



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Antônio Edson Rocha Filho

**Uma Contribuição à Modelagem Orientada para Controle de Operação de Veículos
Elétricos Híbridos**

Florianópolis
2019

Antônio Edson Rocha Filho

Uma Contribuição à Modelagem Orientada para Controle de Operação de Veículos Elétricos Híbridos

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Henrique Simas, Dr. Eng.

Coorientador: Prof. Rodrigo de Souza Vieira, Dr. Eng.

Florianópolis

2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Rocha Filho, Antônio Edson

Uma contribuição à modelagem orientada para
controle de operação de veículos elétricos híbridos /
Antônio Edson Rocha Filho ; orientador, Henrique
Simas, coorientador, Rodrigo de Souza Vieira, 2019.
142 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de
Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós
Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2019.

Inclui referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Dinâmica veicular. 3.
Veículos elétricos híbridos. 4. Modelagem de sistemas
mecânicos. 5. Controle de supervisão. I. Simas,
Henrique. II. Vieira, Rodrigo de Souza. III.
Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

Antônio Edson Rocha Filho

Uma Contribuição à Modelagem Orientada para Controle de Operação de Veículos Elétricos Híbridos

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. André Ogliari, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Lauro Cesar Nicolazzi, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica.

Prof. Jonny Carlos da Silva, Dr. Eng.
Coordenador do Programa

Prof. Henrique Simas, Dr. Eng.
Orientador

Florianópolis, 31 de Julho de 2019.

À minha família e amigos, com carinho.

AGRADECIMENTOS

Apesar de não explicitado, a conclusão desta dissertação só foi possível graças a contribuição direta ou indireta de vários envolvidos. Desse forma, quero expressar aqui meus sinceros agradecimentos:

- À minha família pelo apoio incondicional sempre. Em especial aos meus irmãos, Terezinha e Thiago pela habitual parceria, e aos meus pais, Rosa e Edson, pelo amor e dedicação sem os quais eu não chegaria até aqui;
- Aos professores Henrique Simas e Rodrigo de Souza Vieira, por aceitarem a orientação deste trabalho confiando no meu potencial para finalizá-lo, e por todo o suporte dispendido no decorrer da pesquisa;
- Aos amigos do Núcleo de desenvolvimento Integrado de Produtos (NeDIP) pelas boas conversas, pelos cafés no fim da tarde, e pelas discussões que se tornavam verdadeiras orientações. Destaco uma em especial, onde em um momento delicado da pesquisa Guilherme Loureiro e Paulo Zen me fizeram enxergá-la de uma outra forma, o que me ajudou continuar o trabalho com mais confiança.
- Aos amigos de longas datas Afrânio Costa, Ilmara Cecília, Maria Fernanda, Oliveira Neto e Sérgio Alves pelas ações e palavras de apoio sempre bem vindas, estas, em momentos diferentes, me ajudaram bastante ao longo desta caminhada.
- Aos integrantes das bandas de garagem "Black River and Only Lemons" e "Nirwando" pelos momentos de total descontração com o melhor do *rock and roll*;
- Às instituições e projetos Formula UFSC, Diel Energia e Senai-SC dos quais fiz parte durante o mestrado por proporcionarem um complemento importante de aprendizado;
- Ao POSMEC pela oportunidade e excelência;
- À CAPES pelo fomento da pesquisa.

*“Life always gets harder toward the summit: the cold increases, the responsibility increases.”
(Friedrich Nietzsche)*

RESUMO

O desafio de alcançar as metas de emissões por parte dos veículos automotores em um curto e médio prazo tem levantado questões críticas a respeito das tecnologias existentes atualmente. Neste sentido, os veículos elétricos híbridos (VEH) têm se mostrado a opção mais viável e promissora. Estes combinam os benefícios dos veículos puramente elétricos e convencionais ao utilizarem simultaneamente um motor de combustão interna (MCI) e uma ou mais máquinas elétricas no seu trem de força, reduzindo, assim, consideravelmente o consumo de combustível e as emissões. Para alcançar estes resultados, os VEHs contam com um controle de supervisão que comporta uma estratégia de operação responsável por garantir que os diferentes propulsores funcionem próximos às suas respectivas zonas de maior eficiência. No entanto, a alta complexidade do trem de força, decorrente da natureza multidisciplinar, e da grande quantidade e interdependência entre os componentes de um VEH faz com que a tarefa de projetar tais sistemas se torne bastante complexa. Neste cenário, uma abordagem baseada em modelos de simulação tem um papel importante no processo de desenvolvimento de sistemas de controle como os VEHs, ao permitir a predição do comportamento global do sistema, além de garantir que os custos e demoras de uma prototipagem sejam superados. Dessa forma, este trabalho tem como objetivo propor e aplicar uma sistemática para modelagem de VEHs com foco no controle de supervisão. Esta se divide em atividades que vão desde a definição do problema até a verificação e validação do modelo. A sistemática foi avaliada por meio de um estudo de caso no qual foi desenvolvido um modelo de planta e de controle para um VEH do tipo complexo baseado no Toyota® Prius® com vista na economia de combustível. Os modelos de planta e controle foram desenvolvidos em ambiente Amesim® e Matlab/Simulink®, respectivamente. Estes interagem por meio de uma co-simulação entre os dois *softwares*. O veículo é modelado e um controle heurístico baseado em regras é implementado e validado frente resultados experimentais. Os modelos ainda são utilizados para avaliar o impacto de mudanças em parâmetros de controle no consumo de combustível. Como resultado, observou-se que a sistemática proposta tem aplicabilidade, ao permitir o tratamento de um problema complexo, de forma relativamente rápida e estruturada.

Palavras-chave: VEH, Economia de combustível, Sistemática, Modelagem, Controle de supervisão.

ABSTRACT

The challenge of meeting automotive vehicle emissions targets in the short and medium-term has raised critical questions about existing technologies. As such, hybrid electric vehicles (HEV) have proven to be the most viable and promising option. These combine the benefits of both pure electric and conventional vehicles by simultaneously utilizing an internal combustion engine (ICE) and one or more electric machines in their power train, thereby considerably reducing fuel consumption and emissions. To achieve these results, the HEVs have a supervisory control that includes an operating strategy responsible for ensuring that the different thrusters operate close to their respective maximum efficiency zone. However, the high complexity of the powertrain, due to its multidisciplinary nature, and the large amount and interdependence between the components of an HEV, make the task of designing such systems very complex. In this scenario, an approach based on simulation models plays an important role in the process of developing control systems such as HEVs, by allowing the prediction of behavior of the overall system behavior and ensuring that prototyping costs and delays are overcome. Thus, this dissertation aims to propose and apply a systematic approach for modeling HEVs with a focus on supervisory control. Such systematic approach is divided into activities ranging from problem definition to model verification and validation. The systematic approach was evaluated through a case study in which a plant and a control model were developed for an HEV of complex type based on Toyota[®] Prius[®] for fuel economy. The plant and control models were developed in Amesim and Matlab/Simulink environments, respectively. These interact through a co-simulation between the two software. The vehicle was modeled and a rule-based heuristic control implemented and validated against experimental results. The models were still used to assess the impact of changes in control parameters on fuel consumption. As a result, it was observed that the proposed systematic approach can be applied to treat a complex problem, relatively quickly and with structure.

Keywords: HEV. Fuel economy. Systematic Approach. Modeling. Supervisory Control.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Histórico e projeção do número de veículos (1950-2030)	19
Figura 1.2 – Panorama do consumo mundial de petróleo	20
Figura 1.3 – Consumo global de petróleo bruto por setor em 2015	21
Figura 1.4 – Histórico e metas de emissões até 2030	22
Figura 1.5 – Diagrama de controle de um VEH	24
Figura 2.1 – Honda Insight 1999 e Toyota Prius 1997	27
Figura 2.2 – Arquitetura dos VEHs: (a) Série, (b) Paralelo, (c) Série-Paralelo, e (d) complexo	28
Figura 2.3 – Comparação entre tipos de veículos de acordo com o grau de hibridização	31
Figura 2.4 – Processo de Desenvolvimento Integrado de Produto	32
Figura 2.5 – Processo simples de modelagem	34
Figura 2.6 – Processo de resolução de problemas baseada em modelos	35
Figura 2.7 – Processo de modelagem e simulação de sistemas	38
Figura 2.8 – Esquema da arquitetura de controle de duas camadas em um VEH . . .	39
Figura 2.9 – Diferenças entre verificação e validação	40
Figura 2.10 – Simulação MiL	40
Figura 3.1 – Representação esquemática das forças atuantes sobre um veículo em movimento	42
Figura 3.2 – Exemplo de ciclo de condução	46
Figura 3.3 – Balanço de energia em um ciclo de condução	47
Figura 3.4 – Modelagem quase-estática (<i>backward</i>)	49
Figura 3.5 – Modelagem dinâmica (<i>forward</i>)	50
Figura 3.6 – Fluxo de energia para um HEV série utilizando as abordagens quase-estática (a) e dinâmica (b)	51
Figura 3.7 – Fluxo de energia para um HEV paralelo utilizando as abordagens quase-estática (a) e dinâmica (b)	51
Figura 3.8 – Fluxo de energia para um HEV complexo utilizando as abordagens quase-estática (a) e dinâmica (b)	52
Figura 3.9 – Classificação das estratégias de controle em VEHs	54
Figura 3.10 – Controle heurístico de um VEH paralelo utilizando máquina de estados finitos	55
Figura 3.11 – Comparação entre as estratégias PD, AG e regras determinísticas para o gerenciamento do SoC	58
Figura 3.12 – Controle preditivo baseado no reconhecimento do padrão de condução	58
Figura 4.1 – Macrofases da sistemática	60
Figura 4.2 – Macrofase de concepção	61
Figura 4.3 – Exemplos de requisitos funcionais e não-funcionais	62
Figura 4.4 – Exemplo de diagrama de Mudge	63
Figura 4.5 – Processo de análise dos requisitos de modelagem	63
Figura 4.6 – Relação entre nível de abstração e quantidade de parâmetros	65

Figura 4.7 – Macrofase de construção do modelo computacional	67
Figura 4.8 – Escolha da ferramenta para elaboração do modelo da planta	68
Figura 4.9 – Método iterativo incremental para elaborar e integrar os modelos	69
Figura 4.10 – Exemplo de blocos do modelo de planta no Amesim	70
Figura 4.11 – Construção do modelo de controle	71
Figura 4.12 – Integração dos modelos em ambientes iguais	72
Figura 4.13 – Integração por meio de co-simulação	72
Figura 4.14 – Co-simulação mestre-escravo	73
Figura 4.15 – Macrofase de verificação e validação	74
Figura 4.16 – Divisão dos dados de teste em grupos	74
Figura 4.17 – Processo de verificação do modelo	75
Figura 4.18 – Processo de validação do modelo	76
Figura 5.1 – THS utilizado na primeira geração do Toyota Prius	79
Figura 5.2 – Funcionamento da E-CVT para diferentes velocidades do MCI e do veículo	80
Figura 5.3 – Configuração do Trem de força no THS III	82
Figura 5.4 – Requisitos funcionais e não funcionais da modelagem	83
Figura 5.5 – Requisitos funcionais ordenados e funcionalidades da modelagem	84
Figura 5.6 – Ciclo de condução urbano	85
Figura 5.7 – Escopo do modelo conceitual da planta	86
Figura 5.8 – Escopo do modelo conceitual do controlador	87
Figura 5.9 – Restrições de velocidade dos atuadores	87
Figura 5.10 – Mapa de eficiência do MCI	88
Figura 5.11 – Mapa do consumo de combustível do MCI	89
Figura 5.12 – Curva de potência ótima de operação do MCI	89
Figura 5.13 – Mapa de eficiência do MG1	90
Figura 5.14 – Mapa de eficiência do MG2	91
Figura 5.15 – Variação do SoC com a voltagem de circuito aberto da bateria	91
Figura 5.16 – Variação da resistência interna em relação ao SoC e à temperatura da bateria	92
Figura 5.17 – Regiões dos principais modos de operação no Prius THS-III	92
Figura 5.18 – Variação do SoC em função da demanda de potência da bateria	93
Figura 5.19 – Modelo do MCI no Amesim detalhando a bordagem multi-portas	95
Figura 5.20 – Modelo das máquinas elétricas no Amesim detalhando a bordagem multi- portas	95
Figura 5.21 – Modelo do PSD no Amesim detalhando a bordagem multi-portas	96
Figura 5.22 – Inclusão do bloco de representação do controlador no Amesim	96
Figura 5.23 – Diferenças entre submodelos para o PSD no Amesim	97
Figura 5.24 – Definição de parâmetros para o MG2 no Amesim	97
Figura 5.25 – Fluxograma de seleção dos modos de operação	98
Figura 5.26 – Função para ligar o MCI	99
Figura 5.27 – Implementação do ECU	99
Figura 5.28 – Implementação do controle do MG1	100

Figura 5.29 – Implementação do MCU	100
Figura 5.30 – Controle de operações preliminar	101
Figura 5.31 – Rotações referente à operação dos dos atuadores no PSD	102
Figura 5.32 – Teste da faixa de operação ótima no MCI	102
Figura 5.33 – Detalhes dos modelos de bateria e inversor	103
Figura 5.34 – Detalhes do modelo de veículo utilizado na planta	104
Figura 5.35 – Controle dos modos de operação completo	105
Figura 5.36 – Lógica de controle: modo parado com carregamento	105
Figura 5.37 – Lógica de controle: modo VEH	106
Figura 5.38 – Lógica de controle: modo VEH carregando	106
Figura 5.39 – Lógica de controle: modo VEH carregando	107
Figura 5.40 – Lógica de controle: modo de frenagem regenerativa	107
Figura 5.41 – Variação do SoC durante o ciclo de condução	109
Figura 5.42 – Validação do Condutor (NBR 6601 x simulação)	110
Figura 5.43 – Rotação do MCI	110
Figura 5.44 – Variação de potência da bateria (simulação x experimento)	111
Figura 5.45 – Consumo de combustível (simulação x experimento)	111
Figura 5.46 – Efeitos da potência mínima requerida no SoC da bateria	112
Figura 5.47 – Efeitos da potência mínima requerida no consumo de combustível	112
Figura A.1 – Modelo de um VEH série/paralelo no Matlab/simulink	122
Figura A.2 – Modelo de um VEH no Advisor	123
Figura A.3 – Modelo de um VEH no Autonomie	124
Figura A.4 – Modelo de um VEB no IGNITE	124
Figura A.5 – Modelo de um VEH série/paralelo no Sincenter Amesim	125
Figura B.1 – Configuração típica de um PSD em um VEH	126
Figura B.2 – Representação da causalidade para a modelagem quase-estática de um conjunto planetário	127
Figura B.3 – Representação da causalidade para a modelagem dinâmica de um conjunto planetário	129
Figura C.1 – Modo de operação estacionário com carregamento da bateria	130
Figura C.2 – Modo de operação no início do movimento - partida	131
Figura C.3 – Modo de operação em condição normal	132
Figura C.4 – Modo de operação em alta aceleração	132
Figura C.5 – Modo de operação em altas velocidades de cruzeiro	133
Figura C.6 – Modo de operação em velocidade máxima	134
Figura C.7 – Modo de operação em desaceleração ou frenagem	134
Figura C.8 – Modo de operação reverso	135
Figura D.1 – Priorização dos requisitos usando diagrama de Mudge	136
Figura E.1 – Primeira versão do modelo de planta	137
Figura E.2 – Primeira versão do modelo de controle	138
Figura E.3 – Segunda versão do modelo da planta	139
Figura E.4 – Segunda versão do modelo de controle	140

