do futuro (para alunos de último ano)

A ênfase dada aos projetos de graduação em faculdades de engenharia em grande parte das universidades do país não é grande e pode ser comparada a quaisquer outras disciplinas, tanto no que diz respeito à sua carga de trabalho prevista (na PUC-Rio, por exemplo, é de 60 horas), quanto ao peso desprezível que tem para a nota final do aluno, já que representa menos de 2% da nota final, como no exemplo das engenharias aqui analisadas da PUC-Rio, onde este projeto vale quatro créditos em um currículo de 238 créditos totais.

A pequena importância demonstrada institucionalmente, assim como a falta de conexão com outras disciplinas, desestimula o engajamento e conseqüente empenho do aluno naquela que deveria ser sua melhor chance para consolidar seus conhecimentos e apresentar ao seu entorno (família, calouros, professores) as competências adquiridas. Mais que um coeficiente de rendimento (o conhecido e temido CR) alto, um projeto final de complexidade adequada bem executado demonstra aos interessados para além da academia (sociedade e mercado) as competências que aqueles (futuros) profissionais detêm.

Para aproveitar melhor essa oportunidade de aprendizado e de exposição do crescimento, ao contrário do que se faz no currículo tradicional, pretende-se tornar o projeto de graduação o principal projeto do portfólio dos alunos, encorajando-os à dedicação plena e à utilização do máximo de competências que adquiriram, dando ênfase àquelas que melhor dominam, mas compelindo-os a desenvolver todas para um patamar pelo menos aceitável.

Com este intuito, aconselha-se que este projeto em especial ocupe dois períodos consecutivos (os dois últimos previstos), para que os alunos possam não só lançar mão do máximo de competências desenvolvidas, mas também cumprir o maior número possível de fases de desenvolvimento de um produto.

Com o objetivo de facilitar a compreensão dos formandos sobre o quanto evoluíram e sobre o que aprenderam durante seu percurso acadêmico, passando-lhes assim a confiança de sua sólida formação, propõe-se aqui repetir a ideia geral do primeiro projeto em PBL a eles demandado, quando ainda eram calouros. Desta forma, ao olharem para trás e buscarem as memórias daquele primeiro projeto, poderão ver como saíram do estágio de jovens com boas ideias para profissionais de vasto ferramental que podem transformar aquelas ideias (ou outras ideias) em produtos ou soluções.

Por se tratar do último ano letivo, poderá haver ainda alguns poucos conhecimentos a serem aprendidos, mas habilidades e atitudes deverão já estar em fase de maturação, ou seja, todas as habilidades e atitudes pretendidas já deverão ter sido apresentadas e iniciadas em períodos anteriores, cabendo neste projeto quando muito, suas consolidações.

Como nesta fase os alunos já têm intimidade plena com o método, pois já passaram por pelo menos outros sete projetos, deve-se dar a eles liberdade de condução quase total, sendo papel do tutor muito parecido com o papel de um diretor de empresa, que acompanha junto ao seu gerente ou coordenador o desenvolver de um projeto, liberando verbas e outros recursos.

Neste momento é crucial orientar os discentes no sentido de que a busca por informações, conhecimentos e recursos dar-se-á sob sua total responsabilidade. Sendo assim, a parte da apostila destinada ao aconselhamento de recursos ficará propositalmente minimizada, restando nela somente forte recomendação para que os discentes assumam a responsabilidade por essa tarefa. Aqui é importante enfatizar que se trata da etapa final de um processo gradual, no qual os estudantes foram levados, projeto a projeto, a migrarem da postura de receptor para a de investigador de conhecimentos.

6.1.3.1. Apostila do estudante

A - Histórico: a cidade do Rio de Janeiro, por sua inclinação natural (geografia predominantemente plana) e cultural (população bastante ligada a hábitos saudáveis e com crescente consciência ecológica), foi escolhida pelo fabricante multinacional de bicicletas X para ser a sede de sua mais nova fábrica de bicicletas. As obras já começaram e eles estão com previsão de início de funcionamento para o primeiro semestre do próximo ano.

Além de um corpo de experientes profissionais, eles estão com diversas vagas em diferentes setores para engenheiros recém-formados e abriram junto às universidades da cidade uma competição que visa à seleção dos futuros empregados juniores.

O título da competição é: como seria a bicicleta do futuro?

Os requisitos dados são: grupo de no máximo dez alunos de último ano devem entregar um relatório e apresentar aos diretores da empresa um projeto factível (viável tanto técnica quanto economicamente), com breve análise de mercado, especificações detalhadas, desenhos, simulações e resultados. Um protótipo é desejável, mas não é obrigatório.

O projeto é bem aberto, não tem descrição clara e visa à contratação de jovens criativos, mas sabe-se também que esta empresa não preza só a criatividade, mas também competências como:

- planejar, supervisionar, elaborar e coordenar projetos de engenharia;
- comunicar-se eficientemente nas formas escrita, oral e gráfica;
- atuar em equipes multidisciplinares;
- compreender e aplicar ética e responsabilidade profissionais;
- avaliar o impacto de suas atividades no contexto social e ambiental;
- avaliar a viabilidade econômica de projetos de engenharia;
- assumir a postura de permanente busca de atualização profissional.

O salário é atraente (20% acima do mercado), as condições de trabalho são compatíveis com as melhores da Europa (35 horas semanais, seis semanas de férias), as oportunidades de crescimento profissional e de trabalho no exterior são grandes, visto se tratar de uma empresa multinacional em pleno crescimento.

Vocês já estão em seu último ano de Engenharia Mecânica ou Engenharia de Controle e Automação e têm que desenvolver um projeto de final de curso de forma que possa ser apresentado como produto nesta competição.

B – Projeto: foi aceito pelo departamento (incentivado na verdade) que o projeto de graduação atenda às especificações do concurso citado anteriormente.

C – Perguntas a serem pesquisadas

- C1 – Quais os diferentes tipos de bicicletas já existentes?
- C2 – Há um nicho de mercado aberto?
- C3 – Como posso atendê-lo da melhor forma?
- C4 – Qual o diferencial do meu projeto? Como destacá-lo?

D – Cronograma

D1 – A primeira semana servirá para dividir os grupos, responder dúvidas surgidas quanto aos termos aqui mencionados e a criar o cronograma do projeto.

D2 – Façam um planejamento de projeto e criem um cronograma que preveja a realização de todos os requisitos dados pelo fabricante X: estudo de viabilidade técnica e econômica (EVTE) do projeto, breve análise de mercado, especificações detalhadas, desenhos, simulações, resultados e se possível um protótipo. Atenção especial para o fato que este projeto é singular no que tange sua duração, já que deverá ser desenvolvido durante os próximos dois semestres. Tanto o planejamento quanto o cronograma deverão ser discutidos e aceitos pelo tutor até o segundo encontro da segunda semana.

D3 – Ao final do primeiro período um relatório parcial deverá ser entregue, apresentando as partes então concluídas e o estágio do que ainda deverá ser terminado.

D4 – Separem as últimas semanas para terminarem o protótipo (se possível), a apresentação e o relatório final.

D5 – A última semana será dedicada às apresentações que deverão ser feitas aos avaliadores (comunidade, professores e/ou profissionais).

E – Recursos

E1 - Fontes

Neste projeto final, dada a sua característica abrangente e também o nível de maturidade profissional que já alcançaram, cabe aos “engenheiros projetistas” saber quais os conhecimentos que precisam buscar, onde buscá-los e como filtrá-los.

E2 – Ferramentas Disponíveis

O domínio das ferramentas aqui apresentadas (ou equivalentes disponíveis no mercado) é amplamente requisitado no meio profissional e facilita a execução das tarefas para as quais elas são dedicadas.

- MS Word para o relatório
- MS Excel para cálculos, planilhas e tabelas
- MS Powerpoint para apresentação
- MS Project para construção e acompanhamento do cronograma
- CorelDRAW ou InDesign para desenho artístico
- Adobe Photoshop para edição e tratamento de imagens
- AutoCAD ou Solidworks para desenho técnico
- Simulink/Matlab para modelagem e simulação por métodos numéricos
- Ansys para modelagem e simulação por elementos finitos

F – Avaliações: pela duração deste projeto e pela maturidade já alcançada pelos seus participantes, espera-se que seja entregue relatório completo, incluindo simulação e análise de seus resultados. A apresentação estará aberta a toda comunidade acadêmica e a familiares. Profissionais da indústria de áreas correlatas serão convidados para este momento e suas impressões serão levadas em consideração na avaliação dada pelos docentes (tutor e especialistas). Caso haja um protótipo, um local para exposição temporária poderá ser designado, aumentando assim a visibilidade do projeto.

Nota final de cada aluno = F2 do aluno + F1-Média das F2 dos componentes do grupo

F1 – Nota do Grupo (dadas pelo docente e/ou especialista):

- Adequação do projeto à proposta (25%)
- Qualidade e conteúdo da apresentação (25%)
- Qualidade e conteúdo do relatório (25%)
- Cumprimento do cronograma proposto (25%)

F2 – Nota parcial de cada membro do grupo:

- Avaliação individual (25%) – dada pelo docente
- Participação nas equipes (25%) – dada pelo docente
- Avaliação dos pares (25%) – dada pelo discente
- Autoavaliação (25%) – dada pelo discente

F* - Avaliação (alternativa) – deve ser escolhida uma das duas formas de avaliação para figurarem no caderno do estudante e é aconselhado que não se altere frequentemente a forma de avaliação, para que se torne clara. A primeira forma é uma tentativa de refletir a nota do grupo para cada integrante, de acordo com seus esforços individuais, mas a segunda é mais simples.

F1 – Adequação do projeto à proposta (15%)

F2 – Qualidade e conteúdo da apresentação (15%)

F3 – Qualidade e conteúdo do relatório (15%)

F4 – Cumprimento do cronograma proposto (15%)

F5 – Avaliação individual (10%)

F6 – Participação nas equipes (10%)

F7 – Avaliação dos pares (10%)

F8 – Autoavaliação (10%)

Obs.: as notas F1 a F6 são atribuídas pelo docente/especialista.

6.1.3.2.

Apostila do tutor

I – Recomendações gerais

A primeira semana deve ser utilizada para as apresentações (dos temas, das expectativas e dos envolvidos), definições de datas importantes, cronograma institucional (total de encontros, feriados, dias dedicados às apresentações) e também para descrever como serão feitas as avaliações. A importância da entrega do relatório parcial até o último dia de aula do primeiro semestre deve ficar clara, assim como o requisito de uma boa modelagem, seguida de consistente simulação e análise de resultados.

Serão dois encontros semanais e os alunos deverão ser acompanhados em seu progresso, principalmente quanto às suas ambições, para que não sejam demasiadamente grandes, e auxiliados dentro do possível com liberação de recursos e verbas necessárias para o desenvolvimento do projeto.

O papel do tutor é quase o de um orientador de pós-graduação, sendo o acompanhamento dado um pouco mais de perto, não só por se tratarem ainda de graduandos, mas também por ser um trabalho de equipe. Através deste acompanhamento o tutor será capaz de avaliar melhor o desempenho de cada um dentro da equipe.

II – Objetivos de ensino

De acordo com o currículo traçado, os alunos devem ser estimulados para a consolidação de conhecimentos até então aprendidos, mas também para a busca dos conhecimentos que porventura ainda devam aprender. Por exemplo, caso ainda não tenham visto nada sobre sistemas embarcados, há a oportunidade de se comentar sobre a possibilidade de instalar alguns desses sistemas na bicicleta e sobre a crescente tendência dos “gadgets” e equipamentos conectados. Outro exemplo, caso ainda tenham alguma lacuna sobre tecnologia dos materiais, seria discutir sobre os compósitos e ligas utilizados na indústria aeroespacial ou até mesmo os óxidos nano-estruturados para geração de energia (caso pensem em bicicleta assistida).

Como nesta etapa será desenvolvido o projeto de graduação e a dedicação de tempo é dobrada (dois períodos), a confecção de um protótipo é viável e importante para a fixação de conhecimentos como tecnologia mecânica e elementos de máquinas (ambos no caso da Engenharia Mecânica), assim como para enfatizar a preocupação com a sua produção em escala industrial, ou seja, integração (no caso da Engenharia de Controle e Automação) e automação da manufatura (também para a Engenharia Mecânica).

O desenvolvimento das habilidades e atitudes desejadas deverá ser finalizado durante este projeto, tendo todas estas competências níveis aceitáveis e dando destaque àquelas em que cada um se sai melhor. Algumas delas devem ser universais, como é o caso da ética profissional e postura de permanente busca de atualização profissional, mas outras podem ser mais focadas, pois nem todos serão líderes ou bons apresentadores de projetos, assim como nem todos serão grandes projetistas ou especialistas.

III – Esboço do cronograma

III.1 – Primeira semana

A primeira hora do primeiro encontro deve ser dedicada às apresentações e à leitura do histórico (tópico A da apostila do aluno) junto à turma. Neste grau de domínio da terminologia da profissão, eles não devem ter muitas dúvidas e para aquelas que surgirem muito provavelmente eles mesmos saberão onde encontrar as respostas. Começar por um brainstorming sobre a bicicleta do futuro pode ser uma boa oportunidade de analisar as possibilidades que se abrem para este projeto.

Além do objetivo de desenvolvimento do projeto já discuto anteriormente, através desta atividade pretende-se levantar as questões

ainda pendentes no conhecimento deles (anteriormente foram levantados como exemplos sistemas embarcados e tecnologia dos materiais).

Os alunos devem ser agrupados em equipes de no máximo seis membros. Deve-se destacar o planejamento de projeto e cronograma que cada grupo deve desenvolver, ressaltando a importância do relatório parcial que deverá ser entregue no final do primeiro período. Ele servirá não só para avaliá-los neste primeiro semestre, mas também para acompanhar o desenvolvimento do projeto e corrigir rumos se necessário.

Visto que os alunos já estão se formando, a importância do planejamento e gerenciamento do projeto deve ser ressaltada, assim como o papel do cronograma neste quesito, lembrando que as últimas semanas do segundo semestre devem ser separadas para terminarem o protótipo (caso haja), a apresentação e o relatório final. A última semana será dedicada às apresentações aos avaliadores e haverá a presença de especialistas da indústria.

No segundo encontro desta primeira semana os alunos devem discutir entre eles as ideias encontradas para o projeto e devem começar a desenvolver o planejamento e o cronograma, os quais deverão ser entregues e validados ao final da segunda semana. Destaque-se a importância de terem, já para o terceiro encontro, o esboço do projeto conceitual, onde devem definir qual necessidade pretendem atender (ou qual nicho de mercado estão visando) e como pretendem fazer para atendê-la.

Os alunos devem ser lembrados de que o relatório final precisa conter:

- projeto conceitual (necessidade a atender, solução para problema, encomenda de cliente ou visão de futuro);
- planejamento (Estudo de Viabilidade Técnica e Econômica (EVTE) e cronograma);
- projeto detalhado (cronograma detalhado, detalhes do produto, divisões de tarefas por equipes);
- modelagem, simulação computacional e análise de resultados;
- se possível um protótipo e seus testes.

III.2 – Segunda semana

No terceiro encontro, agora já na segunda semana letiva, a seção deverá começar com a apresentação de cada projeto conceitual, incentivando-se troca de ideias, críticas construtivas e comentários. Caso esta atividade leve todo o tempo do encontro, não há problema, desde que seja frutífera para as equipes.

Assim que forem terminadas as apresentações, os alunos devem ser lembrados da entrega e validação do planejamento e cronograma de projeto para o próximo encontro, solicitando-se a todos que prevejam em seu cronograma a entrega do relatório parcial que deverá conter pelo menos o projeto conceitual, um breve estudo de mercado, o EVTE, uma boa parte do projeto detalhado (já com algumas especificações e desenhos) e se possível um início de modelagem. Caso ainda haja tempo disponível, os alunos devem ter a liberdade de fazerem o que julgarem melhor para o prosseguimento do projeto.

O último encontro desta semana é momento de revisar com os grupos seus cronogramas, atentando para a viabilidade e exequibilidade dos tempos e tarefas propostos, dentro dos limites já estabelecidos pelo cronograma institucional. Este planejamento merece bastante atenção, pois como prevê o dobro do tempo com o qual os alunos estão acostumados, pode acabar ficando demasiadamente pesado.

Recomenda-se evitar a previsão de atividades durante as férias de meio do ano e, caso o intervalo entre os períodos seja nas férias de verão, solicita-se que prevejam no mínimo um mês sem atividades. Mais adiante, caso fique claro que alguma equipe está precisando de mais tempo para terminar suas atividades, este tempo de férias poderá ser utilizado - solicitando, no entanto, que se atente para os dias em que a instituição estará fechada. Dois pontos importantes a serem ressaltados no que tange a esses encontros são: a ausência do tutor ou especialista e a necessidade de agendamento prévio de recurso especial (como laboratório ou equipamento) caso sua utilização se faça necessária.

III.3 – Terceira semana em diante

A partir deste momento, com o cronograma validado, a tarefa do tutor será acompanhar os alunos, corrigir rumos e mediar os possíveis conflitos, auxiliando-os a desenvolver um bom projeto de uma bicicleta “do futuro”.

Os encontros serão ótimas oportunidades para avaliar os alunos quanto às suas competências, incentivando-os naquelas em que se destacam e ao mesmo tempo alertando para aquelas nas quais sejam demasiadamente deficientes. Um bom engenheiro se destaca em algumas competências (não todas) sem falhar em nenhuma.

IV – Avaliação

São pontos de atenção para a avaliação (citados no item F do caderno do aluno):

IV.1 - Adequação do projeto à proposta – este quesito deve ter acompanhamento contínuo, para que desvios observados sejam corrigidos o quanto antes. Ele é a medida de quanto o projeto escolhido pelo grupo está dentro do solicitado na proposta, assim como de quanto ele ajuda a responder às perguntas colocadas (item C do caderno do aluno). Sua nota deve ser dada observando os conteúdos do relatório e da apresentação, mas também do que foi observado nos encontros periódicos. Em especial neste projeto, caso haja comentários de profissionais da área, esses devem ser levados em conta e devem ter um bom peso neste quesito de avaliação.

IV.2 - Qualidade e conteúdo da apresentação – a apresentação ao público (docentes, especialistas e/ou comunidade) deve servir para avaliar quão bem os alunos conseguem expor seu projeto, não se atendo somente ao conteúdo, mas também à forma. Por já estarem se formando, uma postura profissional deve ser exigida dos estudantes.

IV.3 - Qualidade e conteúdo do relatório – no decorrer do semestre, durante os encontros semanais, conteúdos e formas de relatórios de projeto de engenharia devem ser recorrentemente discutidos. Além disso, a correção gramatical e a terminologia da área devem estar presentes e, portanto, devem ser também avaliadas. Novamente cabe ressaltar que uma postura profissional deve ser exigida, já que se tratam de formandos.

IV.4 - Bom gerenciamento do projeto e cumprimento do cronograma proposto – já no início da segunda semana, durante o quarto encontro, cada equipe deverá entregar o planejamento de projeto e um cronograma. Este planejamento deve ser de nível profissional, contendo o EVTE, bem como o inventário do trabalho a ser executado, identificando os recursos necessários para executar cada tarefa do projeto assim como as dependências entre as tarefas. Ele deverá

também conter as condições para que o projeto seja completado e um cronograma, cujo cumprimento também deve ser acompanhado e avaliado.

IV.5 - Avaliação individual – o que deve ser medido aqui é o compromisso com as atividades individuais, assim como o progresso ou o desenvolvimento de cada aluno dentro dos objetivos traçados, que são: aprender os conhecimentos estabelecidos (como exemplo foram citados sistemas embarcados e tecnologia de materiais), consolidar competências como o planejamento e a gestão de projetos de engenharia, assim como as capacidades de trabalhar em equipe, de fazer a apresentação oral e escrita do projeto, ética profissional, constante busca de atualização profissional e consciência do impacto socioambiental da profissão.

IV.6 - Participação nas equipes – esta nota deve ser dada de acordo com a assiduidade de cada aluno aos encontros, sua participação ativa nas discussões e seu desempenho enquanto coordenador e como secretário da equipe (de acordo com item 4.2.7 - Papéis dos Diversos Atores).

IV.7 - Avaliação dos pares – cada integrante deve avaliar os demais integrantes do grupo. Não deve haver avaliação intergrupos, mas somente intragrupos. Os critérios que norteiam a avaliação de um aluno sobre o desempenho de seu colega devem ser: participação, compromisso e contribuição.

IV.8 – Autoavaliação – dada pelo próprio aluno, deve ser feita em conversa com o tutor, que deve chamar um a um para uma conversa de no máximo cinco minutos. A nota deve ser justificada e pode ser até questionada pelo tutor, mas a palavra final desta avaliação deve ser estritamente do discente.

6.2.

Sugestões de Temas para Desenvolvimento de Projetos em PBL

Nesta parte do trabalho pretende-se apresentar temas como sugestões que têm potencial para cobrir a maior parte do currículo da Engenharia Mecânica e da Engenharia de Controle e Automação.

Em cada sugestão estão descritos os conhecimentos a serem desenvolvidos tendo como base o currículo atual destas engenharias. Foi

omitido, de forma proposital, o desenvolvimento de habilidades e atitudes que estão presentes intrinsecamente em todos ou quase todos os projetos como ética profissional, ecologia, planejamento e gestão de projetos de engenharia, apresentação oral e escrita, legislação e trabalho em equipe.