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Características e resultados de simulação entre as estratégias PD, AG e regras heurísticas	57
Tabela 4.1 – Tabela de seleção do tipo de controle	65
Tabela 5.1 – Comparação entre a segunda e terceira geração do Toyota Prius	81
Tabela 5.2 – Dados referentes ao ambiente e ciclo	84
Tabela A.1 – Especificações técnicas do Toyota Prius terceira geração	141

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AG	Algoritmo Genético
ANL	<i>Argonne National Laboratory</i>
ECMS	<i>Equivalent Consumption Minimization Strategy</i>
EMS	<i>Energy Management System</i>
FTP-75	<i>Federal Test Procedure</i>
FUDS	<i>Federal Urban Driving Cycle</i>
HiL	<i>Hardware-in-the-Loop</i>
JDC	<i>Japanese Driving Cycles</i>
MatLab	<i>Matrix Laboratory</i>
MCI	Motor de Combustão Interna
MiL	<i>Model-in-the-Loop</i>
NEDC	<i>New European Drive Cycle</i>
NREL	<i>U.S. National Renewable Energy Laboratory</i>
PD	Programação Dinâmica
PDP	Processo de Desenvolvimento de Produto
PRODIP	Processo de Desenvolvimento Integrado de Produto
PSAT	<i>Argonne National Laboratory</i>
PSD	<i>Power Split Device</i>
SoC	<i>State of Charger</i>
UDDS	<i>Urban Dynamometer Driving Schedule</i>
VE	Veículo Elétrico
VEB	Veículo Elétrico à Bateria
VECC	Veículo Elétrico a Célula de Combustível
VEH	Veículo Elétrico Híbrido

LISTA DE SÍMBOLOS

M_v	Massa total do veículo
F_x	Força de aceleração
F_t	Força de tração
F_a	Força de arrasto aerodinâmico
F_r	Força de atrito de rolamento
F_g	Força devido a inclinação
ρ_a	Densidade do ar atmosférico
A_f	Área frontal do veículo
C_d	Coeficiente de arrasto aerodinâmico
v	Velocidade do veículo
C_r	Coeficiente de resistência à rolagem
g	Gravidade
δ	Ângulo de inclinação da pista
P_t	Potência de tração
P_x	Potência de aceleração
P_a	Potência de arrasto aerodinâmico
P_r	Potência de rolamento
P_g	Potência de inclinação
E_t	Energia total
E_{cin}	Energia cinética
E_{pot}	Energia potencial
E_r	Energia de rolamento
E_a	Energia de arrasto aerodinâmico
E_{gen}	Energia gerada
E_{per}	Energia perdida
E_{rec}	Energia recuperada
η_{rec}	Eficiência de recuperação
J	Função custo
\dot{m}_f	Vazão mássica de combustível
z	Razão de transmissão em um conjunto planetário
n_s	número de dentes da engrenagem solar
n_a	número de dentes da engrenagem anelar
ω_a	Velocidade angular da engrenagem anelar
ω_p	Velocidade angular da engrenagem satélite
ω_s	Velocidade angular da engrenagem solar
ω_{mci}	Velocidade angular do MCI
ω_{ger}	Velocidade angular do gerador
ω_{rf}	Velocidade angular final
ω_{mot}	Velocidade angular do motor elétrico
T_{rf}	Torque final

T_{ger}	Torque do gerador
T_{mci}	Torque do MCI
T_{mot}	Torque do motor elétrico
r_f	Relação de transmissão final
R_{rd}	Raio da roda
Θ_p	Momento de inércia na engrenagem satélite
Θ_a	Momento de inércia na engrenagem anelar
Θ_s	Momento de inércia na engrenagem solar

CONTEÚDO

1	Introdução	19
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	19
1.2	PROBLEMÁTICA DA MODELAGEM ORIENTADA A CONTROLE DE VEHS	23
1.3	OBJETIVOS DO TRABALHO	24
1.4	CONTRIBUIÇÕES	25
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	25
2	Veículos elétricos híbridos	26
2.1	HISTÓRICO DOS VEHS	26
2.2	CLASSIFICAÇÃO DOS VEHS	27
2.2.1	Arquitetura do trem de força	28
2.2.2	Grau de hibridização	29
2.3	DESENVOLVIMENTO DE VEHS	30
2.3.1	Processo de Desenvolvimento de Produto	30
2.3.2	PDP auxiliado por modelos de simulação	32
2.4	MODELAGEM DE SISTEMAS	33
2.4.1	Conceitos fundamentais	33
2.4.2	Experimentação com modelos	33
2.4.3	Solução de projeto baseada em modelos de simulação	34
2.4.4	Processo de modelagem e simulação	35
2.5	MODELAGEM ORIENTADA A CONTROLE	37
2.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	41
3	Modelagem e Controle de Veículos Elétricos Híbridos	42
3.1	ANÁLISE ENERGÉTICA EM VEHS	42
3.1.1	Dinâmica longitudinal	42
3.1.2	Balço de energia	44
3.1.3	Ciclo de condução	45
3.1.4	Recuperação de energia	46
3.2	MODELAGEM PARA PREDIÇÃO DO CONSUMO EM VEÍCULOS	48
3.2.1	Modelagem quase-estática	48
3.2.2	Modelagem dinâmica	49
3.3	ABORDAGENS DE MODELAGEM EM VEHS	49
3.3.1	Ferramentas computacionais de modelagem	52
3.4	CONTROLE DE VEHS	53
3.4.1	Controle Heurístico	53
3.4.2	Controle ótimo	56
3.4.3	Considerações finais	59
4	Abordagem sistemática para Modelagem Orientada para Controle de Operação de VEHs	60
4.1	VISÃO GERAL DA SISTEMÁTICA	60

4.2	MACROFASE 1 - CONCEPÇÃO	60
4.2.1	Atividade 1.1 - Definir problema	61
4.2.2	Atividade 1.2 - Identificar entradas, saída e restrições do sistema	64
4.2.3	Atividade 1.3 - Obter dados do VEH	66
4.3	MACROFASE 2 - CONSTRUÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL	66
4.3.1	Atividade 2.1 - Selecionar ferramentas de modelagem	67
4.3.1.1	Tarefa 2.1.1 - Selecionar ferramenta da planta	67
4.3.1.2	Tarefa 2.1.2 - Selecionar ferramenta do controlador	68
4.3.2	Atividade 2.2 - Elaborar e integrar modelos	68
4.3.2.1	Tarefa 2.2.1 - Construir modelo da planta	69
4.3.2.2	Tarefa 2.2.2 - Construir modelo do controlador	70
4.3.2.3	Tarefa 2.2.3 - Integrar modelos	71
4.4	MACROFASE 3 - VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO	73
4.4.1	Atividade 3.1 - Dividir dados em grupos	73
4.4.2	Atividade 3.2 - Verificar modelo	74
4.4.3	Atividade 3.2 - Validar modelo	75
4.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	77
5	Estudo de Caso	78
5.1	TOYOTA PRIUS	78
5.1.1	Descrição geral	78
5.1.2	Controle supervisorio	80
5.1.3	Prius THS III	81
5.2	APLICAÇÃO DA SISTEMÁTICA PROPOSTA	82
5.2.1	Macrofase 1 - Concepção	82
5.2.1.1	Atividade 1.1 - Definir problema	82
5.2.1.2	Atividade 1.2 - Identificação das entradas, saídas e restrições	83
5.2.1.3	Atividade 1.3 - Obter dados do VEH	87
5.2.1.3.1	<i>Parâmetros adicionais</i>	<i>88</i>
5.2.1.3.2	<i>Dados de resposta</i>	<i>90</i>
5.2.2	Macrofase 2 - Construção do Modelo Computacional	93
5.2.2.1	Atividade 2.1 - Selecionar ferramentas de modelagem	93
5.2.2.1.1	<i>Tarefa 2.1.1 - Selecionar ferramenta da planta</i>	<i>93</i>
5.2.2.1.2	<i>Tarefa 2.1.2 - Selecionar ferramenta do controlador</i>	<i>94</i>
5.2.2.2	Atividade 2.2 - Elaborar e integrar modelos	94
5.2.2.2.1	<i>Tarefa 2.2.1 - Construir Modelo da planta (Iteração 1)</i>	<i>94</i>
5.2.2.2.2	<i>Tarefa 2.2.2 - Construir Modelo do controlador (Iteração 1)</i>	<i>97</i>
5.2.2.2.3	<i>Tarefa 2.2.3 - Integrar modelos (Iteração 1)</i>	<i>101</i>
5.2.2.2.4	<i>Tarefa 2.2.1 - Construir Modelo da planta (Iteração 2)</i>	<i>102</i>
5.2.2.2.5	<i>Tarefa 2.2.2 - Construir Modelo do controlador (Iteração 2)</i>	<i>103</i>
5.2.2.2.6	<i>Tarefa 2.2.3 - Integrar modelos (Iteração 2)</i>	<i>108</i>
5.2.3	Macrofase 3 - Verificação e validação	108

5.2.3.1	Atividade 3.1 - Dividir dados em grupos	108
5.2.3.2	Atividade 3.2 - Verificar modelo	108
5.2.3.3	Atividade 3.3 - Validar modelo	109
5.2.3.4	Uso da Modelagem	111
5.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS	113
6	Conclusão	114
6.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	115
Referências		116
APÊNDICE A	Ferramentas de modelagem veicular	122
A.1	MATLAB/SIMULINK	122
A.2	ADVISOR	122
A.3	AUTONOMIE	123
A.4	RICARDO IGNITE	123
A.5	SIMCENTER AMESIM	124
APÊNDICE B	Análise quase-estática e dinâmica de um conjunto plane- tário	126
B.1	DISPOSITIVO DE DIVISÃO DE ENERGIA	126
B.2	MODELAGEM QUASE-ESTÁTICA PARA UM PSD	127
B.3	MODELAGEM DINÂMICA DE UM CONJUNTO PLANETÁRIO	128
APÊNDICE C	Modos de operação do Toyota Prius	130
C.1	MODO ESTACIONÁRIO	130
C.2	MODO DE PARTIDA	130
C.3	MODO NORMAL	131
C.4	MODO EM ACELERAÇÃO TOTAL	131
C.5	MODO EM VELOCIDADE MODERADA	132
C.6	MODO DE VELOCIDADE MÁXIMA	133
C.7	MODO DE DESACELERAÇÃO OU FRENAGEM	133
C.8	MODO REVERSO	134
APÊNDICE D	Priorização dos requisitos funcionais	136
APÊNDICE E	Modelos computacionais de planta e controle	137
ANEXO A	Especificações técnicas - THS III	141

1 INTRODUÇÃO

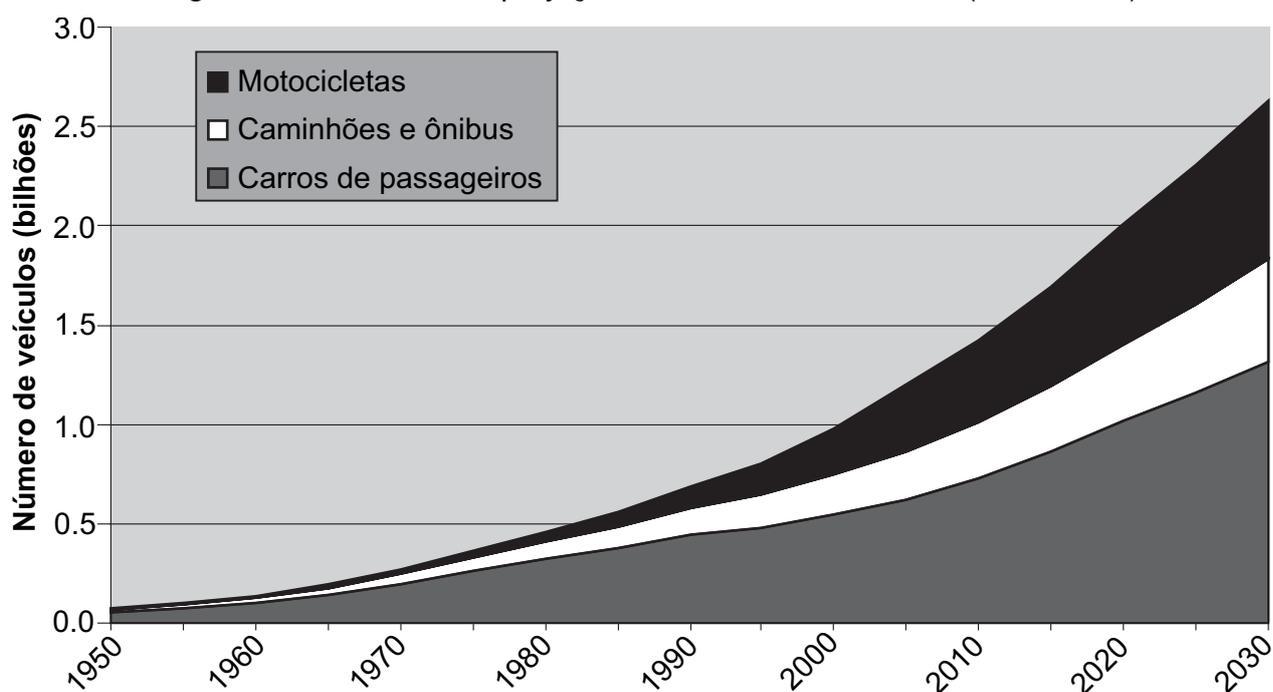
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O Motor de Combustão Interna (MCI) é considerado uma das maiores conquistas tecnológicas da humanidade, e desde o seu surgimento tem alcançado níveis de eficiência satisfatórios que manteve crescente sua importância, sobretudo para indústria automotiva. Ao mesmo tempo, os veículos automotores revolucionaram o conceito de mobilidade, alterando drasticamente a forma de locomoção das pessoas, e contribuindo para o desenvolvimento da sociedade moderna.

Com isso, a indústria de automóveis obteve uma rápida ascensão e trouxe consigo várias outras indústrias que a fornecem suporte. Assim, este segmento alcançou uma significativa relevância no cenário econômico global, e hoje seu desempenho é correlacionado à saúde econômica de qualquer país (OICA, 2015).

Contudo, o alto incentivo à produção de veículos, aliado à deficiência de políticas públicas que auxiliem as crescentes taxas de urbanização, têm implicado em um aumento expressivo da motorização individual. Segundo a Organização Internacional de Fabricantes de Veículos Automotores (OICA, do francês *Organisation Internationale des Constructeurs d'Automobiles*), em 2015 o número de veículos de passageiros em uso no mundo era cerca de 950 milhões, atingindo uma média de 132 veículos para cada 1000 habitantes (OICA, 2017). Além disso, projeções históricas apontam para uma forte e contínua expansão nesse segmento, com previsão de 1,3 bilhão de unidades até 2030 (SPERLING; GORDON, 2009), como mostra a Figura 1.1.