Cabe lembrar que o primeiro semestre (ciclo básico), o quinto semestre (primeiro período do ciclo profissional) e os dois últimos semestres de ambos os cursos foram cobertos neste trabalho pelos projetos propostos em 6.1; restam ainda seis semestres na formação de engenheiro (prevista para dez semestres). Portanto, temas multidisciplinares de variados níveis de complexidade devem ser desenvolvidos com o objetivo de percorrer parte significativa do currículo do curso através da utilização de projetos.

Neste intuito, seguem alguns temas bastante atuais que podem servir de base para a concepção de novos projetos em PBL: dois mais voltados para Engenharia Mecânica, outro dirigido para Engenharia de Controle e Automação e três comuns a ambas as áreas (durante o ciclo básico).

6.2.1. Portabilidade (segundo período do ciclo básico)

A bicicleta tem se tornado uma companheira do cidadão moderno nos mais diferentes países e nos mais variados momentos, podendo ser levada ao trabalho, às escolas e universidades ou em viagem.

Nestas situações a portabilidade da mesma, ou seja, o atributo de ser transportada como um pequeno volume pode fazer a diferença, principalmente para aquelas que são elétricas, permitindo ao usuário colocá-las em ambientes fechados onde antes não eram convenientes, como escritórios e espaços empresariais em geral, cabines e bagageiros de trens, ônibus ou aviões e até mesmo salas de aula, deixando assim de ocupar as ruas ou garagens.

Diversas soluções para seu transporte já foram desenvolvidas e variadas formas de dobrá-las podem ser encontradas no mercado, algumas com inegável diversidade de soluções como, por exemplo, as oito maneiras apresentadas na Fig. 6.2. A solução ótima para tal problema ainda parece não ter sido alcançada, já que a todo momento surgem novas ideias, tornando-a cada vez mais fácil de ser carregada.



Figura 6.2 – Diferentes soluções para o melhor transporte de bicicletas - Fonte: <http://somentecoisaslegais.com.br/produtos/8-bicicletas-dobraceis-incriveis>, acessado em 6 de julho de 2016

A tarefa dos grupos será de propor solução com algum diferencial, seja na facilidade de transporte, nas dimensões, na forma, no peso, ou na facilidade/rapidez de sua transformação. Neste projeto serão objetivos de aprendizagem a apresentação dos conceitos de desenho técnico, o aprofundamento de mecânica newtoniana e a introdução à estática e à ciência e tecnologia dos materiais. Dependendo da solução sugerida, há margem para apresentar conceitos de eletrotécnica. Além de tais disciplinas, que já constam no currículo atual, áreas como ergonomia e estética são nitidamente envolvidas neste projeto, como complementos de interesse.

Os conceitos de física mecânica e de estática serão abordados principalmente quando se tratarem a estabilidade estrutural do quadro e a solução para compactá-lo. Neste tratamento podem ser avaliados também quais materiais serão utilizados, o que abriria uma boa oportunidade para a introdução à ciência e tecnologia dos materiais. O desenho técnico fará parte do processo de concepção do que se pretende construir, assim como sucede em qualquer projeto de engenharia. Por último conceitos de eletrotécnica podem ser

apresentados caso o projeto inclua dispositivos eletroeletrônicos e sejam necessárias soluções de suprimento que envolvam conversão de energia.

6.2.2. Bicicletas multitarefas (terceiro período do ciclo básico)

Uma tendência cada vez mais forte de inserção da bicicleta no cotidiano das pessoas fez com que a indústria começasse a procurar por aplicações ainda não exploradas ou mal exploradas por este meio de transporte. Assim surgem bicicletas (ou triciclos) que se transformam em carrinho de bebê (Fig. 6.3), que se acoplam umas às outras formando um “trem” (Fig. 6.4) ou que purificam e armazenam água (Fig. 6.5).



Figura 6.3 – Triciclo que se transforma em carrinho de bebê - Fonte: <http://www.euvoudebike.com/2012/10/bicicleta-que-vira-carrinho-de-bebe-e-otima-opcao>, acessado em 6 de julho de 2016

Para o projeto, pede-se aos grupos que desenvolvam bicicletas que vão além dos propósitos de locomoção, saúde e/ou lazer e consigam ser substitutos de outros produtos.



Figura 6.4 – Bicicletas elétricas acopláveis - Fonte: <http://www.ubergizmo.com/2008/06/electric-tandem-bicycle>, acessado em 6 de julho de 2016



Figura 6.5 – Bicicleta purificadora de água - Fonte: <http://inhabitat.com/aquaduct-bike-purifies-water-as-you-pedal>, acessado em 6 de julho de 2016

Nesta temática, oportunidades serão abertas para consolidar os conceitos de física mecânica, estática (introduzindo conceitos de mecânica dos sólidos), aprofundar as competências em estética, ergonomia, desenho técnico e,

dependendo do foco dado ao projeto, podem surgir possibilidades de se tratar de assuntos como eletrotécnica, eletromagnetismo, química, programação e instrumentação eletrônica. Também não deve ser excluída a pesquisa de mercado, ou seja, o levantamento de necessidades ou desejos dos cidadãos que podem ser satisfeitas pelo uso da bicicleta multitarefa, como por exemplo, o transporte de cadeirantes.

Analogamente ao item 6.2.1, os conceitos de física mecânica, estática e mecânica dos sólidos serão aprofundados principalmente quando se tratarem a estabilidade e a resistência estrutural do quadro. A habilidade de desenho técnico também será aprofundada, pois este é indispensável em qualquer projeto. Soluções que envolvam motorização (seja elétrica ou a combustão) suscitam a oportunidade de discutir temas de química. A instrumentação eletrônica se dará necessária em projetos que visem uma capacidade computacional para suporte à solução desejada, como por exemplo em conversões de grandezas, auxílio em cálculos ou orientação por posicionamento global. Pelo mesmo motivo dado no projeto anterior, ao se instrumentalizar a bicicleta e havendo necessidade de suprimento de energia, podem se utilizar conceitos de eletrotécnica e eletromagnetismo, que serão naturalmente aprofundados. Por fim, caso precisem desenvolver software específico para a solução computacional escolhida, é natural que os estudantes busquem por conhecimentos de programação.

6.2.3. Novas soluções de locomoção (quarto período do ciclo básico)

Alternativas de locomoção ao transporte público, carros e motos além da bicicleta têm surgido e algumas delas têm ganhado adesão de um público cada vez maior, como aconteceu com a plataforma de duas rodas coaxiais da Segway, com o monociclo elétrico da Airwheel (Fig. 6.6a) e mais recentemente com as duas rodas coaxiais elétricas de plataformas axialmente independentes (também conhecido como Hoverboard) da Swagway (Fig. 6.6b).



(a) Monociclo da Airwheel



(b) Hoverboard da Swagway

Figura 6.6 – Alternativas de locomoção – Fontes: <http://airwheel.com.br/home/portfolio/monociclo-eletrico-airwheel-x3> e <http://www.usatoday.com/story/tech/2015/12/03/razor-suing-swagway-hoverboard/76744478>, acessados em 7 de julho de 2016

Este tema é particularmente desafiador, já que apela à imaginação e à criatividade, focando em produtos que literalmente ainda não existem e nem mesmo sua forma é pré-estabelecida.

Ao envolver os grupos em projetos de desenvolvimento de novas soluções de transporte, tem-se, pelos mesmos motivos explanados nos itens 6.2.1 e 6.2.2, a oportunidade de aprofundar o domínio da mecânica dos sólidos e abranger, além de administração e economia para engenheiros, as temáticas sugeridas no projeto anterior que eventualmente não puderam ser abordadas nele. Repassando, são elas: eletrotécnica, eletromagnetismo, química, programação e instrumentação eletrônica. O domínio da utilização das ferramentas de desenho técnico já pode ser alcançado nesta etapa, mesmo porque vão se tratar provavelmente de estruturas de desenho inovador.

Além disso, pesquisa de mercado é claramente parte indispensável do respectivo projeto, em se tratando da eventual introdução de produtos até agora desconhecidos, assim como análises de risco e estudos de viabilidade técnica e econômica. Abre-se então neste tema a chance de aprofundamento dos conhecimentos de economia.

6.2.4. Confiabilidade (segundo período do ciclo profissional, exemplo em Engenharia Mecânica)

Em casos de esportes de alto desempenho, como modalidades olímpicas e paralímpicas, “Tour de France”, ralis e outras competições, bem como no caso de ciclismo de longo curso (tipicamente acompanhando rodovias), a preocupação com a confiabilidade da bicicleta é determinante, não só porque a quebra de alguma parte pode significar a perda de anos de investimento e dedicação do atleta e de sua equipe, mas também porque pode causar graves acidentes e outras situações de emergência como, por exemplo, o isolamento em regiões inóspitas.

Neste sentido, o aperfeiçoamento da confiabilidade das peças que compõem uma bicicleta tem um valor agregado significativo, ainda mais levando em conta que a maior parte delas não dispõe do recurso à redundância, com raras exceções, como os freios ou os raios da roda.

Através de projetos para elaboração de equipamentos, partes, peças, componentes e subsistemas mais confiáveis, os alunos terão a oportunidade de consolidar a compreensão de mecânica dos sólidos, aprender sobre desenho mecânico e aprofundar os conhecimentos em ciência e tecnologia dos materiais (passando por materiais de engenharia e comportamento mecânico dos materiais), assim como ser apresentados a: metrologia dimensional, vibrações mecânicas, probabilidade e estatística (onde o próprio conceito de confiabilidade deve ser compreendido e aprofundado), e processos de fabricação.

Conceitos de desenho mecânico, metrologia dimensional e processos de fabricação devem ser discutidos quando se tratar de processos de produção de peças, graus de acabamento, tolerâncias, conformidades e inspeção de qualidade, medição, monitoramento e controle. A análise dos fenômenos de ressonância e como evitá-los conduz ao estudo de vibrações mecânicas. Dada que a confiabilidade envolve o estudo da probabilidade de um sistema operar sem apresentar falhas, o entendimento das diversas distribuições probabilísticas, bem como de suas propriedades, torna-se indispensável.

6.2.5. Manutenibilidade e “Plug and Play” (terceiro período do ciclo profissional, exemplo em Engenharia Mecânica)

Explorando o conceito criado no campo da microinformática em 1993 (“plug and play”), a facilidade para fazer alterações na configuração de um sistema por iniciativa de um leigo já é explorada em diversos domínios, principalmente nos que envolvem microprocessadores, como celulares, mas já têm surgido soluções “user friendly” em outras áreas, incluindo até mesmo a transformação de bicicleta comum em elétrica, como por exemplo os dispositivos Copenhagen Wheel (Fig. 6.7a), Rubbee (Fig. 6.7b) ou add-e (Fig. 6.7c).