Figura 1.1 – Histórico e projeção do número de veículos (1950-2030)



Fonte: Adaptado de Sperling e Gordon (2009)

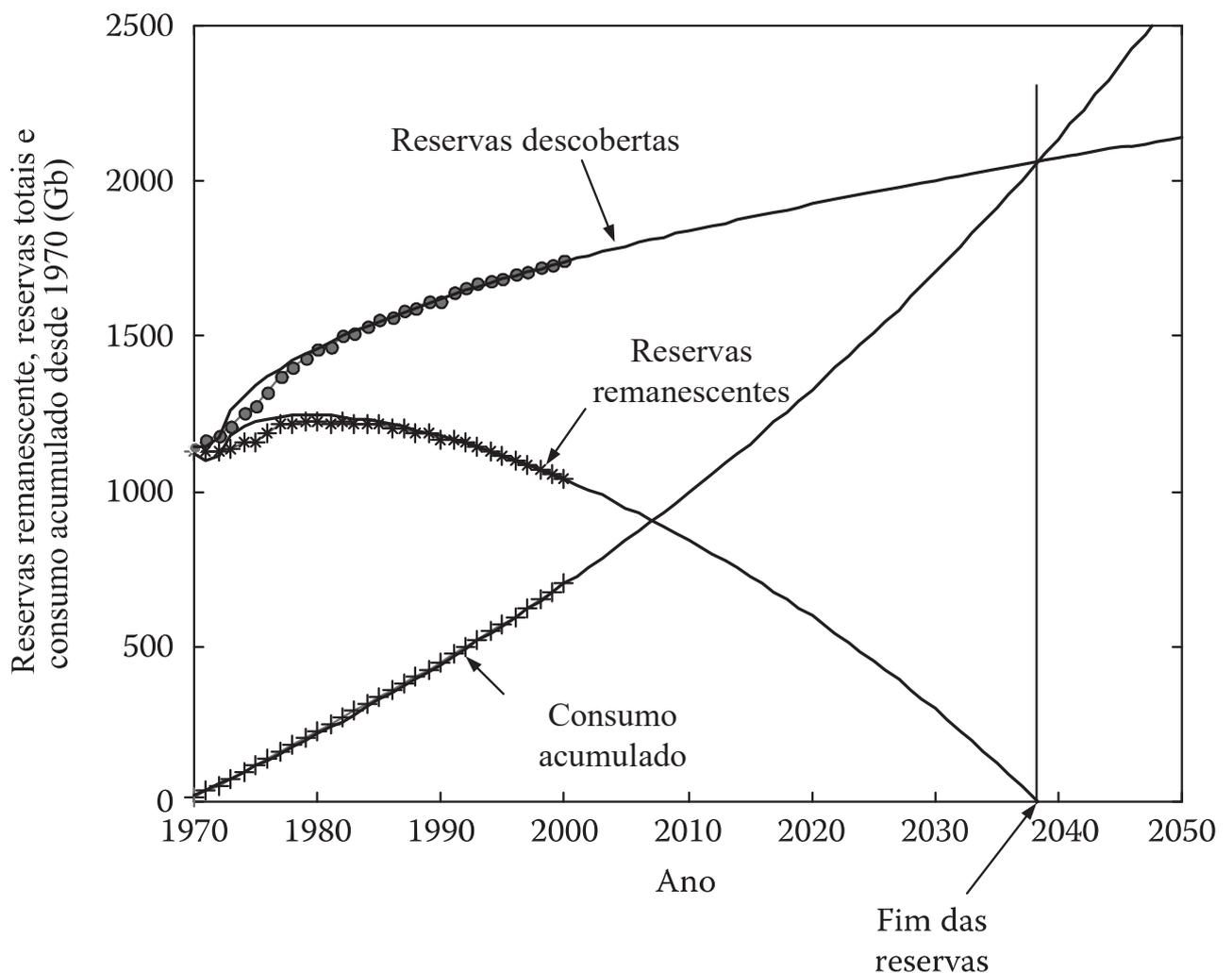
Este uso demasiado e crescente vem ocasionando sérios problemas ao meio ambi-

ente e à saúde humana. Assim temas como poluição ambiental e aquecimento global têm recebido cada vez mais atenção, e mobilizado tanto organizações da sociedade civil como entidades governamentais ao redor do mundo.

O problema ecológico das emissões está diretamente relacionado ao consumo excessivo de combustíveis fósseis. Pois, os gases de efeito estufa como, CO_2 e CH_4 , em conjunto com as emissões nocivas, como NO_x , HC, CO e material particulado, são em grande parte decorrentes da queima de gasolina e óleo diesel em veículos automotores. Estima-se que na Europa aproximadamente 22% das emissões de CO_2 são oriundas dos meios de transporte (EUROPEAN COMMISSION, 2016), no Brasil este número corresponde à 13,5% do total (BNDS, 2016), já em uma escala global o setor de transportes contribui com cerca de 15% das emissões atualmente (UNEP, 2017).

Existe ainda uma outra preocupação, devido ao fato dos combustíveis fósseis possuírem uma reserva limitada, sendo que sua manutenção depende diretamente da descoberta de novas reservas, bem como da taxa na qual são consumidos. Dados recentes mostram que se estas variáveis seguirem as tendências atuais os recursos petrolíferos serão totalmente consumidos até 2038 (EHSANI et al., 2018), como pode ser observado na Figura 1.2.

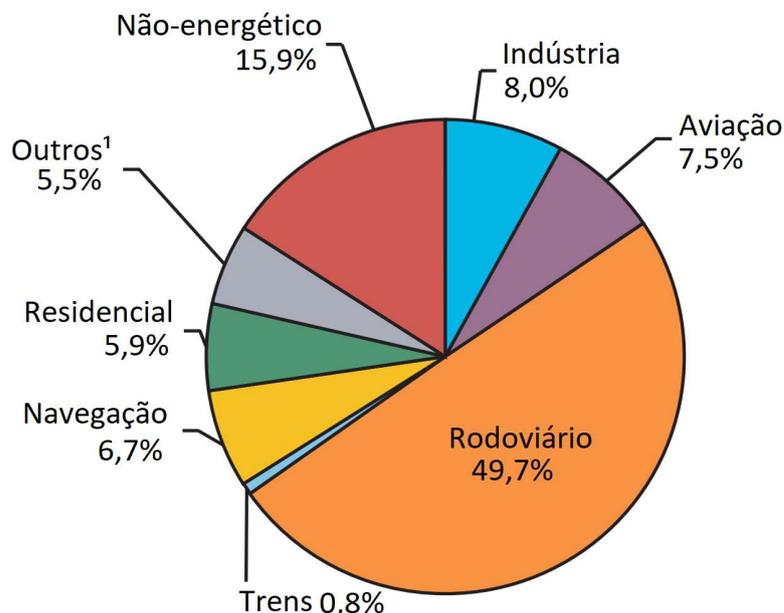
Figura 1.2 – Panorama do consumo mundial de petróleo



Fonte: Adaptado de Ehsani et al. (2018)

Nesse cenário, o setor de transportes é o principal consumidor de petróleo, alcançando 64,7% do consumo mundial em 2015, sendo que 49,7% é demandado apenas pelos veículos rodoviários (IEA, 2017), como mostra a Figura 1.3. Portanto, qualquer melhoria na eficiência energética dos veículos automotores reflete diretamente na redução da demanda de petróleo.

Figura 1.3 – Consumo global de petróleo bruto por setor em 2015



Fonte: Adaptado de IEA (2017)

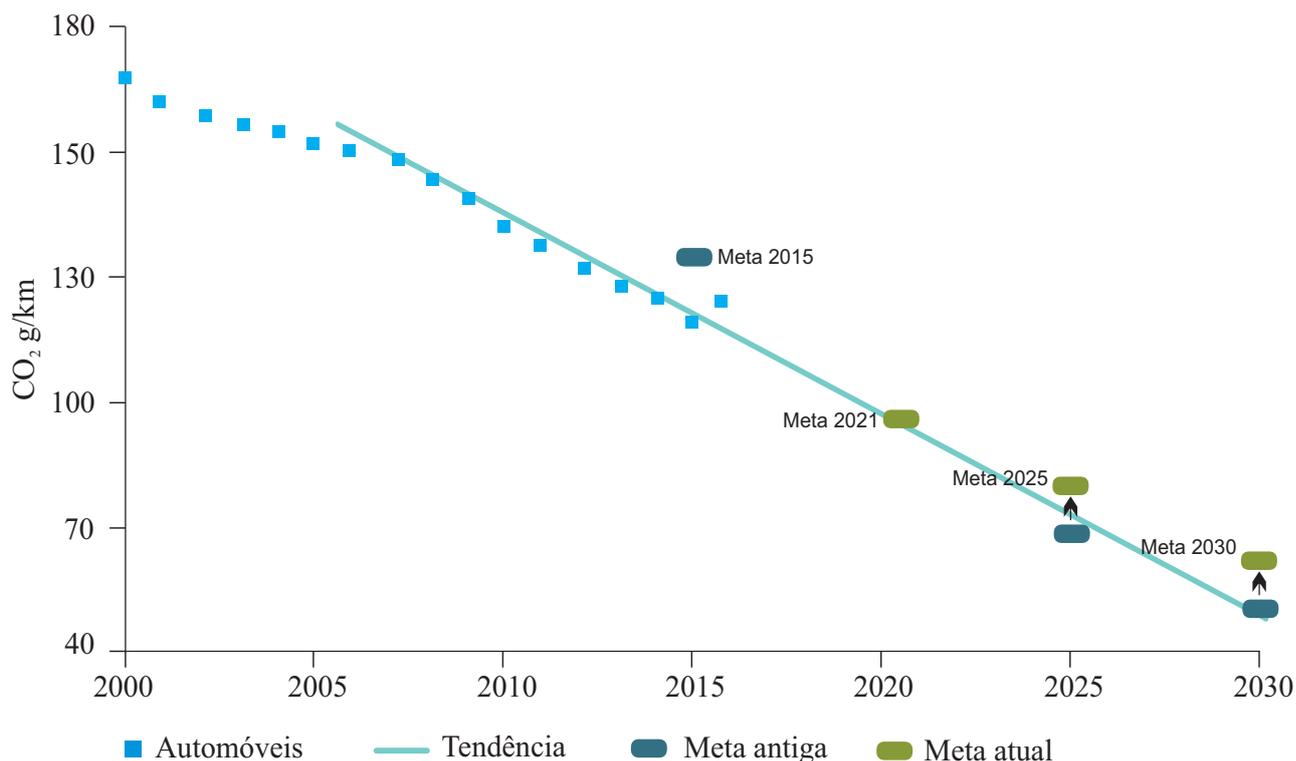
Afim de reduzir o impacto negativo do setor automotivo, vários países têm se esforçado na criação de programas que objetivam a redução e o controle da contaminação atmosférica, bem como a redução de ruídos nos grandes centros (DIAMOND, 2009). Tal controle é realizado através da fixação de limites máximos para emissões, de forma a incentivar o desenvolvimento tecnológico por parte dos fabricantes.

As metas mundiais tendem a ser semelhantes à legislação europeia, onde o objetivo é que até 2021 a emissão de CO₂ por parte de veículos médios movidos a gasolina seja de no máximo 95g/km (EEA, 2017). Porém, como pode ser observado na Figura 1.4, dados recentes indicam que, após um constante declínio nos últimos anos, as emissões médias provenientes de veículos novos tiveram um leve crescimento em 2016. Com isso, as previsões que eram de reduzir em 20% até 2025 e 40% até 2030 (em relação a 2021) precisaram ser revistas, estando em vigor agora as metas de redução de 15% a e 30% respectivamente (EUROPEAN COMMISSION, 2018).

O cenário atual evidencia os desafios de reduzir as emissões em curto e médio prazo, levantando assim questões críticas sobre o potencial das tecnologias disponíveis.

Os veículos convencionais, cuja energia de propulsão é proveniente apenas de um MCI, têm um bom desempenho e contam com uma longa faixa de operação decorrente da alta densidade de energia dos combustíveis derivados do petróleo. Além disso, passaram por constantes melhorias em razão dos grandes avanços científicos alcançados nos últimos anos, principalmente no que diz respeito à redução de emissões.

Figura 1.4 – Histórico e metas de emissões até 2030



Fonte: Adaptado de EEA (2017)

Apesar do forte crescimento tecnológico, acredita-se que os trens de força convencionais se encontram próximos do seu limite de desenvolvimento, e segundo Berggren e Magnusson (2012) a estimativa é que a partir de 2025 as metas para emissões somente poderão ser cumpridas com o uso da energia elétrica nos automóveis, ou seja, com o uso dos chamados Veículo Elétrico (VE).

Os VEs têm como principal objetivo proporcionar um sistema de transporte sustentável, por meio da utilização de energia limpa e eficiente. Estes correspondem a qualquer automóvel que utilize um propulsor elétrico no seu trem de força, e de forma geral podem se tratar de Veículo Elétrico à Bateria (VEB), Veículo Elétrico a Célula de Combustível (VECC) ou Veículo Elétrico Híbrido (VEH).

Os VEBs e VECCs diferenciam-se pelo fato do primeiro usar uma bateria química para armazenar energia elétrica, enquanto que o segundo usa um combustível (geralmente hidrogênio) para, por meio de um processo eletroquímico, gerar a energia elétrica ao invés de armazená-la. Os veículos elétricos puros, como também são chamados os VEBs e VECCs, correspondem à alternativa com o maior potencial de economia do consumo de energia e mitigação das emissões, contudo essas tecnologias ainda possuem limitações que inviabilizam ou dificultam sua aplicação.

Os VEBs especialmente têm como principais desvantagens: a baixa densidade de energia da bateria, resultando em uma menor autonomia; o tempo de carregamento relativamente longo; a curta vida útil da bateria; e o alto custo de produção (ZHAO, 2017). Já os VECCs ainda se encontram em um estágio pouco desenvolvido, sendo seu custo e sistema de reabastecimento os maiores obstáculos para sua aplicação em larga escala (CHAN,

2007).

Atualmente a tecnologia mais viável e promissora são os VEHs, que são o tema central de estudo deste trabalho. Estes usam simultaneamente um MCI e uma ou mais máquinas elétricas no seu sistema de transmissão. Assim, basicamente representam um meio termo entre os VEs puros e os veículos convencionais, ao combinarem as principais vantagens dos dois tipos, ou seja, a alta densidade de energia dos MCIs e a ausência de emissões proveniente de um motor elétrico, ao passo que conseguem atender aos requisitos de dirigibilidade.

No entanto, principal desvantagem dos VEHs em relação aos veículos convencionais se encontra no custo relativamente elevado e no acréscimo de 10 a 30% de massa, devido a adição de componentes ao trem de força (GUZZELLA; SCIARRETTA, 2013; CHAN, 2002).

Além disso, Chan (2007) afirma que o VEH hoje se trata de um equipamento mecatrônico extremamente complexo, que une vários domínios da engenharia automobilística e elétrica. Assim, uma outra desvantagem é a complexidade associada ao desenvolvimento desses veículos, o que exige uma abordagem diferenciada, onde a integração e otimização dos subsistemas são considerações primárias para alcançar um bom desempenho a um custo aceitável.

1.2 PROBLEMÁTICA DA MODELAGEM ORIENTADA A CONTROLE DE VEHS

Segundo Guzzella e Sciarretta (2013), a vantagem econômica dos VEHs em relação aos veículos convencionais é resultante da aplicação (individual ou simultânea) dos seguintes métodos:

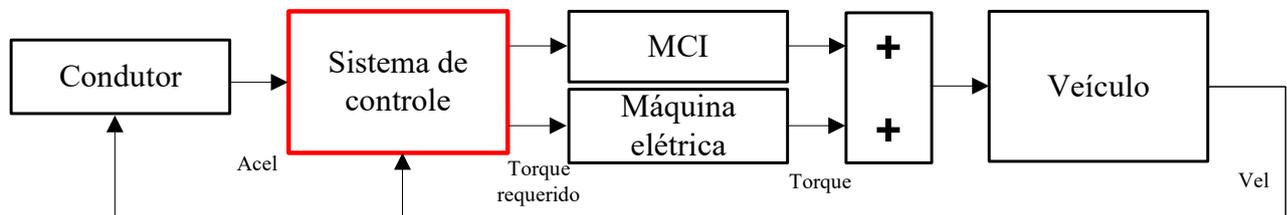
1. Redução do MCI (*downsizing*) sem deixar de cumprir os requisitos de potência do veículo;
2. Exclusão de perdas por acoplamento e desacoplamento da embreagem;
3. Diminuição do consumo ocioso de combustível em situações de paradas (*start/stop*);
4. Otimização da distribuição de potência entre os propulsores;
5. Recuperação da energia que seria dissipada durante as desacelerações (frenagem regenerativa¹);

Os dois primeiros métodos são consequência direta da hibridização do trem de força, já os três últimos estão também diretamente ligados à estratégia de controle utilizada, que é desempenhada por um computador de bordo que gerencia o funcionamento do sistema, de forma a maximizar a economia de combustível e minimizar as emissões, enquanto mantém a carga da bateria próxima de um valor desejado (LIU, 2017; ONORI; SERRAO; RIZZONI, 2016).

¹ Estratégia na qual parte da energia cinética dissipada durante uma frenagem é transformada em energia elétrica através de um dispositivo mecânico (GUZZELLA; SCIARRETTA, 2013)

Como pode ser observado na Figura 1.5, a presença de um sistema de controle é fundamental, uma vez que este determina a potência necessária às solicitações do condutor e a divide adequadamente entre os diferentes propulsores. Portanto, o projeto do controlador é umas das etapas mais importantes dentro do processo de desenvolvimento de um VEH.

Figura 1.5 – Diagrama de controle de um VEH



Fonte: Adaptado de Onori, Serrao e Rizzoni (2016)

O algoritmo de controle de um VEH é geralmente desenvolvido e testado em um ambiente computacional, com o auxílio de ferramentas de modelagem, principalmente por conta dos altos riscos e custos de uma prototipagem nessa etapa de desenvolvimento. Além disso, quando bem desenvolvida, uma modelagem consegue extrapolar com precisão o funcionamento do sistema como um todo, o que é fundamental para o desenvolvimento de uma estratégia de operação eficiente (LIU, 2017).

No entanto, um VEH é um sistema formado por vários subsistemas multidisciplinares, que naturalmente possuem características não lineares. Dessa forma, ocorrem rápidas variações de parâmetros, e grande parte das faixas de operação acontece sob condições incertas e variáveis (LIU, 2017). Este fato justifica a preferência ao uso de modelos a protótipos, porém também evidencia a complexidade em modelar estes veículos.

Ademais, geralmente um processo de modelagem orientada a controle de VEHs possui requisitos conflitantes, e objetivos de projeto de difíceis formalização. Nesse contexto, uma visão sistêmica pode auxiliar no processo de modelagem ao tratar o problema de forma a evidenciar a inter-relação entre os subsistemas e o todo. Além disso, o uso de tal abordagem mostra-se interessante devido a capacidade de orientar o processo contínuo de aprendizagem a respeito do problema em estudo (GAVIRA, 2003).

1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO

Haja vista o grande potencial que os VEHs têm mostrado na resolução da problemática da economia de combustível em veículos automotores, e o desafio que estes sistemas representam aos projetistas em função da sua complexidade, esta Dissertação tem como objetivo principal **propor e aplicar uma sistemática para modelagem orientada ao controle de operação em VEHs**.

Logo, para alcançar o objetivo geral apresentado acima, são listados os seguintes objetivos específicos:

- Analisar os diferentes tipos de modelos e controles empregados na simulação de VEHs;

- Identificar ferramentas computacionais para construção de modelos de simulação automotiva;
- Sistematizar o processo de modelagem orientada a controle de VEHs;
- Aplicar e avaliar a sistemática desenvolvida por meio de um estudo de caso, baseado no processo de modelagem de um VEH comercial;

1.4 CONTRIBUIÇÕES

Ao final, este trabalho disponibiliza os modelos desenvolvidos a partir da aplicação da sistemática proposta. Onde estão incluídos, o modelo de planta de um trem de força híbrido elétrico com as características do Toyota[®] Prius[®] no ambiente Simcenter Amesim[®], bem como o modelo do controlador na plataforma Matlab/Simulink[®]. Estes modelos interagem por meio de uma co-simulação entre os dois *softwares*, e podem ser utilizados para predição do consumo de combustível para diferentes ciclos de condução e estratégias de operação em VEHs. Além disso, o método proposto pode ser adaptado e utilizado para os demais tipos de veículos.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este texto está organizado em seis capítulos. Após uma breve contextualização e apresentação dos propósitos deste estudo encontrados neste capítulo, o Capítulo 2 apresenta uma revisão da literatura a respeito dos VEHs evidenciando seu histórico, tipos e processo de desenvolvimento. No Capítulo 3 são apresentados os principais conceitos e ferramentas de modelagem e controle usadas na área automotiva. No Capítulo 4, é descrita uma sistematização do processo de modelagem orientada a controle de operação em VEHs. No Capítulo 5 a sistemática é aplicada e avaliada por meio de um estudo de caso, no qual o modelo de um VEH baseado no Toyota Prius[®] é construído e validado. Finalmente, o Capítulo 6 descreve as conclusões deste trabalho.

2 VEÍCULOS ELÉTRICOS HÍBRIDOS

Este capítulo é direcionado a fornecer uma visão geral acerca do histórico e tipos de VEHs, bem como do processo de desenvolvimento do seu sistema de controle. Além disso, traz uma análise aprofundada sobre processo de modelagem de sistemas, e modelagem orientada a controle.

2.1 HISTÓRICO DOS VEHS

Apesar de ser uma das tecnologias mais promissoras atualmente, o conceito de um VEHs é tão antigo quanto o próprio automóvel, e remete ao fim do Século XIX.

No entanto, seu objetivo não tinha a ver com economia de combustível, mas sim em auxiliar tanto veículos convencionais quanto os elétricos a bateria, que eram pouco desenvolvidos naquele momento. Se, por um lado a tecnologia híbrida buscava tornar os recém adotados motores de combustão interna movidos a gasolina viáveis do ponto de vista de desempenho, por outro, procurava melhorar a autonomia dos VEBs (EHSANI et al., 2018).

Como os primeiros VEHs faziam uso da tecnologia elétrica até então disponível, o controle das máquinas elétricas era realizado basicamente por interruptores mecânicos e resistores, limitando assim o funcionamento dos atuadores a uma faixa operacional pouco eficiente (WAKEFIELD, 1998).

Segundo Chan (2007), após a I Guerra Mundial, os MCIs passaram por grandes melhorias em termos de densidade de potência, tornando-os menores e mais eficientes, não havendo mais necessidade de auxiliá-los com os motores elétricos. Além disso, os riscos associados à utilização das baterias de chumbo-ácido, somados ao custo suplementar decorrente dos componentes excedentes, foram fatores fundamentais para o desaparecimento tanto dos VEHs quanto dos VEBs a partir de 1920.

Os veículos elétricos passaram por um período de completo desinteresse da indústria automobilística até o início da década de 1970, quando alguns países, estimulados pelas duas crises energéticas de 1973 e 1977, e pelas questões ambientais emergentes, começaram a se interessar novamente pela eletricidade nos veículos (WAKEFIELD, 1994).

Agora era possível controlar as máquinas elétricas de forma satisfatória, uma vez que o advento dos transistores de potência tinham surgido no fim da II Guerra Mundial. Porém, neste momento o foco dos pesquisadores eram apenas os elétricos puros, mais especificamente os VEBs que tiveram vários protótipos construídos durante os anos 80. No entanto, apesar dos avanços na tecnologia de baterias e eletrônica de potência, sua autonomia e desempenho continuaram sendo obstáculos.

O conceito dos VEHs voltaram a chamar atenção dos fabricantes e da comunidade científica apenas em 1990, quando (naquele momento) ficou claro que os VEBs nunca poderiam competir com os veículos a gasolina em termos de autonomia e desempenho. O principal motivo é que, em baterias, a energia é armazenada no metal dos eletrodos, que pesam muito mais do que gasolina pela mesma quantidade de energia armazenada,

sendo este componente, até hoje, um dos maiores obstáculos para que esta tecnologia se estabeleça no mercado.

No final do Século XX os esforços em pesquisas no âmbito dos VEHs eram significativos, culminando no lançamento, por parte das principais fabricantes de automóveis, de vários protótipos com ótimos desempenho. No entanto, os melhores resultados foram alcançados pelas fabricantes japonesas. Em 1997, a Toyota lançou o Prius no Japão, e a Honda o Insight em 1999. Estes dois veículos (Figura 2.1) possuem um valor histórico para os VEHs por se tratarem dos primeiros híbridos comercializados na era moderna a alcançarem bons resultados no que diz respeito ao consumo de combustível.

Figura 2.1 – Honda Insight 1999 e Toyota Prius 1997



Fonte: Adaptado de Toyota (2000) & Honda (2001)

Hoje, o desenvolvimento dos VEHs encontra-se em um estágio avançado, com vários modelos sendo comercializados largamente no mercado mundial, principalmente nos EUA e no Japão (EHSANI et al., 2018). E a tendência é que a abrangência destes veículos continue a aumentar nos próximos anos, à medida que as leis ambientais se tornam mais rígidas, e as reservas de petróleo mais limitadas.

No entanto, segundo Chan (2007), apesar das conquistas atuais, a tecnologia híbrida ainda precisa superar alguns desafios para ser consolidada. Sendo que o dimensionamento e gerenciamento da bateria; e o controle, otimização e gerenciamento das múltiplas fontes de propulsão são os principais problemas a serem enfrentados.

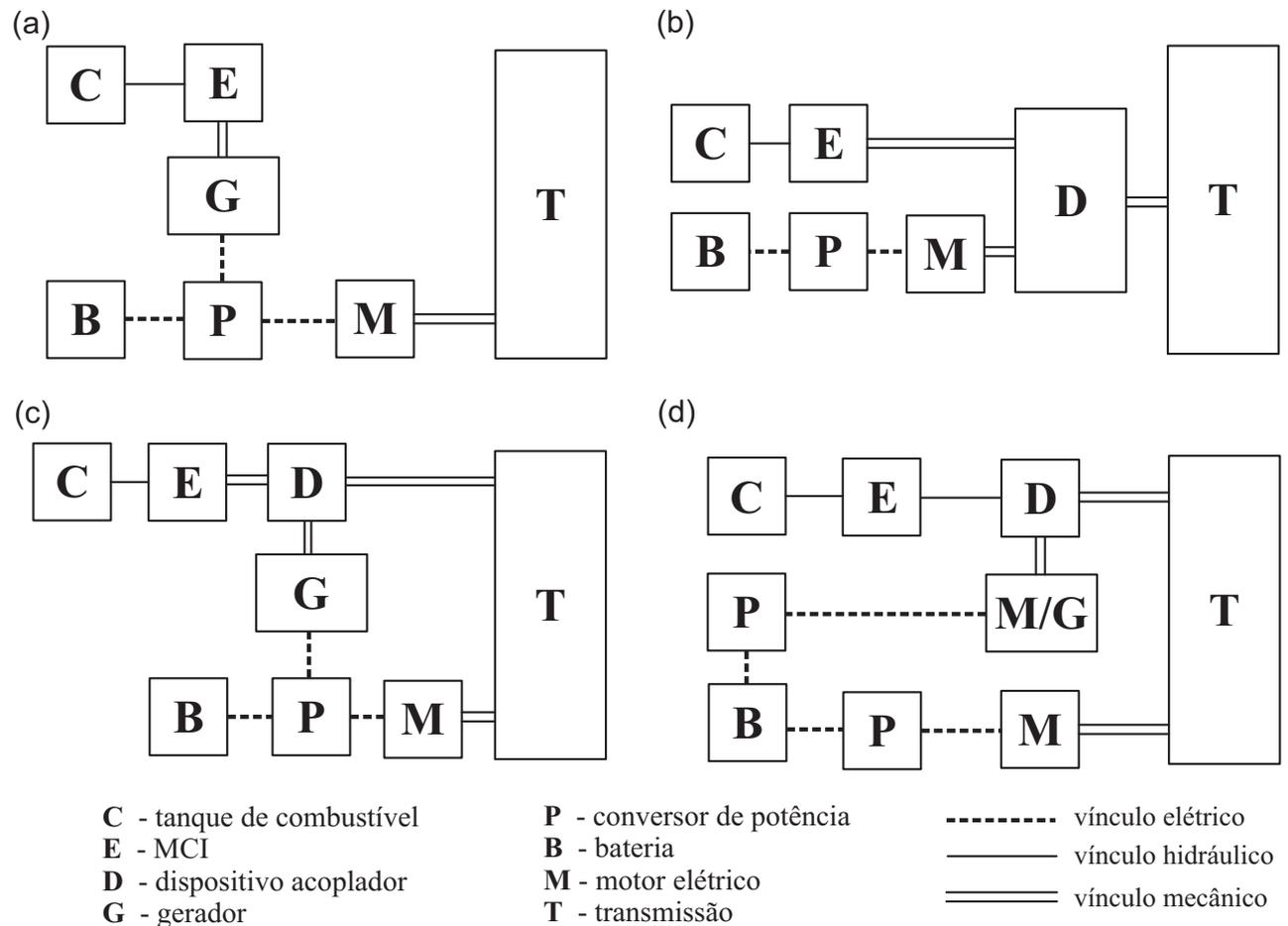
2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS VEHS

Para satisfazer as necessidades do setor automotivo, existe hoje uma grande variedade de VEHs no mercado. Estes são classificados levando em consideração características relacionadas ao trem de força, que tem como função principal regular a transferência de potência das fontes de propulsão até as rodas por meio de uma linha transmissão. Assim, geralmente, duas formas de classificação são utilizadas: uma relacionada à arquitetura, e outra ao grau de hibridização do sistema.

2.2.1 Arquitetura do trem de força

A arquitetura de um VEH diz respeito à forma como os componentes do trem de força estão interligados, o que define o fluxo de energia (mecânica e elétrica) no sistema. De acordo com Ehsani et al. (2018), a classificação mais atual divide a configuração de um trem de força elétrico híbrido em quatro tipos: série, paralelo, série-paralelo e complexo.

Figura 2.2 – Arquitetura dos VEHs: (a) Série, (b) Paralelo, (c) Série-Paralelo, e (d) complexo



Fonte: Adaptado de Ehsani (2018)

Na configuração em **série** (Figura 2.2a) o MCI tem a função de alimentar um gerador, que, com auxílio de um conversor de potência, fornece energia para o motor elétrico, e este traciona o veículo, ou seja, a propulsão é completamente elétrica. O conversor de potência¹ é utilizado como acoplador e controla o fluxo de energia do gerador e da bateria, tendo esta última a função de amortecedor de energia. Como o MCI não está ligado diretamente a funções trativas este pode trabalhar em faixas de operações mais eficientes, diminuindo assim as emissões, o que também possibilita a utilização de um MCI de menor potência. Por outro lado, o motor elétrico precisa ser robusto, pois é única fonte de torque das rodas. Devido à simplicidade do controle dinâmico e principalmente à característica independente de operação do MCI, este tipo de arquitetura tem muitos usos práticos, especialmente

¹ Um conversor de potência é um componente elétrico que tem como função condicionar a energia liberada pelo gerador para uso do motor elétrico, ou para recarga da bateria (LIU, 2017).

em veículos de grande porte (LIU, 2017; GUZZELLA; SCARRETTA, 2013; EHSANI; GAO; MILLER, 2007).