(a) Copenhagen Wheel (b) Rubbee (c) Add-e

Figura 6.7 – Dispositivos que transformam uma bicicleta comum em elétrica - Fontes: <http://www.gizmag.com/mit-copenhagen-electric-bicycle-wheel-hub/13626>, <http://www.gizmag.com/rubbee-electric-bicycle-kit/28406/pictures> e [http:// gearjunkie.com/electric-bike-motor-add-on](http://gearjunkie.com/electric-bike-motor-add-on), acessados em 7 de julho de 2016

Motivado pela facilidade de fazer melhorias em sua bicicleta, um público crescente de ciclistas sente-se também estimulado a entender melhor e fazer a manutenção de seu equipamento. Assim, abre-se um campo ainda pouco explorado neste ramo (no qual a indústria aeronáutica investe pesado há décadas) que é a qualidade (facilidade e rapidez) de manutenção, conhecida como manutenibilidade.

A manutenção modular é uma mistura dos dois conceitos em pauta, onde cada componente é montado e desmontado facilmente do sistema (“plug and play”) e pode ter sua manutenção feita em separado, bastando que outro módulo em boas condições de operação seja montado para que o sistema funcione.

A elaboração de projetos de melhoria da manutenibilidade e de manutenção modular dos componentes das bicicletas abre campo não só para a

consolidação de conhecimentos de mecânica dos sólidos, probabilidade, estatística, processos de fabricação, metrologia dimensional e ciência e tecnologia dos materiais (passando por materiais de engenharia e comportamento mecânico dos materiais), mas também para os alunos aprenderem sobre tecnologia mecânica e serem apresentados para elementos de máquina. Eles serão levados também a diferenciar manutenção preventiva, preditiva e corretiva, conceitos estes tão difundidos na indústria, principalmente de veículos (terrestres, aéreos ou náuticos) e de maquinários industriais.

6.2.6.

Direção assistida (quarto período do ciclo profissional, exemplo em Engenharia de Controle e Automação)

Com o aumento da utilização de bicicletas no mundo, há um crescente número de acidentes envolvendo ciclistas. Sugere-se então a divisão dos fatores que podem ser a causa de tais acidentes, seguida do desenvolvimento de soluções para evitá-los. Pode-se citar fatores como a colisão por ponto cego, a derrapagem, o espaço/tempo insuficiente para frenagem, a perda de equilíbrio e a limitada visibilidade, seja por ausência de iluminação propícia ou por ofuscamento.

Várias soluções já são aplicadas em automóveis, mas suas adaptações não são triviais devido às particularidades da bicicleta, tais como comportamento dinâmico, tamanho, peso e orçamento. Ainda que o desenvolvimento de um piloto automático possa ser considerado demasiadamente complexo no caso da bicicleta, várias soluções parciais e subótimas, mas úteis e factíveis, podem e devem ser consideradas.

Ao desenvolver projetos de direção assistida, dependendo do rumo escolhido, além de aprender sobre sistemas de atuação e de consolidar os conhecimentos de dinâmica de corpos rígidos e modelagem de sistemas dinâmicos, os alunos podem ser apresentados a alguns dos seguintes temas: circuitos elétricos e eletrônicos, controle e servomecanismos, microcontroladores e sistemas embarcados, controle discreto e inteligência computacional aplicada.

Para a inserção de atuadores que irão auxiliar em algum dos aspectos da bicicleta (por exemplo manutenção de equilíbrio, rota ou velocidade), o conteúdo de modelagem de sistemas dinâmicos deverá ser abordado, pois será necessário modelar a bicicleta e seu comportamento dinâmico. Durante a automatização da bicicleta, diversos aspectos podem ser envolvidos, como:

circuitos integrados analógicos (amplificadores ou filtros), controladores e atuadores e integração com sensores e transdutores. Assim são tratados conteúdos de circuitos elétricos e eletrônicos, controle e servomecanismos, microcontroladores e sistemas embarcados, sistemas de atuação e controle discreto. Finalmente, projetos que visem ter uma adaptação progressiva ao usuário podem se utilizar de ideias ligadas à inteligência computacional aplicada.

6.3.

Referências dos Currículos com os Conhecimentos, Habilidades e Atitudes Desenvolvidos com estes Projetos e Temas

Neste item serão analisadas as disciplinas dos cursos de Engenharia Mecânica e de Controle e Automação da PUC-Rio, no intuito de mapear todos os conhecimentos, habilidades e atitudes destes currículos que são cobertos pelos três projetos (item 6.1) ou seis temas (item 6.2) sugeridos.

As Tabelas 6.1 e 6.2 apresentam respectivamente todas as disciplinas dos atuais currículos (com a sua atual periodização) das Engenharias Mecânica e de Controle e Automação e em quais projetos ou temas elas podem ser abordadas. Nestas tabelas estão também recomendados os graus de aprofundamento com o qual cada competência deverá ser resgatada e tratada em determinado projeto, espelhando-se na abordagem do Currículo em Espiral descrita no subitem 4.3 do capítulo 4.

Preenchidas em cinza estão as disciplinas que, apesar de possivelmente serem utilizadas em um ou mais projetos, não fazem parte do escopo dos mesmos e devem ser mantidas como disciplinas ou transformadas em minicursos específicos (dando um carácter mais aplicado a seu conteúdo).

Algumas disciplinas, apesar de terem seu conteúdo consolidado já em um dado projeto, podem ser temas de projetos posteriores, como é o caso, por exemplo, da Mecânica Newtoniana. Nestes casos, só foram listados os projetos que fazem parte do processo de aprendizagem, omitindo os posteriores.

Ao final de cada tabela estão agrupadas outras disciplinas que têm um carácter de formação mais geral (como por exemplo as religiosas), ou que têm denominação genérica (como eletivas livres) e por isso não foram tratadas especificamente em nenhuma proposta.

O asterisco que antecede o número de um projeto ou tema sinaliza que a disciplina em questão tem a possibilidade de ser abordada naquele projeto dependendo do enfoque dado durante a execução. Caso seu conhecimento não

seja tratado em um projeto, ele poderá ser abordado no outro projeto ali indicado e por isso muitas vezes há mais de um projeto (com o mesmo nível de aprofundamento) para uma mesma disciplina.

Per.	Disciplina	Projeto ou Tema
1	Introdução à Engenharia	6.1.1 (integral)
1	Mecânica Newtoniana	6.1.1 (introdução) 6.2.1 (aprofundamento) 6.2.2 (consolidação)
1	Laboratório de Mecânica Newtoniana	6.1.1 (introdução) 6.2.1 (aprofundamento) 6.2.2 (consolidação)
1	Calculo de uma Variável	
1	Álgebra Linear I	
1	Laboratório de Química Geral	
1	Química Geral	*6.2.2 (integral) *6.2.3 (integral)
2	Álgebra Linear II	
2	Fluidos e Termodinâmica	
2	Laboratório de Fluidos e Termodinâmica	
2	Programação I	*6.2.2 (integral) *6.2.3 (integral)
2	Calculo a Várias Variáveis I	
2	Desenho Técnico I	6.2.1 (introdução) 6.2.2 (aprofundamento) 6.2.3 (consolidação)

Tabela 6.1 – Disciplinas do currículo atual da Eng. Mecânica e onde são abordados - Fonte: Elaborada pelo autor

Per.	Disciplina	Projeto ou Tema
3	Eletromagnetismo	*6.2.2 (introdução) *6.2.3 (introdução) *6.1.2 (consolidação) *6.1.3 (consolidação)
3	Laboratório de Eletromagnetismo	*6.2.2 (introdução) *6.2.3 (introdução) *6.1.2 (consolidação) *6.1.3 (consolidação)
3	Programação II	*6.1.2 (integral) *6.1.3 (integral)
3	Estática	6.2.1 (introdução) 6.2.2 (consolidação)
3	Calculo a Várias Variáveis II	
3	Desenho Técnico II	6.2.2 (apresentação) 6.2.3 (consolidação)
4	Termodinâmica para Engenharia Mecânica	
4	Desenho Mecânico	6.2.4 (integral)
4	Mecânica dos Sólidos I	6.2.2 (introduzir) 6.2.3 (aprofundar) 6.2.4 (consolidação)
4	Física Moderna	
4	Laboratório de Física Moderna	
4	Equações Diferenciais e de Diferenças	

Tabela 6.1 – Disciplinas do currículo atual da Eng. Mecânica e onde são abordados (continuação) - Fonte: Elaborada pelo autor

Per.	Disciplina	Projeto ou Tema
4	Ciência e Tecnologia dos Materiais	6.2.1 (introdução) 6.2.4 (aprofundamento) 6.2.5 (consolidação)
5	Probabilidade e Estatística	6.2.4 (apresentação) 6.2.5 (consolidação)
5	Dinâmica de Corpos Rígidos	6.1.2 (apresentação) <i>6.2.6 (consolidação) (projeto voltado à Engenharia de Controle e Automação)</i>
5	Ética Profissional para Engenharia	Presente em todos os projetos
5	Materiais de Engenharia	6.2.4 (apresentação) 6.2.5 (consolidação)
5	Eletrotécnica Geral	*6.2.1 (apresentação) *6.2.2 (apresentação/ consolidação) *6.2.3 (consolidação)
5	Laboratório de Eletrotécnica Geral	*6.2.1 (apresentação) *6.2.2 (apresentação/ consolidação) *6.2.3 (consolidação)
5	Mecânica dos Fluidos I	
5	Mecânica dos Sólidos II	6.2.4 (apresentação) 6.2.5 (consolidação)
6	Transmissão de Calor	
6	Mecânica dos Fluidos II	

Tabela 6.1 – Disciplinas do currículo atual da Eng. Mecânica e onde são abordados (continuação) - Fonte: Elaborada pelo autor

Per.	Disciplina	Projeto ou Tema
6	Metrologia Dimensional	6.2.4 (apresentação) 6.2.5 (consolidação)
6	Comportamento Mecânico dos Materiais	6.2.4 (apresentação) 6.2.5 (consolidação)
6	Vibrações Mecânicas	6.2.4 (apresentação) 6.2.5 (consolidação)
6	Tecnologia Mecânica	6.2.5 (apresentação) 6.1.3 (consolidação)
6	Instrumentação Eletrônica	*6.2.2 (introdução) *6.2.3 (introdução) *6.1.2 (consolidação) *6.2.6 (consolidação) <i>(projeto voltado à Engenharia de Controle e Automação)</i>
7	Métodos Numéricos Engenharia Mecânica	
7	Elementos de Máquinas	6.2.5 (apresentação) 6.1.3 (consolidação)
7	Máquinas Térmicas	
7	Processos de Fabricação	6.2.4 (apresentação) 6.2.5 (consolidação)
7	Introdução à Engenharia Ambiental	Presente em todos os projetos
7	Métodos Experimentais em Eng. Mecânica	

Tabela 6.1 – Disciplinas do currículo atual da Eng. Mecânica e onde são abordados (continuação) - Fonte: Elaborada pelo autor

Per.	Disciplina	Projeto ou Tema
7	Modelagem de Sistemas Dinâmicos	6.1.2 (apresentação) <i>6.2.6 (consolidação) (projeto voltado à Engenharia de Controle e Automação)</i>
9	Automação da Manufatura	6.1.3 (integral)
9	Administração para Engenheiros	6.1.1 (introdução) 6.2.3 (aprofundamento) 6.1.2 (consolidação)
9	Introdução à Economia para Engenheiros	6.1.1 (introdução) 6.2.3 (aprofundamento) 6.1.2 (consolidação)
9	Controle de Sistemas	6.1.2 (apresentação) <i>6.2.6 (consolidação) (projeto voltado à Engenharia de Controle e Automação)</i>
9	Projeto de Sistemas Mecânicos	Presente em todos os projetos
9	Projeto de Sistemas Térmicos	Presente em todos os projetos
9	Projeto de Graduação em Engenharia Mecânica	6.1.3 (integral)
2	O Humano e o Fenômeno Religioso	
3	Optativas de Cristianismo	
3	Optativas de Filosofia	
4	Ética Cristã	
8	Eletivas Livres Dentro/Fora Departamento	

Tabela 6.1 – Disciplinas do currículo atual da Eng. Mecânica e onde são abordados (continuação) - Fonte: Elaborada pelo autor

Per.	Disciplina	Projeto ou Tema
8	Eletivas Livres Fora do Departamento	
9	Legislação Social	
9	Estágio Supervisionado em Eng. Mecânica	
20	Atividades Complementares	

Tabela 6.1 – Disciplinas do currículo atual da Eng. Mecânica e onde são abordados (continuação) - Fonte: Elaborada pelo autor

Conforme pode ser concluído ao se examinar a Tab. 6.1, é possível cobrir grande parte das disciplinas da Engenharia Mecânica através dos projetos e temas desenvolvidos.

As disciplinas de Física Moderna, Laboratório de Física Moderna e Laboratório de Química Geral, assim como as religiosas, de filosofia e de legislação social (leis trabalhistas) dificilmente poderão ser objeto de alguma proposta, devendo ser tratadas em minicursos ou palestras específicas.

Não foi criado projeto que envolva as disciplinas Máquinas Térmicas e Fluidos e Termodinâmica (e suas derivações: Termodinâmica para Engenharia Mecânica, Mecânica dos Fluidos I, Mecânica dos Fluidos II, Transmissão de Calor). Como se trata neste ponto do curso de Engenharia Mecânica, cabe lembrar que um tema de projeto (6.2.6) é voltado para a Engenharia de Controle e Automação. Portanto, caso seja pertinente, outra proposta de projeto poderá substituir o atual 6.2.6 na tentativa de cobrir essas lacunas. Neste caso seria interessante que o projeto 6.1.3 (de conclusão de curso) pudesse auxiliar na consolidação destes novos conhecimentos. Por fim, é importante ressaltar que a substituição do projeto 6.2.6 deve ser criteriosa, pois este projeto pode ser necessário para a consolidação do entendimento de Instrumentação Eletrônica e, além disso, ele cobre as disciplinas Modelagem de Sistemas Dinâmicos e Controle de Sistemas.

De forma análoga pode-se constatar na Tab. 6.2 a grande abrangência dos temas e projetos quanto às disciplinas da Engenharia de Controle e Automação.

Novamente o Laboratório de Química Geral e as disciplinas religiosas, de filosofia e de legislação social (leis trabalhistas) dificilmente poderão ser objeto de alguma proposta, devendo ser tratados em minicursos ou palestras específicas.

Per.	Disciplina	Projeto ou Tema
1	Introdução à Engenharia	6.1.1 (integral)
1	Mecânica Newtoniana	6.2.1 (apresentação) 6.2.2 (consolidação)
1	Laboratório de Mecânica Newtoniana	6.2.1 (apresentação) 6.2.2 (consolidação)
1	Calculo de uma Variável	
1	Álgebra Linear I	
1	Laboratório de Química Geral	
1	Química Geral	*6.2.2 (integral) *6.2.3 (integral)
2	Fluidos e Termodinâmica	
2	Laboratório de Fluidos e Termodinâmica	
2	Programação I	*6.2.2 (integral) *6.2.3 (integral)
2	Calculo a Várias Variáveis I	
2	Álgebra Linear II	
2	Integradora Básica I	
3	Introdução à Mecânica dos Sólidos	6.2.2 (apresentação) 6.2.3 (consolidação)
3	Fenômenos de Transporte I	
3	Integradora Básica II	
3	Desenho Técnico I	6.2.1 (introdução) 6.2.2 (aprofundamento) 6.2.3 (consolidação)

Tabela 6.2 – Disciplinas do currículo atual da Eng. de Cont. e Automação e onde são abordados - Fonte: Elaborada pelo autor

Per.	Disciplina	Projeto ou Tema
3	Eletromagnetismo	*6.2.2 (introdução) *6.2.3 (introdução) *6.1.2 (consolidação)
3	Laboratório de Eletromagnetismo	*6.2.2 (introdução) *6.2.3 (introdução) *6.1.2 (consolidação)
3	Programação II	*6.1.2 (integral)
3	Ciência e Tecnologia dos Materiais	6.2.1 (introdução) <i>6.2.4 (consolidação) (projeto voltado à Engenharia Mecânica)</i>
3	Equações Diferenciais e de Diferenças	
4	Probabilidade e Estatística	<i>6.2.4 (apresentação)</i> <i>6.2.5 (consolidação)</i> <i>(projetos voltados à Engenharia Mecânica)</i>
4	Desenho Técnico II	6.2.2 (apresentação) 6.2.3 (consolidação)
4	Estática	6.2.1 (introdução) 6.2.2 (consolidação)
4	Calculo a Várias Variáveis II	
4	Fenômenos de Transporte II	
4	Sinais e Sistemas	
4	Sistemas de Atuação	6.2.6 (integral)

Tabela 6.2 – Disciplinas do currículo atual da Eng. de Cont. e Automação e onde são abordados (continuação) - Fonte: Elaborada pelo autor

Per.	Disciplina	Projeto ou Tema
5	Circuitos Elétricos e Eletrônicos	*6.2.6 (apresentação) 6.1.3 (consolidação/ integral)
5	Laboratório de Circuitos Elétricos e Eletrônicos	*6.2.6 (apresentação) 6.1.3 (consolidação/ integral)
5	Integração da Manufatura	6.1.3 (integral)
5	Dinâmica de Corpos Rígidos	6.1.2 (apresentação) 6.2.6 (consolidação)
5	Introdução à Engenharia Ambiental	Presente em todos os projetos
6	Instrumentação Eletrônica	*6.2.2 (introdução) *6.2.3 (introdução) *6.1.2 (consolidação)
6	Inteligência Computacional Aplicada	*6.2.6 (integral)
7	Controle e Servomecanismos	*6.2.6 (apresentação) 6.1.3 (consolidação/ integral)
7	Laboratório de Controle e Servomecanismos	*6.2.6 (apresentação) 6.1.3 (consolidação/ integral)
7	Ética Profissional para Engenharia	Presente em todos os projetos
7	Modelagem de Sistemas Dinâmicos	6.1.2 (apresentação) 6.2.6 (consolidação)
7	Automação da Manufatura	6.1.3 (integral)
8	Administração para Engenheiros	6.1.1 (introdução) 6.2.3 (aprofundamento) 6.1.2 (consolidação)

Tabela 6.2 – Disciplinas do currículo atual da Eng. de Cont. e Automação e onde são abordados (continuação) - Fonte: Elaborada pelo autor

Per.	Disciplina	Projeto ou Tema
8	Introdução à Economia para Engenheiros	6.1.1 (introdução) 6.2.3 (aprofundamento) 6.1.2 (consolidação)
8	Microcontroladores e Sistemas Embarcados	*6.2.6 (apresentação) 6.1.3 (consolidação)
8	Projeto Automação Industrial	6.1.3 (integral)
8	Controle Discreto	*6.2.6 (apresentação) 6.1.3 (consolidação/ integral)
9	Optimização de Projetos	6.1.3 (integral)
9	Projeto de Graduação em Eng. Contr. Aut.	6.1.3 (integral)
2	O Humano e o Fenômeno Religioso	
5	Optativas de Cristianismo	
5	Legislação Social	
6	Optativas de Filosofia	
6	Ética Cristã	
7	Optativa de Sistemas Digitais	
9	Estágio Supervisionado em Eng. Contr. Aut.	
20	Optativas de Sistemas Mecatrônicos	
20	Atividades Complementares	
20	Eletivas Livres Dentro/Fora Departamento	
20	Eletivas Livres Fora do Departamento	

Tabela 6.2 – Disciplinas do currículo atual da Eng. de Cont. e Automação e onde são abordados - Fonte: Elaborada pelo autor

Mais uma vez não foi criado projeto que envolva as disciplinas Fenômenos de Transporte I, Fenômenos de Transporte II e Fluidos e Termodinâmica. Como desta vez se trata do curso de Engenharia de Controle e Automação, é de se ressaltar que dois temas de projeto (6.2.4 e 6.2.5) foram voltados para a

Engenharia Mecânica. Caso haja pertinência, outra proposta de projeto poderá substituir um destes projetos para cobrir essas lacunas. Cabe lembrar que, apesar de serem voltados para o outro curso, os projetos citados cobrem também as disciplinas Ciência e Tecnologia dos Materiais e Probabilidade e Estatística deste curso e, portanto, sua substituição deve ser cuidadosa.

As disciplinas Integradora Básica I e II têm um perfil mais global, abordando os temas de forma integrada, sem separação clara por áreas de conhecimento. Por este perfil pode-se afirmar com razoável certeza que os projetos cumprirão satisfatoriamente o objetivo principal destas disciplinas que é, como dito na ementa da segunda disciplina, “a importância e a necessidade de integração do conhecimento”.²⁵

A Figura 6.8 apresenta de forma gráfica o percurso em espiral das disciplinas tratadas e tem como objetivo melhorar a visualização da abrangência da formação possibilitada pelos projetos e temas descritos neste capítulo. Essa espiral está organizada de forma cronológica com os períodos sugeridos para as propostas em PBL, sendo a mais central o primeiro projeto (bicicleta do futuro I) e a mais periférica o projeto de final de curso (bicicleta do futuro II).