Na configuração em **paralelo** (Figura 2.2b) é incluído um novo caminho para o fluxo de energia, pois ambos os propulsores podem ser acoplados, isto é, MCI e motor elétrico podem combinar seus torques para tracionar o veículo, ou podem agir individualmente. Nesta arquitetura o motor elétrico pode funcionar como um gerador para carregar a bateria através de frenagem regenerativa, ou do possível excesso de energia produzido pelo MCI. Este tipo consegue uma maior eficiência da transmissão mecânica por necessitar de menos componentes, e por isso tem vantagens principalmente em condições de condução de estradas. Entretanto, o acoplamento mecânico do MCI às rodas impede que este permaneça operando em regiões de maior eficiência. Além disso, exige estrutura e controle mais complexos para gerenciar principalmente a operação do MCI, que pode ser ligado e desligado frequentemente (EHSANI; GAO; MILLER, 2007; CHAN, 2007).

A arquitetura **série/paralelo** (Figura 2.2c) combina as duas anteriores, ou seja, a potência fornecida pelo MCI é dividida e segue dois caminhos distintos: um em série e outro em paralelo. Isso é possibilitado através da utilização de um dispositivo acoplador, tal como um conjunto de engrenagens planetárias. A grande vantagem desta configuração está na possibilidade de aliar os benefícios das duas arquiteturas anteriores. Dessa forma, conseguem combinar modos de operação, tornando-se mais eficiente. Porém, têm como desvantagens uma maior complexidade de controle, além de um custo mais elevado (LIU, 2017; GUZZELLA; SCARRETTA, 2013; EHSANI; GAO; MILLER, 2007).

A arquitetura **complexa** (Figura 2.2d) pode ser considerada um subtipo da configuração série/paralelo devido ao grau de similaridade entre as duas arquiteturas, assim, alguns autores (LIU, 2017; GUZZELLA; SCARRETTA, 2013; MILLER, 2010) não fazem essa distinção, com o intuito de simplificar a abordagem. No entanto, a diferença de uma arquitetura para a outra reside no fato de que a função de acoplamento elétrico é movida do conversor de energia para as baterias, e por isso mais um conversor é adicionado entre o motor/gerador e as baterias (EHSANI et al., 2018). Dessa forma, enquanto um série/paralelo possui um fluxo unidirecional de energia, nos complexos este fluxo é bidirecional. Este diferencial pode permitir modos de operação versáteis, que não podem ser oferecidos pelo híbrido série-paralelo, apesar desta arquitetura também sofrer com maior complexidade e custo.

2.2.2 Grau de hibridização

O nível de hibridização de um VEH diz respeito às características operacionais do trem de força. Assim, quanto a este critério, e em ordem crescente de hibridização, estes veículos são classificados em: **Micro**, **Moderado**, **Completo** ou **Plug-in** (LIU, 2017; ONORI; SERRAO; RIZZONI, 2016; GUZZELLA; SCARRETTA, 2013). Estes são brevemente descritos a seguir:

- **Micro-híbrido** : Corresponde a um simples VEH em paralelo, caracterizado pela presença de uma máquina elétrica de pequeno porte, normalmente operada em baixa

voltagem (12-48V), e com capacidade máxima de 5 kW. O principal papel da eletricidade nesse tipo de veículo é possibilitar a utilização de um sistema conhecido como *start/stop*, que permite o desligamento e religamento do MCI, com o intuito de reduzir a quantidade de tempo gasto em marcha lenta. Com isso, os micro-híbridos oferecem maiores benefícios apenas em perímetros urbanos, alcançando de 5 a 10% em economia de combustível nessas condições. E uma vez que o principal objetivo destes veículos é religar o MCI, estes não requerem alta capacidade de bateria ou sistemas eletrônicos complexos;

- **Híbrido moderado:** Comparados aos micros, este tipo de híbrido é operado em voltagem entre 48 e 200V, podendo fornecer entre 5 e 20kW de potência. Em configurações paralelo ou série/paralelo, o MCI é acoplado a uma máquina elétrica de médio porte que o auxilia na propulsão durante acelerações agressivas, esta funciona também como um gerador possibilitando a recuperação de parte da energia cinética durante desacelerações, o que permite ainda o desligamento do MCI sempre que o carro estiver em declive, em frenagem, ou parado (*start/stop*). Assim, este tipo de VEH consegue uma economia de combustível na faixa de 15 a 20%, permitindo conduções puramente elétrica apenas por curtas distâncias, e em baixas velocidades (no máximo 10 km/h), por isso a capacidade da bateria deve ser suficiente para esta aplicação.
- **Híbrido Completo:** Este grau de hibridização requer mais de 40 kW de potência elétrica, e trabalha em tensões de até 150V. Podem funcionar se utilizando de qualquer uma das arquiteturas híbridas, assim podem operar tanto no modo combinado quanto no modo totalmente elétrico (por distâncias moderadas). Para isso, utilizam uma bateria de alta capacidade, e exigem um controle robusto que seja capaz de propiciar um gerenciamento de energia eficiente. Assim, conseguem alcançar uma economia de combustível por volta dos 40% quando comparados com os veículos convencionais, no entanto, às custas de modificações significativas na estrutura do veículo.
- **Híbrido Plug-in:** Alia características dos híbridos completos e dos VEBs ao permitir que as baterias sejam recarregadas através de uma tomada AC conectada à rede elétrica. Possuem uma capacidade entre 80 e 150kW, com autonomia de até 100km, e economia de até 50% em comparação com veículos convencionais.

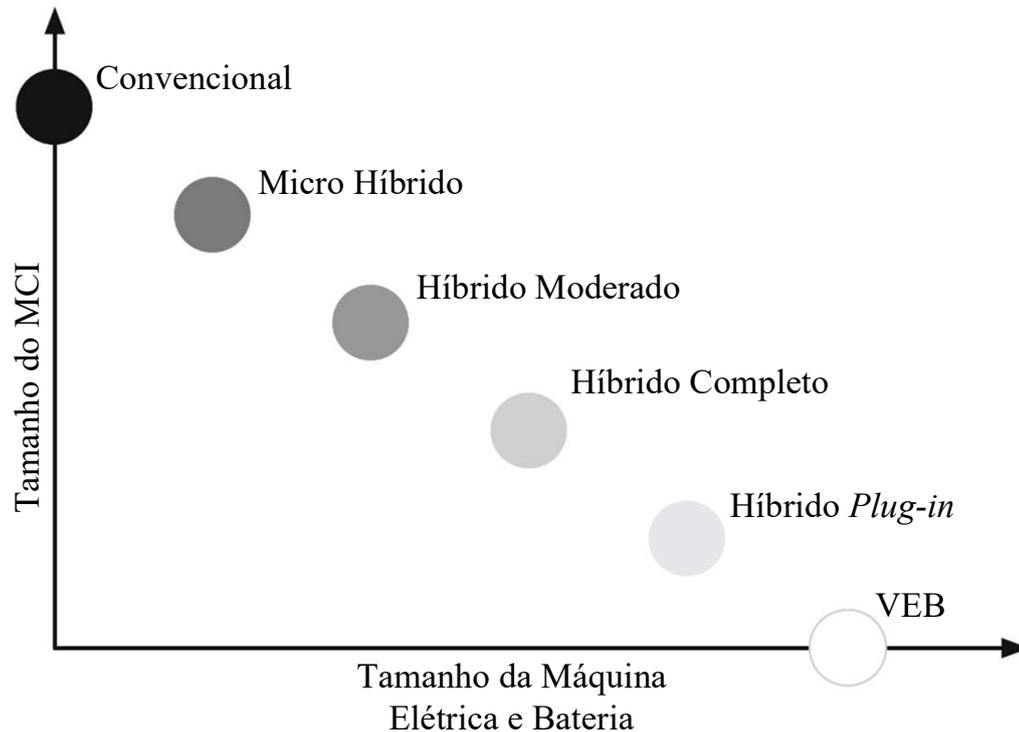
Como pode ser visualizado na Figura 2.3, quanto maior o grau de hibridização do veículo, a capacidade de armazenamento da bateria precisa ser suficientemente alta para atender aos requisitos de autonomia do veículo, à medida que menos potência do MCI é requerida.

2.3 DESENVOLVIMENTO DE VEHS

2.3.1 Processo de Desenvolvimento de Produto

O setor automotivo é considerado um dos segmentos mais competitivos atualmente, uma vez que a sobrevivência de uma fabricante no mercado depende diretamente da sua

Figura 2.3 – Comparação entre tipos de veículos de acordo com o grau de hibridização



Fonte: Adaptado de Onori, Serrao e Rizzoni (2016)

capacidade de desenvolver produtos que, com prazos e custos cada vez menores, atendam a uma grande variedade de requisitos.

Segundo Ulrich e Eppinger (2003), entende-se por produto algo que pode ser vendido por uma empresa aos seus clientes. E desenvolvimento de produto, de acordo com Back et al. (2008), é toda atividade de transformação das informações necessárias para identificação da demanda a produção e o uso deste produto.

O processo de conceber, projetar e comercializar um determinado produto geralmente segue uma sequência sistemática de atividades que, além de garantir que o produto final atenda aos requisitos iniciais, permite que as equipes de engenharia multidisciplinares trabalhem juntas e se comuniquem entre as etapas do Processo de Desenvolvimento de Produto (PDP).

Vários autores (BACK et al., 2008; ULRICH; EPPINGER, 2003; PAHL et al., 2007) abordam PDP de uma forma genérica, estabelecendo uma estrutura que possa ser posteriormente modificada para se adequar a diferentes cenários.

Por exemplo, Back et al. (2008) propõe um método denominado Processo de Desenvolvimento Integrado de Produto (PRODIP), que se subdivide em três etapas ou macrofases (Figura 2.4): Planejamento, Projetação e Implementação. A primeira compreende o planejamento do produto e projeto, onde questões como estratégia da empresa em relação ao mercado e ideias de produto são abordadas. A segunda fase é decomposta em quatro fases (informacional, conceitual, preliminar e detalhado) que envolvem a elaboração do projeto do produto e do plano de manufatura. Por fim, a macrofase de implementação diz respeito à execução do plano de manufatura para produção e encerramento do projeto.

Figura 2.4 – Processo de Desenvolvimento Integrado de Produto



Fonte: Adaptado de Back et al. (2008)

Embora, comumente os grandes fabricantes possuam suas próprias metodologias para desenvolver seus veículos, de um modo geral, elas tendem a derivar de um procedimento genérico, como o apresentado na Figura 2.4.

2.3.2 PDP auxiliado por modelos de simulação

A utilização do paradigma da modelagem como auxílio à tomada de decisão no projeto de produtos tem se destacado nas últimas décadas na indústria aeroespacial, principalmente devido a preocupações com custo e segurança associados à construção e teste de protótipos funcionais (GURUSUBRAMANIAN, 2013).

Esta abordagem oferece uma melhor compreensão a cerca do fenômeno estudado, uma vez que é possível simular o comportamento do produto em várias situações antes mesmo de concebê-lo, sendo esta uma alternativa à abordagem tradicional baseada em modelos físicos e protótipos. Observa-se também que com o surgimento de ferramentas de modelagem cada vez mais completas e acessíveis, a simulação computacional tem se popularizado bastante.

Hoje, com o *time-to-market*² sendo um dos maiores fatores competitivos entre os desenvolvedores de veículos, a prática de modelagem tem se estabelecido neste segmento, onde o objetivo principal é minimizar o custo e demora decorrentes de uma prototipagem, além de fornecer uma avaliação rápida do conceito (CHAN, 2002).

De fato, segundo Back et al. (2008), a modelagem se insere dentro do PDP na etapa de projeção, mais especificamente na fase de projeto preliminar (entre a síntese e a avaliação de alternativas), de forma que se possa avaliar a concepção escolhida e elaborar o dimensionamento, a simulação e a otimização da mesma.

A utilização dos modelos pode ser dividida em etapas que permitam a otimização de tarefas pontuais no projeto do veículo, e que podem ser executadas por diferentes agentes (engenheiros ou equipes de projeto) e, em seguida, combinadas para formar um sistema completo.

Com essa abordagem, um nível mais alto de abstração das tarefas individuais pode ser aplicado, resultando em um processo otimizado no qual podem ser feitas alterações incrementais no comportamento do sistema sem que seja necessária uma reformulação completa.

² Tempo desde o início do desenvolvimento de um produto até ele estar pronto para a venda.

No entanto, Lorenz (2004) alerta para os dois principais riscos de uma utilização inadequada dos modelos de simulação:

- **Transferência acrítica dos resultados do modelo para a realidade:** Os dados obtidos da simulação do modelo devem ser validados com base em analogias para se ter o real conhecimento da sua aplicabilidade.
- **Capacidade de manipulação dos resultados:** É necessário conhecer as hipóteses e abstrações utilizadas na formulação do problema.

Mais detalhes a respeito da modelagem de sistemas são apresentados na seção seguinte.

2.4 MODELAGEM DE SISTEMAS

2.4.1 Conceitos fundamentais

Segundo (SCHMIDT; TAYLOR, 1970), sistema pode ser definido como uma coleção de entidades que agem ou interagem juntos para desempenhar um propósito lógico. E, de acordo com Tomiyama et al. (1989) um modelo corresponde a um conjunto, teoricamente embasado, de descrições do objeto real.

Assim, um sistema pode ser entendido como algo real (uma máquina ou um corpo humano), enquanto que um modelo é uma representação abstrata deste sistema (como um conjunto de equações matemáticas).

Um modelo pode apenas se aproximar do comportamento de um sistema real, e quanto maior for esta aproximação, mais complexo o modelo se torna (CASSANDRAS; LAFORTUNE, 2010). Por isso, é necessário definir quais elementos do sistema serão modelados, e assim, definir o grau de abstração do modelo. A Figura 2.5 ilustra um processo simples de modelagem de um sistema genérico.

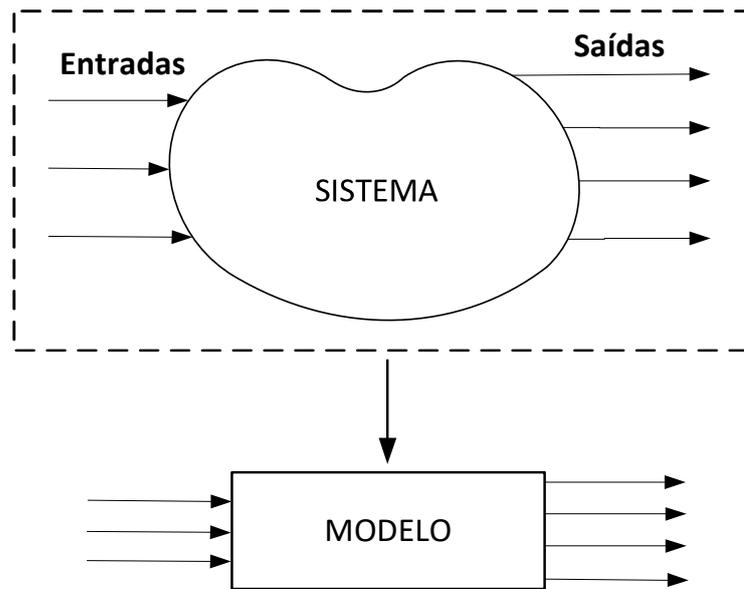
Simulação, por sua vez, é a imitação da operação de um processo do mundo real ou sistema ao longo do tempo (BANKS, 1998). Esta pode ser entendida como um processo de utilização do modelo, com auxílio de um computador, afim de avaliá-lo numericamente, assim, dados são reunidos para estimar características desejadas do modelo (LAW, 2015). Os modelos analisados por meio deste método são denominados modelos de simulação (PRITSKER, 1998).

2.4.2 Experimentação com modelos

Segundo (CARSON, 2004), a finalidade de se desenvolver modelos de simulação geralmente envolve experimentações do tipo:

1. **Análise de sensibilidade:** consiste em alterar o valor de um ou mais parâmetros do modelo e observar o impacto sobre os valores das variáveis de saída.

Figura 2.5 – Processo simples de modelagem



Fonte: Adaptado de Cassandras e Lafortune (2010)

2. **Comparação de cenários:** é aplicado quando o objetivo é fazer a comparação das várias configurações possíveis. Nestas comparações é constatada a que melhor se responde aos objetivos de projeto.
3. **Otimização:** tem por objetivo, por meio do modelo, buscar a configurações e/ou a forma de operação do sistema que fornece o melhor desempenho, em termos técnicos e/ou econômicos.

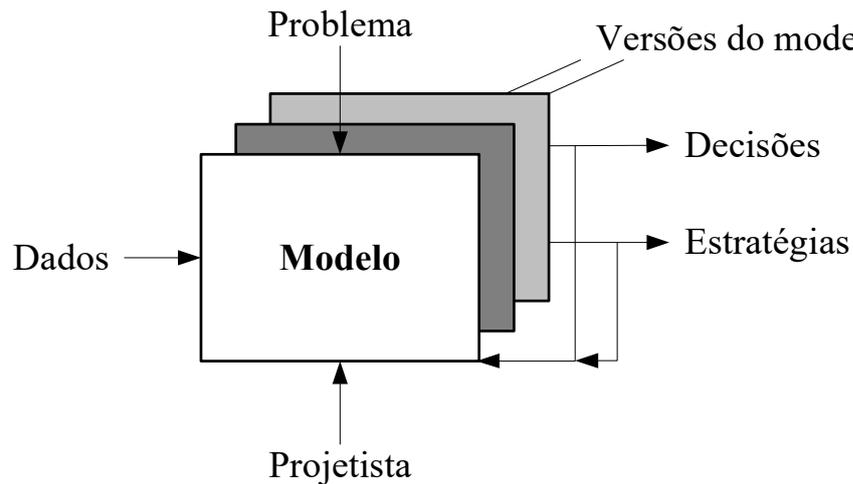
2.4.3 Solução de projeto baseada em modelos de simulação

Devido a capacidade de previsão do comportamento de um determinado sistema, modelos de simulação são idealmente adequados para solucionar problemas de projeto (PRITSKER, 1998). Assim, de acordo Banks (1998), os objetivos de projeto, que aqui podem ser entendidos como os propósitos da modelagem, definem o grau de abstração a ser utilizado no modelo.

A Figura 2.6 apresenta os componentes envolvidos no ambiente de solução de problemas, em que modelos são usados para auxiliar a tomada de decisões e/ou definição políticas estratégicas (PRITSKER, 1998).

A partir das necessidades do sistema (requisitos de modelagem) um problema central (objetivo de projeto) é estabelecido, sendo que este guia todo o desenvolvimento do modelo. Uma das entradas do modelo corresponde aos dados do sistema, cuja disponibilidade e forma ajudam a especificar os detalhes e as condições de contorno do modelo (abstração). O projetista é o responsável por construir o modelo de acordo com os requisitos, e disponibilidade de dados do sistema. As saídas do modelo auxiliam nas decisões para resolver o problema, e na definição de políticas estratégicas que permitam tomadas de decisão em concordância com as regras e procedimentos estabelecidos. Contudo, tipicamente a modelagem precisa ser redefinida, assim o processo de construção de modelos é realizado de

Figura 2.6 – Processo de resolução de problemas baseada em modelos



Fonte: Adaptado de Pritsker (1998)

forma iterativa, resultando geralmente em várias versões do mesmo modelo, sendo que as saídas das iterações anteriores também servem de entrada para versões futuras.

2.4.4 Processo de modelagem e simulação

Um processo de construção de geralmente baseia-se em uma série de atividades que pode ser considerada como uma metodologia de modelagem. Vários autores, dentre eles Law (2015), Emshoff e Sisson (1970) e Banks et al. (2013), apresentam suas respectivas metodologias para modelagem de sistemas, que apesar de diferentes se assemelham bastante em vários aspectos, pois, segundo Gavira (2003), todas elas fundamentam sua formulação no conhecimento científico.

A Figura 2.7 apresenta as etapas de modelagem e simulação de sistemas, de acordo com Banks et al. (2013), e são descritas a seguir.

1. **Formulação do problema:** o estudo começa com a estabelecimento do problema. Este deve ser plenamente entendido por todos os envolvidos no processo de modelagem. Embora não esteja explícito na Figura 2.7, há ocasiões em que o problema deve ser reformulado à medida que o processo avança.
2. **Definição de objetivos:** os objetivos indicam as questões a serem respondidas ao final do processo, e a partir disso é elaborado um plano geral do projeto que deve incluir as informações a respeito dos elementos do sistema que serão considerados, bem como um método para avaliar a eficácia dessas alternativas. Deve incluir ainda, os planos para o estudo em termos do número de pessoas envolvidas, o custo e tempo necessários para realizar cada fase do trabalho, juntamente com os resultados esperados no final de cada etapa.
3. **Conceituação do modelo:** a modelagem é aprimorada pela capacidade de abstrair os recursos essenciais de um problema, selecionar e modificar as premissas básicas que caracterizam o sistema e depois enriquecer e elaborar o modelo até que uma

aproximação útil resulte. Assim, é melhor começar com um modelo simples e construí-lo em direção a uma maior complexidade, que não deve se exceder além do que é necessário às análises pretendidas.

4. **Coleta de dados:** Os objetivos do estudo ditam, de maneira ampla, o tipo de dados a serem coletados, onde estes serão utilizados tanto para construir o modelo como para validá-lo. À medida que a complexidade do modelo é alterada, os elementos de dados necessários também podem ser alterados. E, devido a coleta de dados ocupar uma parte considerável do tempo necessário para executar uma modelagem, esta deve começar juntamente com construção do modelo conceitual.
5. **Tradução do modelo:** Sistemas reais resultam em modelos que exigem um grande esforço de manipulação de informações. Portanto, o modelo deve ser implementado em um formato computacional. Nessa etapa deve-se optar por um linguagem de programação de propósito geral (como Python ou #C) ou uma linguagem de simulação (*softwares* dedicados). Cada tipo de ferramenta possui vantagens e desvantagens que devem ser levadas em consideração no momento da escolha.
6. **Verificação:** esta etapa diz respeito à verificação do programa de computador que foi construído na etapa anterior, assim, deve-se verificar se o programa está funcionando corretamente. Com modelos complexos, é difícil, senão impossível, traduzir um modelo com sucesso em sua totalidade sem que se execute várias etapas de depuração. Se os parâmetros de entrada e a estrutura lógica do modelo estiverem corretamente representados no computador, a verificação foi concluída.
7. **Validação:** esta etapa é realizada por meio de um processo iterativo de comparar o modelo com o comportamento real do sistema, e usar as discrepâncias entre os dois e os *insights* obtidos para melhorar o modelo. Este processo é repetido até que a precisão do modelo seja considerada aceitável.
8. **Projeto experimental:** Etapa em que são determinadas as simulações que serão realizadas. A decisão sobre o que simular dependerá do problema que está sendo analisado. Aqui são determinadas o comprimento de simulação, número de simulações e suas configurações, e suas condições iniciais.
9. **Simulações e análises:** As execuções de simulações e suas subseqüentes análises são usadas para estimar as medidas de desempenho do sistema que está sendo simulado.
10. **Simulações adicionais:** Dada a análise de execuções que foram concluídas, é preciso determinar se são necessárias simulações adicionais, e que projetos esses experimentos adicionais devem seguir.
11. **Relatório:** esta etapa é importante para que as lições aprendidas durante o processo sejam passadas a diante. Existem dois tipos de relatórios na modelagem de sistemas: de *software*, e de processo. A primeira se refere à documentação das características

e particularidades do programa de computador utilizado. O segundo relatório fornece uma cronologia do trabalho realizado e das decisões tomadas no decorrer do processo.

12. **Implementação:** Esta etapa corresponde à execução do projeto no qual a modelagem auxiliou. O sucesso da fase de implementação depende do bom desenvolvimento das onze fases anteriores.

Apesar dos passos de modelagem serem sequenciais, muitas vezes, existe a necessidade de voltar a etapas anteriores. Isto fica evidenciado na Figura 2.7 por meio das setas retroativas.

2.5 MODELAGEM ORIENTADA A CONTROLE

Dentre os objetivos de um processo de modelagem, a otimização do sistema está quase sempre incluída. Em projetos de trens de força automotivos é possível elencar pelo menos três diferentes camadas de problemas de otimização (GUZZELLA; SCIARRETTA, 2013):

- **Otimização estrutural**, onde o objetivo é encontrar a melhor estrutura para suportar as solicitações do sistema;
- **Otimização paramétrica**, que objetiva chegar aos parâmetros adequados para o sistema propulsão; e
- **Otimização do sistema de controle**, onde o intuito é encontrar o melhor algoritmo de controle para o trem de força.

Segundo Onori, Serrao e Rizzoni (2016), o controle de um VEH envolve dois níveis de operação, conforme pode ser observado na Figura 2.8. O primeiro corresponde a um controle de baixo nível, onde cada componente do trem de força é controlado por unidades de controle individuais, por meio de métodos clássicos de controle. E o segundo, chamado de controle de alto nível ou de supervisão, é responsável pela otimização do fluxo de energia, ao passo que mantém o estado de carga da bateria³ (SoC) dentro de uma determinada faixa. O nível superior corresponde ao Sistema de Gerenciamento de Energia⁴ (EMS), que recebe e processa informações do veículo e do condutor, para gerar os *setpoints* ótimos enviados aos atuadores e executados pela camada de controle de baixo nível.

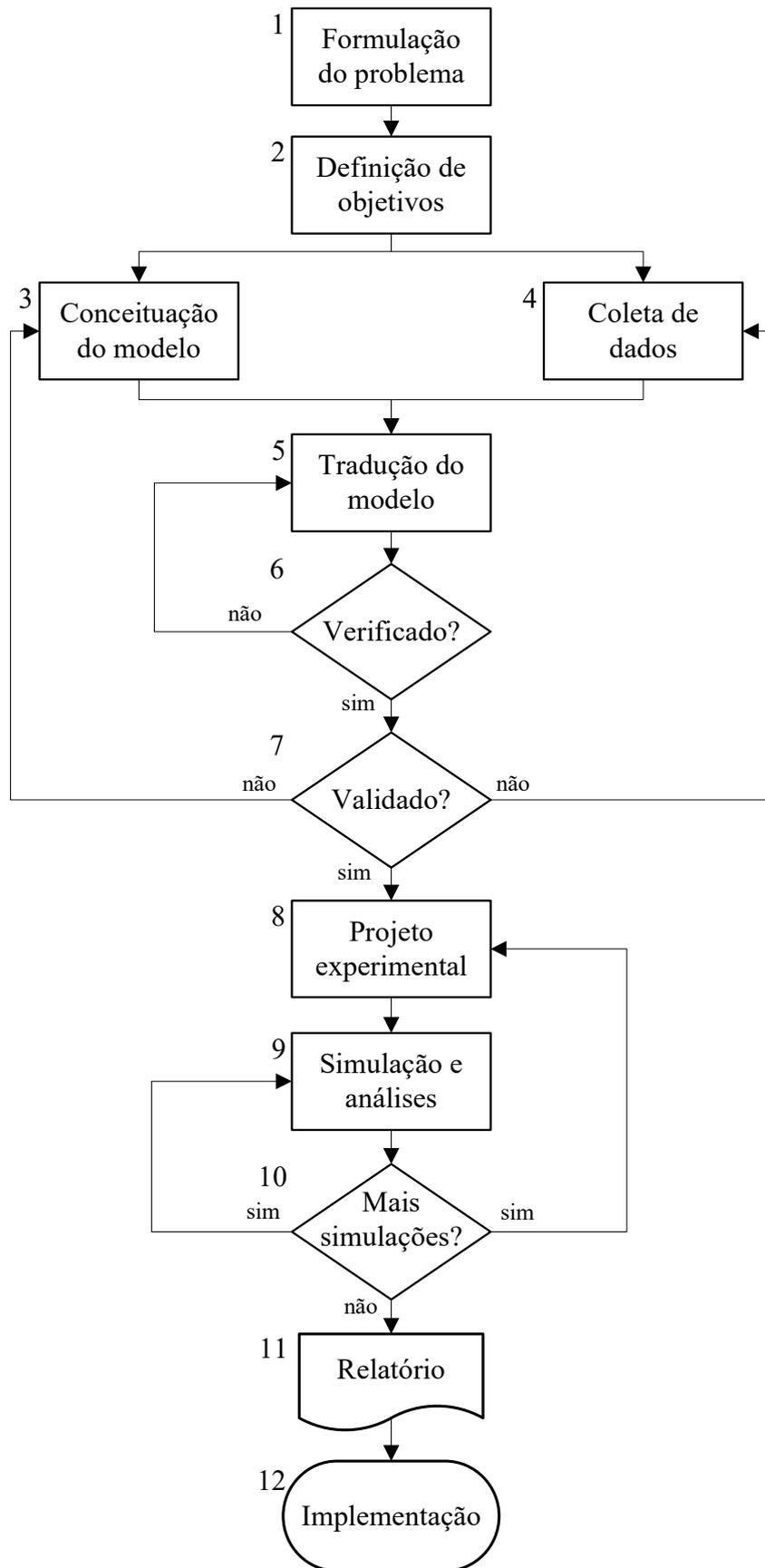
Os requisitos de eficiência, desempenho e segurança dos VEHs, estão diretamente ligados ao seu controle de supervisão, que determina como se comportará o veículo nas várias condições de uso, ou seja, define seus modos de operação.

Para chegar a um algoritmo otimizado, uma abordagem na qual o desenvolvimento do sistema de controle esteja interligado aos demais sistemas durante todo o processo de projeto é preferível, uma vez que isto permite a análise e validação antecipada das estratégias de operação do veículo.