Colocou-se em cada “degrau” dessa “escada em caracol” as disciplinas e, ao final da “subida”, o projeto (em azul escuro) ou tema (em verde) que as engloba. O conteúdo das disciplinas em cor laranja está em fase de aprendizagem, enquanto aquele das disciplinas em cor marrom alcança durante aquele processo status de assimilado. Manteve-se o uso do asterisco para indicar a possibilidade de uma disciplina ser abordada durante um projeto ou tema.

Os termos colocados em azul claro na forma de “corrimão” são conceitos mais globais, que perfazem todos os projetos e compõem as competências desejadas no engenheiro do século XXI. Como eles estão presentes em todos os projetos, não há nenhuma ligação de suas posições ou tamanhos com o momento ou profundidade com que são tratados.

Como se pode observar pela Fig. 6.8, várias disciplinas são tratadas em mais de um projeto, tendo seu aprendizado feito de forma gradual, conforme metodologia de organização curricular “Currículo em Espiral” apresentada no item 4.3 do capítulo 4.

²⁵ *Ementas das Engenharias Mecânica e de Controle e Automação retiradas do site da PUC-Rio (http://www.puc-rio.br/ensinopesq/ccg/eng_mecanica.html) em 16 de março de 2016.*

Ao se optar pela implantação de algo novo, que tire muitos de suas zonas de conforto, depara-se habitualmente com resistências quanto à mudança, mesmo que o antigo já não cumpra mais satisfatoriamente com o pretendido. Tentando auxiliar aqueles que enxergam e valorizam os benefícios dessa transformação, muito foco foi dado neste capítulo somente para mostrar que o alcance da metodologia de aprendizagem baseada em projetos pode ser quase total quando comparado ao currículo existente. Apesar de em diversas ocasiões serem citadas as potencialidades do método, este não precisa partir de currículo pré-existente, como foi apresentado neste trabalho, para a criação de projetos.

É de ressaltar o fato de que tanto os projetos em PBL quanto os temas sugeridos partem de pesquisa e desenvolvimento de um único profissional (ainda que guiado por seu orientador) e como consequência tem-se o reflexo de suas limitações, tanto em conhecimento quanto em prática. O alcance do método é ainda bem maior quando projetos são desenvolvidos por equipe multidisciplinar, onde podem ser enxergadas muitas outras possibilidades e nuances para aproveitamento ótimo do tempo. Desta forma a potencialidade deste método será melhor explorada e vai bem além de cobrir as disciplinas de um currículo tradicional em dois cursos de uma universidade específica – atrai o interesse dos envolvidos ao mesmo tempo em que alcança a formação de um profissional realmente preparado para os desafios que irá enfrentar.

7 Considerações Finais

Os dois assuntos principais tratados neste trabalho - modelagem de veículos de duas rodas e educação em engenharia - apesar de serem aparentemente bastante distantes, apresentam ao final significativas complementariedades. Aquilo que poderia inicialmente trazer certo desconforto ao leitor, ou seja, o tratamento de ambos os assuntos em um só trabalho, justifica-se por seu objetivo e pelo método aplicado.

Caso fosse uma tese na área de educação, esta poderia se limitar à forma e ao meio através dos quais os conteúdos deveriam ser apresentados, explorando com maiores detalhes as teorias existentes, traçando paralelos e fazendo pesquisas qualitativas ou quantitativas sobre sua eficácia.

Mas, como este trabalho é parte dos requisitos para a obtenção de título de doutor em Engenharia Mecânica, nada mais justo do que tratar do assunto enquanto problema de engenharia, como na verdade é.

Com o anseio de responder, com “cabeça de engenheiro”, ao problema identificado - o método tradicional de ensino não mais responde aos quesitos para a formação do futuro engenheiro - escolheu-se a bicicleta como exemplo de projeto a ser desenvolvido através da metodologia PBL.

Assim, percorreu-se o longo caminho que vai do entendimento e da modelagem do veículo (bicicletas e motocicletas) até a proposta de solução educacional apresentada. Pesquisou-se inicialmente o estado-da-arte do conhecimento da dinâmica desses veículos. Como não poderia deixar de acontecer em soluções de engenharia, verificaram-se também os recursos já disponíveis que pudessem auxiliar na tarefa de compreender esse conhecimento - o que levou a se considerar o Laboratório de Desenvolvimento de Sistemas Mecatrônicos (LDSM).

Somente após ter alcançado domínio suficiente do tema, passou-se então à pesquisa de soluções educacionais. Esta pesquisa foi iniciada com foco na metodologia PBL, que se mostrou adequada ao contexto. No intuito de basear esta assertiva, foram desenvolvidas, a partir dos preceitos deste método, sugestões de projetos e temas para abranger os dez períodos da formação de engenharia. Através da comparação de seus conteúdos com aqueles tratados

nos currículos atuais das engenharias analisadas, verificou-se que eles cobriram em grande parte a grade curricular, não deixando assim lacunas importantes na formação técnica. Constatou-se também, através de pesquisas bibliográficas e experimento aplicado pelo autor (abordado no item 6.1.1.3), que esta metodologia vai além e possibilita a aquisição de competências não ligadas à formação técnica que são importantes para o profissional da área na atualidade, como capacidade de trabalhar em equipe multidisciplinar e busca constante por conhecimento. Tais competências não são devidamente consideradas no formato da grade curricular vigente.

Assim, conclui-se através deste trabalho que o método de PBL é ferramenta adequada para responder ao problema identificado no início. Pode-se afirmar que, através de sua utilização integrada ao currículo, é possível formar engenheiros com perfil em sintonia com as exigências atuais.

Outra contribuição deste trabalho está no desenvolvimento da modelagem dinâmica de bicicletas/motocicletas através de Grafos de Ligação e Fluxo de Potência, permitindo sua modularização. Através do uso dessas técnicas e a escolha desse formado em módulos, possibilita-se o acoplamento das diversas partes/características de interesse (para, por exemplo, construir um aparato educacional), o que torna o entendimento do comportamento do sistema resultante mais simples e intuitivo.

Como subproduto deste percurso, importa mencionar a criação de três projetos construídos segundo a metodologia PBL que visam servir de exemplos para desenvolvimentos futuros. Dentro ainda do quadro de subprodutos, encontram-se seis sugestões de temas que poderão ser base para novos projetos.

Este trabalho é uma resposta para o problema comprometida com a vocação de engenheiro do autor. E foi assim que surgiram as ideias, não somente da organização do trabalho, mas também de sua própria essência. Entretanto, se nas considerações finais é importante falar como o autor entende a essência de seu trabalho, não é menos importante esclarecer sobre aquilo que o trabalho não é.

Não foi objetivo desta tese o de demonstrar que as metodologias aqui aplicadas são as melhores, nem para a modelagem da bicicleta/motocicleta (Fluxo de Potência e Grafo de Ligação), nem tampouco para o ensino de engenharia (PBL). Pode-se concluir no entanto que, ainda que não sejam necessariamente os melhores, este trabalho indica grandes vantagens dos métodos aqui apresentados quando comparados aos seus predecessores, em

especial o PBL quando comparado ao método tradicional de ensino de engenharia.

Este trabalho também não tem por finalidade sua aplicação direta no dia-a-dia de uma faculdade, seja de Engenharia Mecânica, seja de Engenharia de Controle e Automação. As limitações dos projetos e temas apresentados foram detalhadamente citadas ao final do capítulo 6 – e apontam para a natural necessidade de eventuais adaptações e ajustes.

O sentimento de autoria é condição “sine qua non” para que um projeto em PBL tenha êxito. Este sentimento não deve estar presente somente no corpo discente: sua presença é também essencial no corpo docente. Portanto os projetos aqui sugeridos servem como exemplos e no melhor dos casos como base para que uma equipe de docentes, partindo deles e das ideias neles contidas, tenha como começar e seguir adiante.

A principal ambição do autor com esta pesquisa é que esta sirva de embasamento, junto a outras diversas pesquisas sobre o assunto (algumas delas citadas na bibliografia), para motivar e dar ferramentas e argumentos para a realização da mudança tão premente nas escolas de engenharia de nosso país.

Quem almejar seguir pelos caminhos aqui apresentados poderá encontrar nestas páginas referências que vão desde o histórico e das vantagens do método de aprendizagem baseada em projetos, passando por pesquisas sobre o assunto (contendo argumentos pró e contra) e procedimentos para sua implantação, sobre suas fraquezas e como enfrentá-las, até um resumo de seu funcionamento, um manual para sua implantação e alguns exemplos para serem adaptados.

Muito ainda há a percorrer e vários são os caminhos deixados em aberto por este trabalho, como o procedimento para a determinação de modelos dinâmicos de bicicletas e/ou motocicletas na forma analítica, através do fluxo de potência entre seus componentes. Dessa forma será possível interpretar as características desses veículos, como a influência dos efeitos giroscópicos sobre as interações entre as dinâmicas longitudinal, lateral e vertical desses veículos, com o objetivo de avaliar, entre outros aspectos, a estabilidade nos planos vertical e lateral.

Se não há grande margem para desenvolvimento dos modelos de bicicleta e motocicleta (apesar de sempre se poder adicionar outro efeito, modificar as hipóteses ou testá-las), o desdobramento dos seis temas propostos ou mesmo o

melhor detalhamento dos três projetos apresentados poderiam ser assunto para futuros trabalhos.

Outra possibilidade para trabalhos futuros foi vista no capítulo 5 e diz respeito à “idade avançada” dos projetos pedagógicos dos departamentos de engenharia consultados. Caso se tenha abertura para uma revisão total dos currículos, uma grande oportunidade se apresenta para traçá-la desde seu início através da metodologia proposta. Uma pesquisa que detalhe cada assunto obrigatório a ser tratado e incorpore a eles todas as competências que se almeja do engenheiro atual pode ser bastante proveitosa para o desenvolvimento de um currículo na filosofia do PBL.

Por fim, este autor espera ver o dia em que, ao assistir a uma defesa de tese ou a uma apresentação de pesquisa, se veja confrontado com dados que mostrem que a metodologia aqui sugerida estaria obsoleta, significando assim que se fez bom uso dela enquanto ela serviu, mas que se foi capaz de reconhecer, chegado o momento, que também ela, que já tinha sido resposta a um problema, doravante fará parte do problema a ser resolvido.

8 Referências Bibliográficas

8.1. Livros e Artigos

8.1.1. Dinâmica de motocicletas e bicicletas

ARIOUI, H. *et al.* Mechatronics, Design, and Modeling of a Motorcycle Riding Simulator. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, v. 15, n. 5, p. 805–818, outubro 2010.

ÅSTRÖM, K.J.; KLEIN, R.E.; LENNARTSSON, A., Bicycle Dynamics and Control – Adapted bicycles for education and research, IEEE Control Systems Magazine, p. 26-47, agosto 2005.