³ Do inglês, *State of Charger* (SoC)

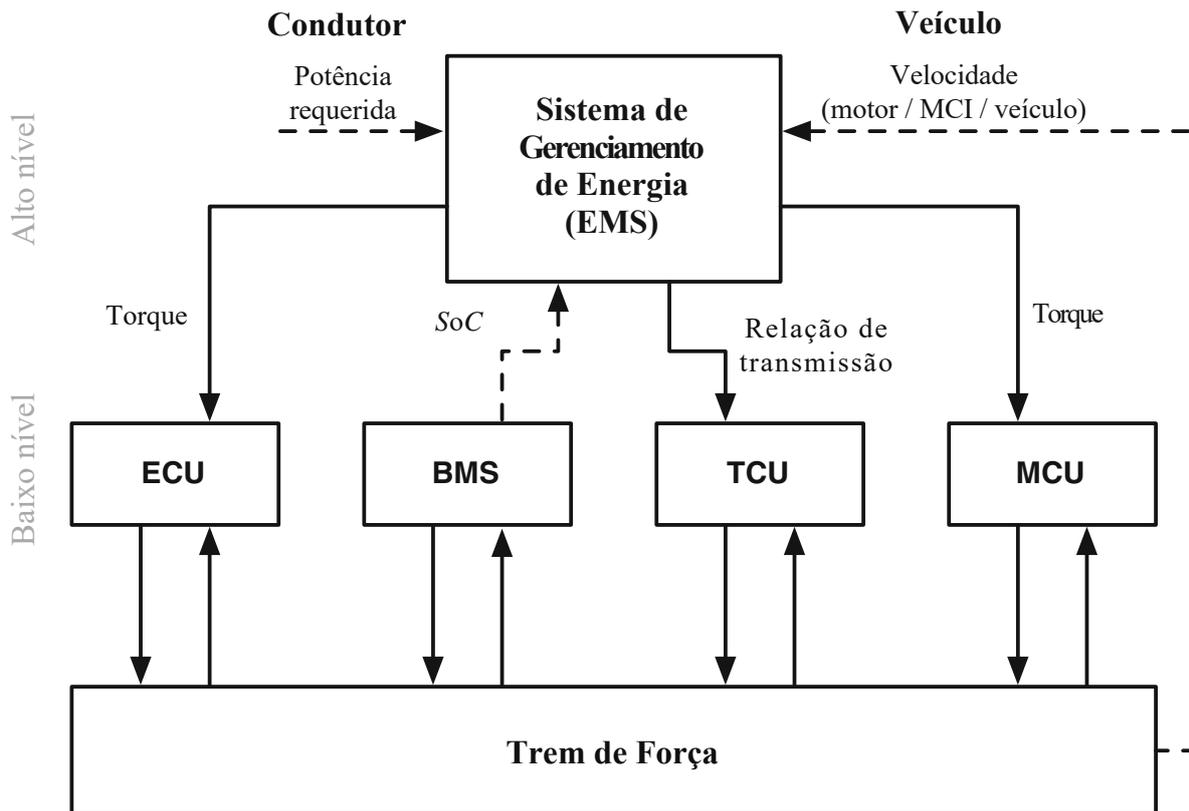
⁴ Do inglês, *Energy Management System* (EMS)

Figura 2.7 – Processo de modelagem e simulação de sistemas



Fonte: Adaptado de Banks et al. (2013)

Figura 2.8 – Esquema da arquitetura de controle de duas camadas em um VEH



ECU Unidade de controle do MCI

BMS Sistema de gerenciamento da bateria

TCU Unidade de controle da transmissão

MCU Unidade de controle do motor elétrico

Fonte: Adaptado de Onori, Serrao e Rizzoni (2016)

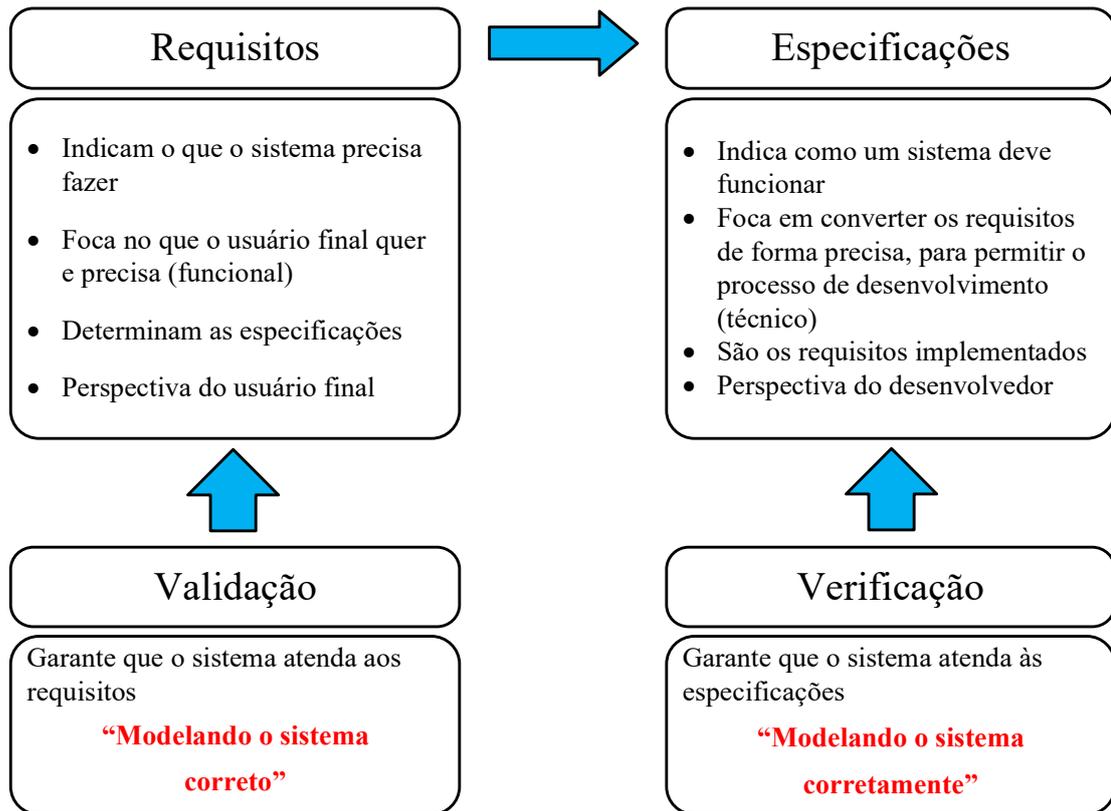
Nesse sentido, a modelagem precisa representar, dentro do mesmo processo de simulação, os sistemas controladores e os controlados, onde os primeiros representam todo o sistema de controle, enquanto o segundo grupo de modelos representa a planta do veículo (GURUSUBRAMANIAN, 2013).

No entanto, depois de construídos é importante, antes do uso, garantir que os modelos estão representando devidamente o fenômeno estudado, ou seja, se os requisitos iniciais foram contemplados. Além disso, é preciso avaliar as especificações adotadas na construção desses modelos. Estes objetivos são alcançados na etapa de verificação e validação dos modelos, que correspondem às etapas 6 e 7 do processo de modelagem apresentado anteriormente na Figura 2.7.

Apesar destes dois termos serem permutáveis em algumas áreas da engenharia, Gurusubramanian (2013) afirma que, em projetos baseados em modelos de simulação, estes têm objetivos distintos. A Figura 2.9 exemplifica como estes conceitos se correlacionam, onde a verificação é realizada para garantir que as especificações estejam dentro das permitidas, e a validação é realizada para assegurar que os requisitos iniciais foram atendidos.

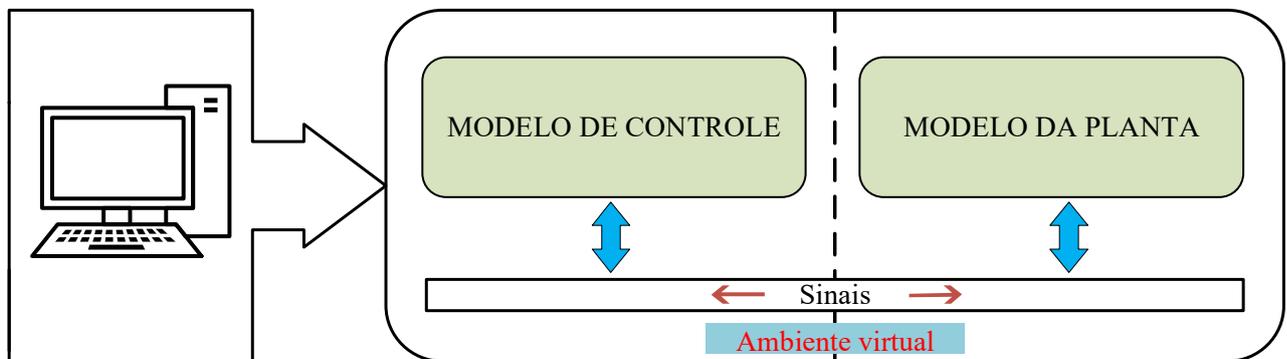
Na modelagem orientada a controle de automóveis, a verificação e validação geralmente correspondem à realização de sucessivas simulações em um processo chamado

Figura 2.9 – Diferenças entre verificação e validação



Fonte: Adaptado de Gurusubramanian (2013)

Figura 2.10 – Simulação MiL



Fonte: Adaptado de Gurusubramanian (2013)

Model-in-the-Loop (MiL). Como mostra a Figura 2.10, neste processo os modelos de controle e de planta se comunicam por barramentos virtuais bidirecionais e rodam casos de teste do veículo em diferentes situações para garantir a consistência do sistema modelado.

A integração dos modelos, caso tenham sido desenvolvidos em um mesmo ambiente de simulação, é feita por um modelo macro que funciona como um barramento interligando os sinais de entrada e saída dos respectivos modelos. No entanto, caso estejam em ambientes diferentes, os modelos precisam interagir por meio de uma co-simulação, que é uma técnica onde a simulação global de um sistema acoplado pode ser obtida pela composição das simulações de suas partes (GOMES et al., 2018). Para isso, é preciso que as

ferramentas de modelagem utilizadas tenham suporte para esse tipo de aplicação.

Depois de verificados e validados, estes modelos podem auxiliar em várias tarefas de projeto, como prototipagem rápida, testes de *softwares* e simulações de *Hardware-in-the-Loop* (HiL), quando o protótipo é verificado e validado. Por fim, o uso da modelagem simplifica o processo de desenvolvimento, minimiza os erros de implementação e reduz o tempo total de lançamento no mercado.

2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em um primeiro momento, este capítulo apresentou uma visão geral sobre os VEHs que começou com um breve histórico de como estes veículos surgiram até chegar no nível de desenvolvimento atual, e destacando os principais desafios que ainda devem ser superados. Logo após, são discutidas a classificação dos VEHs a partir do nível de hibridização e da configuração do trem de força.

Em seguida, uma breve explanação a respeito do desenvolvimento dos VEHs abordou metodologia de projeto auxiliada por modelos de simulação, ressaltando que estes se aplicam nas fases de projeção para auxiliar na síntese e na avaliação de alternativas.

Posteriormente, se iniciou uma análise aprofundada sobre a modelagem de sistemas, na qual apresentados os principais conceitos sobre o tema, e permeando o auxílio dos modelos de simulação na experimentação e na busca por soluções de projetos. Por fim, o próprio processo de modelagem é apresentado de forma genérica, onde são explicitados os passos a serem seguidos até que seja alcançados modelos de simulação confiáveis.

O capítulo finaliza com uma discussão sobre o paradigma da modelagem orientada a controle aplicada ao desenvolvimento e otimização do trem de força em VEHs. Neste momento são distinguidos os conceitos de verificação e validação aplicados a projetos de engenharia, e é apresentado o conceito *model-in-the-loop* que separa a modelagem do veículo em modelo de planta e controle.

Na sequência, o próximo capítulo trata especificamente da modelagem e controle de veículos com ênfase no sistema de transmissão de potência dos VEHs, onde são discutidos os principais conceitos, técnicas e ferramentas utilizadas para modelagem orientada ao controle de operações nestes veículos.

3 MODELAGEM E CONTROLE DE VEÍCULOS ELÉTRICOS HÍBRIDOS

Os VEHS ainda enfrentam desafios de desenvolvimento no que diz respeito ao gerenciamento de energia do trem de força, tarefa esta que é desempenhada pelo controle de supervisão do veículo. E, como visto no capítulo anterior, a abordagem baseada em modelos de simulação pode auxiliar no desenvolvimento de um sistema de controle eficiente.

Assim, este capítulo traz os principais conceitos e técnicas para modelagem e controle de VEHS, que representam o estado da arte do assunto em questão. Além disso, uma análise do ponto de vista energética é apresentada preliminarmente, por ser o ponto de partida de um processo de modelagem para previsão de consumo e desempenho de qualquer veículo automotor.

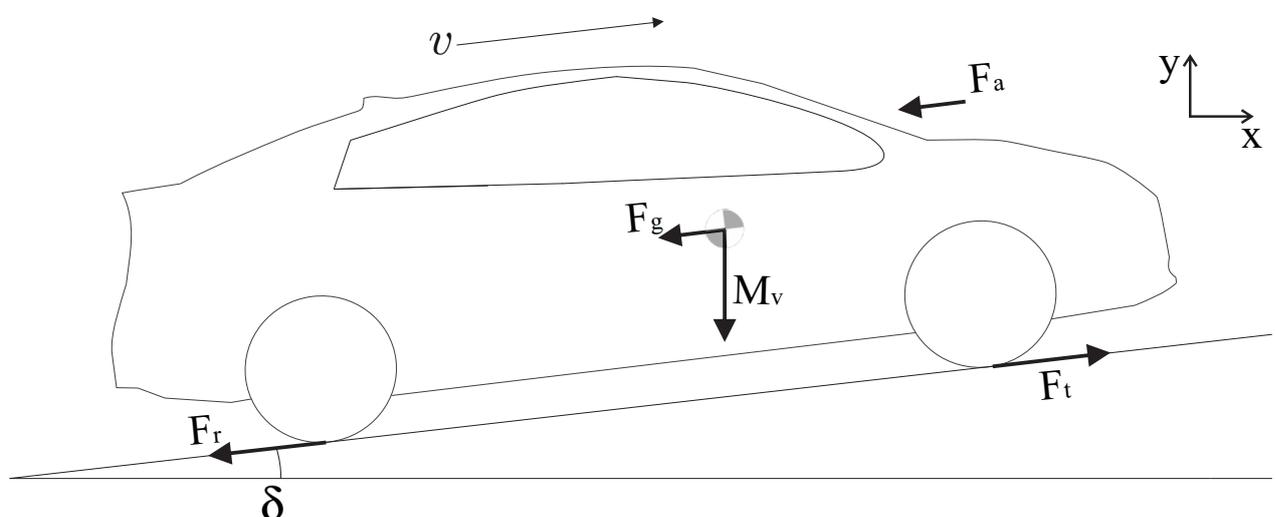
3.1 ANÁLISE ENERGÉTICA EM VEHS

Durante um determinado trajeto, parte da energia gerada no trem de força é responsável pelo deslocamento, e outra parte é perdida devido às resistências impostas ao movimento. Assim, o consumo de combustível em veículos automotores é geralmente avaliado a partir da análise do fluxo energético resultante da interação entre o automóvel e o meio externo.

3.1.1 Dinâmica longitudinal

O ponto inicial para determinar a energia necessária ao movimento de um veículo é a análise das forças que agem sobre o mesmo. Para isso, um automóvel geralmente é tratado como um ponto de massa no qual as forças de propulsão e de resistência agem, conforme representado esquematicamente na Figura 3.1.