BEZNOS, A. V. *et al.*, Control of autonomous motion of two-wheel bicycle with gyroscopic stabilization, IEEE International Conference on Robotics and Automation 1998 Proceedings, p. 2670-2675, IEEE, 1998.

BORUTZKY, W., Bond Graph Methodology, Springer-Verlag, 2010.

CHIYODA, S. *et al.*; Development of a motorcycle simulator using parallel manipulator and head mounted display. In: Driving Simulation Conference (DSC00). 2000.

BOS, A. M., A Bond Graph Approach to the Modelling of a Motorcycle, 3rd Seminar on Advanced Vehicle System Dynamics, Vehicle System Dynamics, Vol. 16, Sup. 1, 1987.

COOPER, K.R., The effects of aerodynamics on the performance and stability of high speed motorcycles, In: Proc. 2nd AIAA Symp. Aerodynamics Sport Competition Automobiles, 1974.

ESCALONA, J. L.; RECUERO, A. M. A bicycle model for education in multibody dynamics and real-time interactive simulation. Multibody System Dynamics, v. 27, n. 3, p. 383–402, março 2012.

FAJANS, J., Steering in bicycles and motorcycles, American Journal of Physics, v. 68, n. 7, p. 654-659, 2000.

FERRAZZIN, D. *et al.* THE MORIS MOTORCYCLE SIMULATOR: AN OVERVIEW. SAE Technical Paper. dezembro 2001.

HUYGE, K., AMBRÓSIO, J.; PEREIRA, M., A control strategy for the dynamics of a motorcycle, including rider, Proceedings of the ENOC-2005, 2005.

JONES, D.E. H. The stability of the bicycle. Physics Today vol. 23, n. 3, p. 34–40, Abril de 1970, Republicado em Physics Today vol. 59, n.9, p. 51–56, setembro de 2006.

KARNOPP, D. C, MARGOLIS, D. L. e ROSENBERG, R. C., System Dynamics: Modeling and Simulation of Mechatronic Systems, 4th Edition, John Wiley e Sons, 2006.

KLEIN, R. E. Using bicycles to teach system dynamics. IEEE Control Systems Magazine, v. 9, n. 3, p. 4–9, abril 1989.

KOOIJMAN, J. D. G.; SCHWAB, A. L.A Review on Handling Aspects in Bicycle and Motorcycle Control. ASME, 2011. Disponível em: <<http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleid=1640318>>. Acessado em 10 de fevereiro de 2016

_____ ; _____. A review on bicycle and motorcycle rider control with a perspective on handling qualities. Vehicle System Dynamics, v. 51, n. 11, p. 1722–1764, novembro 2013.

LIMEBEER, D.J.N; SHARP, R.S., Single-track Vehicle Modeling and Control – Bicycles, Motorcycles, and Models, IEEE Control Systems Magazine, v. 26, n. 5, p. 34-61, 2006.

MARTINS, G.N., SPERANZA NETO, M., MEGGIOLARO, M.A., Dynamic Models of Bicycles and Motorcycles using Power Flow Approach, CONEM, ABCM, 2016.

MAO, Yan-Ji; LIAO, Yu-Wei; TSENG, Ching-Huan. DynaTester: The Dynamic Brake Test Rig for Bicycles. In: Modelling, Identification and Control. p. 385-390. fevereiro, 2003.

MEIJAARD, J. P. *et al.* Linearized dynamics equations for the balance and steer of a bicycle: a benchmark and review. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, v. 463, n. 2084, p. 1955–1982, 8 agosto 2007.

OGATA, K., Engenharia de Controle Moderno, 3a. Edição, LTC Editora, 2000.

REDFIELD, R., Large motion mountain biking dynamics, Vehicle System Dynamics, v. 43, n. 12, p. 845-865, 2005.

SCHWAB, A. L.; MEIJAARD, J. P.; PAPADOPOULOS, J. M.A multibody dynamics benchmark on the equations of motion of an uncontrolled bicycle. In:

Proceedings of the Fifth EUROMECH Nonlinear Dynamics Conference, ENOC-2005, p. 511-521, 2005.

SHARP, R. S. The stability and control of motorcycles, *Journal of Mechanical Engineering Science* 13.5, p. 316-329, 1971.

SPERANZA NETO, M., Procedimento para Acoplamento de Modelos Dinâmicos através do Fluxo de Potência, XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, São Paulo, 1999.

SURYANARAYANAN, S., TOMIZUKA, M., WEAVER, M., System dynamics and control of bicycles at high speeds, *Proceedings of the 2002 American Control Conference*, p. 845-850, IEEE, 2002.

YI, J. *et al.*, Trajectory tracking and balance stabilization control of autonomous motorcycles, *Proceedings of International Conference on Robotics and Automation 2006*, p. 2583-2589, IEEE, 2006.

ZOLLMAN, D. A. *The Bicycle: A Vehicle for Teaching Physics*. Departamento de Física, Universidade Estadual do Kansas, 2005.

8.1.2. Educação em engenharia

BANKEL, J. *et al.* The CDIO syllabus: a comparative study of expected student proficiency. *European Journal of Engineering Education*, v. 28, n. 3, p. 297–315, setembro 2003.

BARROWS, H. S., Tamblyn, R. *Problem-Based Learning: An Approach to Medical Education*. New York: Springer, 1980

_____ Problem-based learning in medicine and beyond: A brief overview. *New Directions for Teaching and Learning*, v. 1996, n. 68, p. 3–12, 1996.

BONWELL, C. C.; EISON, J. A., *Active learning: creating excitement in the classroom*. Washington, DC: School of Education and Human Development, George Washington University, 1991.

BRUNER, J., *The Process of Education*. Cambridge, MA: The President and Fellows of Harvard College. 1960.

CARVALHO, C. M. P., *Professora, no teatro pode rir?*. Edições UESB, Vitória da Conquista. 2013.

CARVALHO, Dinis; LIMA, Rui M. Organização de um processo de aprendizagem baseado em projectos interdisciplinares em engenharia. In: MARTIN, Z. *et al.* (Orgs.). CONGRESSO BRASILEIRO DE ENSINO DE ENGENHARIA COBENGE2006, 34., Passo Fundo. Universidade de Passo Fundo, 2006. p. 1475-1488.

CRUZ FILHO. M.F., “Thorstein Veblen - O Teórico da Economia Moderna”. Disponível em: <<https://sites.google.com/site/murillocruzfilho/home/thorstein-veblen---o-teorico-da-economia-moderna>>. Acessado em 26 de outubro de 2015.

DURAND, T., “The alchemy of competence”. In : Strategic Flexibility, New York: Wiley, p. 303-30, 1998.

FELDER, R. M., WOODS, D. R., STICE, J. E. & RUGARCIA, A. “The future of Engineering Education II. Teaching methods that work” Chemical Engineering Education 34(1): 26–39, 2000. Disponível em: <http://www2.ncsu.edu/unity/lockers/users_/f/felder/public/>. Acessado em 23 de março de 2013.

GARDNER, H. Multiple intelligences: the theory in practice. 30. dr ed. New York, NY: Basic Books, 2002.

GRAHAM, R., UK approaches to engineering project-based learning. White Paper sponsored by the Bernard M. Gordon/MIT Engineering Leadership Program. 2010. Disponível em: <http://www.rhgraham.org/RHG/Recent_publications_files/MIT%20White%20Paper%20-%20UK%20PjBL%20April%202010.pdf>. Acessado em 16 de outubro de 2015.

GROTEWELL, P. G.; BURTON, Y. R. (EDS.). Early childhood education: issues and developments. New York: Nova Science Publishers, 2008.

HARMER, N.; STOKES, A., The benefits and challenges of project-based learning - A review of the literature, Pedagogic Research Institute and Observatory (PedRIO), Plymouth University, Inglaterra, 2014.

HUMBOLDT, W. Sobre a Organização Interna e Externa das Instituições Científicas Superiores em Berlim. In.: CASPER, Gerhard & HUMBOLDT, Wilhelm von. Um mundo sem Universidades?. Rio de Janeiro: EdUERJ, 1997.

ILLICH, I. Energy and Equity. London: Calder & Boyars, 1974.

KAMP, A., Delft Aerospace Engineering Integrated Curriculum. Proceedings of the 7th International CDIO Conference, Technical University of Denmark, Copenhagen, Dinamarca, junho, 2011.

KAMP, A.; KLAASSEN, R., Making curricular change: Case report of a radical reconstruction process. Proceedings of the 9th International CDIO Conference, Engineering Leadership in Innovation and Design, Cambridge, Massachusetts, USA, June 9-13, 2013. Authors version. Anais...CDIO, 2013.

Disponível em: <<http://repository.tudelft.nl/view/ir/uuid:cbc70978-62cd-44cb-822d-419387427efa/>>. Acessado em 29 de março de 2015

KOLMOS, A.,: Premises for changing to PBL. *International Journal for the Scholarship of Teaching and Learning*, 4(1), p. 1-7, 2010. Disponível em: <http://ctl.ok.ubc.ca/__shared/assets/_Kolmos45471_.pdf>. Acessado em 24 de setembro de 2015

LIMA, R. M. *et al.* A case study on project led education in engineering: students' and teachers' perceptions. *European Journal of Engineering Education*, v. 32, n. 3, p. 337–347, junho 2007.

LIMA, R. M. *et al.* Estrutura de Gestão para Planejamento e Execução de Projetos Interdisciplinares de Aprendizagem em Engenharia. In: CAMPOS, L. C. *et al.* (Org.). *Educação em Engenharia: Novas Abordagens*. 1ed. São Paulo, Brasil: EDUC Editora da PUC-SP, 2011, p. 87-121.

LEHMANN, M. *et al.* Problem-oriented and project-based learning (POPBL) as an innovative learning strategy for sustainable development in engineering education. *European Journal of Engineering Education*, v. 33, n. 3, p. 283–295, junho 2008.

MARKHAM, T. *Project based learning: design and coaching guide : expert tools for innovation and inquiry for K-12 educators*. HeartIQ Press, Califórnia, EUA, 2012.

MASSON, T. J., *et al.*, Metodologia de Ensino: Aprendizagem Baseada Em Projetos (PBL), artigo publicado XL Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia. Belém, 2012. Disponível em: <<http://www.abenge.org.br/CobengeAnteriores/2012/artigos/104325.pdf>>. Acessado em 12 de agosto de 2015.

MONTESSORI, M.; HOLMES, H. W. *The Montessori method*. Radford, VA: Wilder Publications, 2008.

NOSE, M. M., REBELATTO, D. A. N. O Perfil do Engenheiro Segundo as Empresas. In: XXIX Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, 2001, Porto Alegre, RS, Brasil. Disponível em <<http://www.abenge.org.br/CobengeAnteriores/2001/trabalhos/DTC007.pdf>>. Acessado em 25 de abril de 2015.

PASSOS, F. L.; HERDY, F. H.; PASSOS, F. V. *Aprendizado Baseado em Problema: O PBL nos Cursos de Engenharia e Arquitetura no Brasil*, XXXVIII COBENGE. Fortaleza, 2010.

POWELL, P. C.; WEENK, W. *Project-led engineering education*. Utrecht [The Netherlands]: Lemma, 2003.

RIBEIRO, L.R.C.; MIZUKAMI, M.G.N. Student Assessment of a Problem-Based Learning Experiment in Civil Engineering Education. *Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice*. p. 13-18. 2005.

SALERMO, M. S. *et al.* Uma proposta de sistematização do debate sobre a falta de engenheiros no Brasil. São Paulo: USP. 2013.

SCHNAID, F. *et al.* O Perfil do Engenheiro ao Longo da História .In: XXIX Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, 2001, Porto Alegre, RS, Brasil. Disponível em <<http://www.abenge.org.br/CobengeAnteriores/2001/trabalhos/DTC021.pdf>>. Acessado em 25 de abril de 2015.

SILVEIRA, M. A. *et al.* Project-Based Learning (PBL) Experiences in Brazil. In: *Research on PBL Practice in Engineering Education*. [s.l.] Sense Publishers, p. 155 – 168.2009.

SLOUGH, S. W.; MILAM, J.; Theoretical framework for project-based learning (PBL).In: R. M.CAPRARO; M. M. CAPRARO; J. MORGAN (Eds.) *Project-based learning: An integrated science, technology, engineering, and mathematics (STEM) approach* (2nd Edition, pp. 15-28). Rotterdam, The Netherlands: Sense. 2008.

ULSETH, R.; JOHNSON, B. 100% PBL curriculum: Startup phase complete. IEEE, outubro 2014. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7044288>>. Acessado em 11 de agosto de 2015.

WEENK, W.; GOVERS, E.; VLAS, H. Training in project-based education: practise as you preach. *European Journal of Engineering Education*, v. 29, n. 4, p. 465–475, dezembro 2004.

WERTHEIM, J., A sociedade da informação e seus desafios. In: *Ciência da informação*, v. 29, n. 2, p.71-77, maio/agosto 2000.

8.2.

Teses, Dissertações e Projetos de Final de Curso

8.2.1.

Dinâmica de motocicletas e bicicletas

ALBUQUERQUE, A.N., Modelagem e simulação de uma Plataforma de Stewart Controlada usando Sensores Inerciais, Dissertação de Mestrado, DEM/PUC-Rio, 2012.

ASSAD, M.M., Caracterização Experimental do Comportamento Dinâmico de um Sistema Pneumático de Atuação para Controle de Sistemas Mecânicos em Escala, Dissertação de Mestrado, DEM/PUC-Rio, 2013.

COSTA, M.S.M., Controle de Veículos Aéreos Quadrirrotores, Uso de Filtros de Kalman para Minimização de Erros na Unidade de Medida Inercial, Dissertação de Mestrado, DEM/PUC-Rio, 2014.

DE LANGE, P. D. L., Rider control identification in bicycling, Master Thesis. TU Delft, Delft University of Technology, 2011.

KOOIJMAN, J. D. G., Bicycle Rider Control: Observations, Modeling & Experiments, Tese de Doutorado. TU Delft, Delft University of Technology, 2012.

LLERENA, R.W.A., Modelagem de um Simulador de Movimentos para Veículos Terrestres em Escala, Dissertação de Mestrado, DEM/PUC-Rio, 2000.

MACHADO, J.A., Modelagem e Simulação de um Dinamômetro para Motores Elétricos Utilizados nos Veículos Terrestres em Escala, Dissertação de Mestrado, DEM/PUC-Rio, 2001.

MOSER, J.N., Desenvolvimento de uma Base Móvel para Testes de Motocicletas em Escala, Projeto de Final de Curso, DEM/PUC-Rio, 2015.

SCHMITT, T., Modeling of a motorcycle in Dymola/Modelica, Tese de Doutorado, Vorarlberg University of Applied Sciences, Dornborn, Áustria, 2009.

SERENO, H.R.S., Análise e Validação Experimental do Sistema de Monitoramento e Controle Empregado em um Veículo Autônomo em Escala, Dissertação de Mestrado, DEM/PUC-Rio, 2012.

VIANNA, F.L.V., Análise Cinemática de um Simulador de Movimentos de 6 Graus de Liberdade com Estrutura Paralela, Dissertação de Mestrado, DEM/PUC-Rio, 2002.

WEIR, D.H., Motorcycle handling dynamics and rider control and the effect of design configuration on response and performance, Tese de Doutorado – UCLA, 1972.

8.2.2. Educação em engenharia

BELHOT, R.V. Reflexões e propostas sobre o "Ensinar engenharia" para o século XXI. Tese (Livre Docência), EESC, USP, São Carlos, 1997.

8.3. Teses, Dissertações e Projetos de Final de Curso em Progresso em Dinâmica de Motocicletas e Bicicletas

ALBUQUERQUE, A.N., Dinâmica e Controle de Mecanismos Paralelos Inseridos em uma Estrutura HIL – Hardware In the Loop: Integração Modelo

Analítico Fechado, Transdutores Inerciais e Atuadores Elétricos Lineares, Tese de Doutorado, DEM/PUC-Rio, previsão de defesa em 2016.

ASSAD, M.M., Implementação e Validação Experimental de Estratégias de Controle para Estabilização e Acompanhamento de Trajetórias de Motocicletas Autônomas, Tese de Doutorado, DEM/PUC-Rio, previsão de defesa em 2017.

BARCELLOS, L., Desenvolvimento de Aparatos para Determinação das Propriedades Inerciais de Veículos em Escala, Projeto de Final de Curso, DEM/PUC-Rio, 2017.

FERREIRA, F.M.R., Modelagem e Simulação de um Aparato para Demonstração do Efeito Giroscópico em Motocicletas e Bicicletas, Projeto de Final de Curso, DEM/PUC-Rio, 2016.

NICOLINO, L., Identificação dos Parâmetros de uma Motocicleta em Escala, Projeto de Final de Curso, DEM/PUC-Rio, 2016.

RATTON, R. B., Desenvolvimento de um Aparato para Visualização e Análise do Comportamento Dinâmico de Motocicletas em Escala, Projeto de Final de Curso, DEM/PUC-Rio, 2016.

8.4.

Páginas na Internet

8.4.1.

Dinâmica de motocicletas e bicicletas

http://bicycle.tudelft.nl/schwab/Bicycle/#May_2010. Acessado em 23 de outubro de 2013.

8.4.2.

Educação em engenharia

<http://archive.pbl-online.org/>. Acessado em 15 de fevereiro de 2013.

http://bie.org/object/video/ap50_experience. Acessado em 27 de março de 2015.

<http://bie.org/resources>. Acessado em 27 de março de 2015.

<http://cd.library.neusoft.edu.cn/CDIO/>. Acessado 13 de maio de 2014.

<http://reinventingpbl.blogspot.fr/>. Acessado 13 de maio de 2014.

http://www.ascd.org/publications/educational_leadership/sept10/vol68/num01/Seven_Essentials_for_Project-Based_Learning.aspx. Acessado em 27 de março de 2015.

<http://www.cdio.org/>. Acessado em 14 de maio de 2014.

<http://www.edutopia.org/blog/how-to-build-calendar-pbl-summer-pd>.

Acessado em 27 de março de 2015.

<http://www.edutopia.org/project-based-learning>. Acessado em 27 de março de 2015.

<http://www.edutopia.org/video/five-keys-rigorous-project-based-learning>.

Acessado em 27 de março de 2015.

<http://www.hightechhigh.org/projects/>. Acessado em 15 de fevereiro de 2013.

<http://www.learning-theories.com/>. Acessado em 15 de fevereiro de 2013.

<http://www.newtechnetwork.org/>. Acessado em 08 de setembro de 2015.

<http://www.studentguide.org/the-complete-guide-to-project-based-learning/>.

Acessado em 8 de setembro de 2015.

<http://www.ucpbl.net/>. Acessado em 8 de setembro de 2015.

<https://www.youtube.com/channel/UCIX-NhJT2FS3g9IbqsEhhg>. Acessado em 13 de maio de 2014.

<https://www.youtube.com/watch?v=IZS2MbxBGCM>. Acessado em 8 de setembro de 2015.

8.5.

Demais Referências

8.5.1.

Dinâmica de motocicletas e bicicletas

SPERANZA NETO, M., Modelos de Bicicletas e Motocicletas para Análise, Síntese e Simulação do Controle Direcional e de Estabilidade, Notas de Aula, DEM/PUC-Rio, 2011 e revisão de 2015.

SPERANZA NETO, M., Dinâmica de um Corpo Rígido através do Fluxo de Potência, Notas de Aula, DEM/PUC-Rio, 2015.

8.5.2.

Educação em engenharia

CNE/CES Resolução 11, de 11 de março de 2002, Institui Diretrizes Curriculares Nacionais do Curso de Graduação em Engenharia. Disponível em: <<http://portal.mec.gov.br/cne/arquivos/pdf/CES112002.pdf>>. Acessado em 8 de setembro de 2015.

DE OLIVEIRA, M. A., Metodologia da Aprendizagem Baseada em Problemas. Disponível em: <<http://www.uel.br/pessoal/moises/Arquivos/APRENDIZAGEMBASEADAEMPROBLEMAS.pdf>>. Acessado em 29 de março de 2015.

ENCYCLOPÆDIA Britannica, 15ed. Chicago, Encyclopædia Britannica Inc., v.6, 1974

INEP, Censo da Educação Superior, 2013, disponível em: <http://download.inep.gov.br/educacao_superior/censo_superior/apresentacao/2014/coletiva_censo_superior_2013.pdf>. Acessado em 15 de janeiro de 2015.

LOHANI, V., AKEN, E. V., Methods and Strategies for Engineering Education, Curriculum Design, and Academic Program Assessment, seminário ministrado na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 16 de abril de 2012.

NATIONAL ACADEMY OF ENGINEERING (ED.). The engineer of 2020: visions of engineering in the new century. Washington, DC: National Academies Press, 2004.

PROJECT-Based Learning - A Resource for Instructors and Program Coordinators.(2011). National Academy Foundation and Pearson Foundation. Disponível em: <http://kupuhouacademy.weebly.com/uploads/2/0/3/0/20309617/pbl_guide_w_6as.pdf>. Acessado em 12 de agosto de 2015.

SPEAKING of Teaching.Stanford university newsletter on teaching. Winter 2001 vol. 11, no. 1, 2001.