Figura 3.1 – Representação esquemática das forças atuantes sobre um veículo em movimento



Fonte: Autor

A partir da aplicação da Segunda Lei de Newton, pode ser feita a dedução da equação que rege a dinâmica longitudinal do veículo:

$$M_v \frac{dv}{dt} = F_x = F_t - F_a - F_r - F_g \quad (3.1)$$

onde M_v é a massa total do veículo, v é a sua velocidade longitudinal, F_x é a força resultante da aceleração representada pelo termo $\frac{dv}{dt}$, F_t é a força de tração gerada pelo trem de força, F_r e F_a são as resistências à rolagem e aerodinâmica respectivamente, e F_g é a força de resistência ao aclive.

O termo F_a representa as perdas ocasionadas pelo arrasto aerodinâmico que o veículo sofre enquanto se locomove. Esta resistência é dependente da densidade do ar atmosférico (ρ_a), da área frontal projetada do veículo (A_f), do coeficiente de arrasto aerodinâmico (C_d) e da velocidade do veículo, podendo ser calculada conforme Equação 3.2.

$$F_a = \frac{1}{2} \rho_a A_f C_d v^2 \quad (3.2)$$

O termo F_r representa o atrito de rolamento, e é calculado da seguinte forma:

$$F_r = C_r M_v g \cos \delta \quad (3.3)$$

onde g é a aceleração da gravidade, o termo $\cos \delta$ corresponde à componente vertical do peso total, e C_r corresponde ao coeficiente de resistência à rolagem, que depende de vários fatores, dentre eles a velocidade do veículo, pressão dos pneus (p), tipo e condições da superfície de rolagem.

O valor de C_r cresce à medida que a velocidade do veículo aumenta, sobretudo em altas velocidades¹, e decresce à medida que a pressão interna dos pneus aumenta, na proporção de $\frac{1}{\sqrt{p}}$. As condições da superfície podem influenciar substancialmente o valor deste coeficiente, por exemplo, em uma condição de pista molhada este valor (que é da ordem de 0,01-0,03) pode aumentar em até 20%, e em condições de direção adversas (areia solta, por exemplo) este valor pode dobrar. No entanto, segundo Guzzella e Sciarretta (2013) para muitas aplicações, particularmente quando a velocidade do veículo permanece moderada, o valor de C_r pode ser considerado constante.

A resistência ao aclive é a componente horizontal da força peso do veículo, que pode ser a favor ou contrária ao movimento, a depender se o veículo está em descida ou em subida respectivamente.

$$F_g = M_v g \sin \delta \quad (3.4)$$

Além das forças que podem ser observadas na Figura 3.1, segundo Gillespie (1992), também agem em oposição ao deslocamento do veículo as forças inerciais (forças de d'Alembert), estas são induzidas pela massa total do veículo e de todas as partes girantes. Seus efeitos tendem a ser relevantes à dinâmica do veículo e por isso não devem ser

¹ A partir de uma determinada velocidade o coeficiente de rolagem se aproxima de um valor crítico ocasionando fenômenos de ressonância (GUZZELLA; SCIARRETTA, 2013).

negligenciadas. As vezes, para cálculos rápidos, pode ser conveniente adicionar a inércia das massas rotativas à massa do veículo e assim obter uma boa aproximação para as implicações sobre a dinâmica longitudinal (GILLESPIE, 1992).

3.1.2 Balanço de energia

Um sistema de propulsão elétrico híbrido produz energia mecânica a partir dos reservatórios (tanque e baterias), e a armazena momentaneamente (GUZZELLA; SCIARRETTA, 2013):

- na forma de energia cinética, quando o veículo está em aceleração; e
- na forma de energia potencial, quando o veículo atinge pontos onde a altitude é elevada.

Uma análise didática da forma como essa energia é consumida durante o movimento pode ser realizada a partir de uma releitura da Equação 3.1:

$$F_t = F_x + F_a + F_r + F_g \quad (3.5)$$

Na Equação 3.5 as forças resultante (F_x) e de inclinação (F_g) podem ser consideradas de natureza conservativa, ou seja, dependem do estado do veículo, sendo F_x positivo em situações de aceleração e negativo em desaceleração, e F_g positivo em aclive e negativo em declive. Já F_a e F_r se tratam de forças naturalmente dissipativas, e por isso são permanentemente positivas², ou seja, sempre se opõem ao movimento do veículo (ONORI; SERRAO; RIZZONI, 2016; GUZZELLA; SCIARRETTA, 2013).

Assim, quando o veículo está acelerando em um aclive parte da força de tração (F_t) aumenta sua energia cinética e potencial, e a outra parte é dissipada pelas resistências F_a e F_r . Por outro lado, em desacelerações, a energia acumulada precisa ser dissipada, consequentemente as resistências contribuem para este fim. No entanto, em uma desaceleração brusca uma ação de frenagem se faz necessária. Portanto, durante um determinado percurso toda a energia produzida no trem de força é consumida por três forças somente: aerodinâmica, rolagem e frenagem.

Multiplicando os termos da Equação 3.5 pela velocidade do veículo (v), o balanço de potência é obtido:

$$P_t = P_x + P_a + P_r + P_g \quad (3.6)$$

onde P_t é a potência disponível nas rodas que tracionam o veículo; P_x é potência necessária para aceleração do automóvel (desconsiderando as perdas); P_a e P_r representam potência necessária para vencer as resistências ao arrasto aerodinâmico e à rolagem, respectivamente; já P_g representa a potência necessária para que o veículo consiga subir uma pista inclinada (no caso $\delta > 0$), ou que acelera o veículo (no caso de $\delta < 0$).

² Em situações em que o veículo se move para frente.

O balanço de energia pode ser obtido integrando os termos da Equação 3.6 no intervalo de duração da trajetória realizada ($t_0; t_f$):

$$E_t = \int_{t_0}^{t_f} P_t dt = E_{cin} + E_{pot} + E_r + E_a \quad (3.7)$$

sendo que a integração de P_x e P_g correspondem a energia cinética (E_{cin}) e potencial (E_{pot}) respectivamente, e E_r e E_a correspondem à variação das potências de rolagem e aerodinâmica nesta ordem³. Individualmente cada termo é representado como se segue:

$$E_{cin} = \int_{t_0}^{t_f} P_x dt = M_v \int_{t_0}^{t_f} v(t) \dot{v}(t) dt \quad (3.8a)$$

$$E_{pot} = \int_{t_0}^{t_f} P_g dt = M_v g \int_{t_0}^{t_f} v(t) \sin(\delta)(t) dt \quad (3.8b)$$

$$E_r = \int_{t_0}^{t_f} P_r dt = M_v g \int_{t_0}^{t_f} C_r v(t) \cos(\delta)(t) dt \quad (3.8c)$$

$$E_a = \int_{t_0}^{t_f} P_a dt = \frac{1}{2} \rho_a A_f C_d \int_{t_0}^{t_f} v(t)^3 dt \quad (3.8d)$$

Nas Equações 3.8a, 3.8b, 3.8c e 3.8d nota-se que cada termo de energia é produto de dois outros termos: um que representa os parâmetros do veículo (massa total e coeficientes de resistência) e outro que representa as informações do trajeto a ser percorrido, que independem do veículo, sendo apenas função do perfil de velocidade $v(t)$. A única exceção se trata do termo E_r pois, conforme explicado na subsecção 3.1.1, o coeficiente de rolagem em geral é função também da velocidade do automóvel.

3.1.3 Ciclo de condução

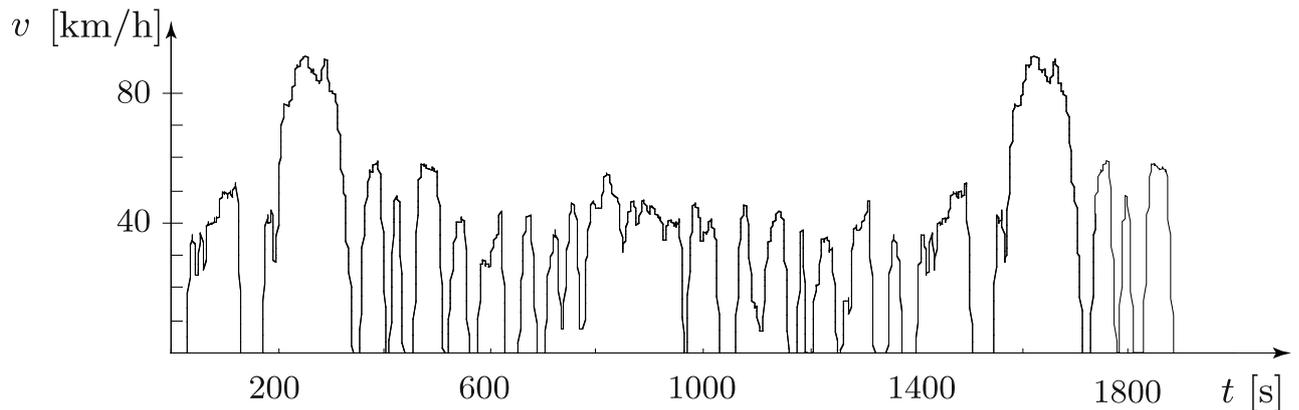
Um ciclo de condução (do inglês *driving cycle*) é definido como um modelo normalizado que inclui as características da pista e a forma como o veículo é conduzido durante um determinado trajeto (EHSANI et al., 2018). Nele, o circuito é segmentado em pequenos intervalos de tempo onde a aceleração é considerada constante, ou seja, para cada intervalo a velocidade varia linearmente, sendo representado por um gráfico velocidade/tempo (Figura 3.2).

Uma vez conhecidos o ciclo de condução e os parâmetros do veículo, isto é suficiente para cálculo da energia necessária para completar um trajeto. Por esse motivo foram introduzidos perfis de velocidade padronizados, para os quais o consumo de combustível de um veículo deve ser especificado. Porém é importante ressaltar que, em geral, os modelos padronizados não reproduzem a realidade, sendo seu principal objetivo fornecer uma base confiável para comparação de veículos existentes no mercado (EHSANI et al., 2018).

Ciclos de condução normalizados procuram atender à particularidade de uma região específica, e devido à suas características regulatórias existe um número relativamente

³ As perdas de energia devido ao escorregamento das rodas em relação ao solo, e ao rendimento do trem de força não foram consideradas

Figura 3.2 – Exemplo de ciclo de condução



Fonte: Adaptado de Guzzella e Sciarretta (2013)

reduzido destes. Entre os mais importantes estão o *New European Drive Cycle* (NEDC) praticado em toda a Europa, o *Federal Urban Driving Cycle* (FUDS) e o *Federal Test Procedure* (FTP-75) utilizados nos Estados Unidos e o *Japanese Driving Cycles* (JDC) praticado no Japão.

No geral, existem dois tipos de ciclos: urbanos e rodoviários. Os primeiros procuram simular um trajeto dentro da cidade com frequentes acelerações e desacelerações em baixa velocidade, enquanto o segundo é realizado sob altas velocidades e aproximadamente constantes.

Na prática, estes modelos são frequentemente usados em testes com o auxílio de um dinamômetro de chassi, onde a potência nas rodas é selecionada de forma a simular as perdas de energia do veículo durante um ciclo específico (GUZZELLA; SCIARRETTA, 2013).

3.1.4 Recuperação de energia

Durante um determinado ciclo de condução o veículo pode operar em três modos distintos:

- Tração ($F_t > 0$), quando o trem de força está impulsionando o veículo;
- Desengate ($F_t = 0$), quando o trem de força é desengatado e as resistências ao movimento decrescem a energia acumulada;
- Frenagem ($F_t < 0$), quando os freios, o trem de força (freio motor) ou ambos dissipam a energia.

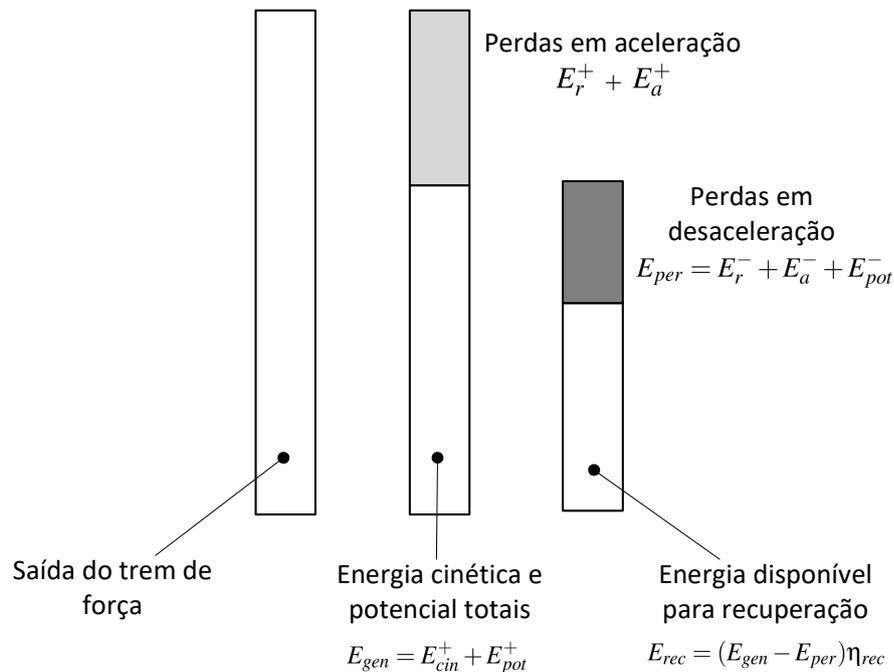
Neste mesmo ciclo a energia cinética será positiva sempre que $\frac{dv}{dt} > 0$, e negativa quando $\frac{dv}{dt} < 0$. Ao final deste ciclo (velocidade igual a zero), a variação de energia cinética é obviamente nula, ou seja, toda a energia gerada durante uma aceleração é removida na desaceleração.

As resistências ao movimento contribuem para esse fenômeno, porém nos casos em que $E_r + E_a < E_{cin}$, se faz necessário o uso de atuadores adicionais, como o freio mecânico.

No caso de um VEH, onde as máquinas elétricas de tração são reversíveis, há a possibilidade de geração de um torque negativo, o que pode implicar em uma recuperação de energia (frenagem regenerativa). No entanto, como existem perdas durante este processo, apenas parte da energia pode ser recuperada, com isso a eficiência de recuperação (η_{rec}) nunca será total (100%) em situações não ideais.

O processo de recuperação energética é melhor entendido observando o balanço de energia separadamente, diferenciando as situações de aceleração pelo sobrescrito “+” e de desaceleração pelo sobrescrito “-”. Dessa forma, como pode ser observado na Figura 3.3, durante acelerações a energia gerada no trem de força é decrescida pelas resistências E_r^+ e E_a^+ , e em desacelerações (momento em que acontece a regeneração) as perdas E_r^- e E_a^- limitam a recuperação de energia. Nos dois momentos a energia potencial é computada, no entanto, em desaceleração (E_{pot}^-) esta também reduz a capacidade de recuperação por meio da frenagem regenerativa.

Figura 3.3 – Balanço de energia em um ciclo de condução



Fonte: Adaptado de Onori, Serrao e Rizzoni (2016)

Com isso, a energia disponível para recuperação (E_{rec}) é calculada conforme mostram as Equações 3.9a, 3.9b e 3.9c, onde o potencial de recuperação corresponde à energia acumulada em aceleração E_{gen} (cinética e potencial) decrescida das perdas durante desacelerações E_{per} .

$$E_{gen} = E_{cin}^+ + E_{pot}^+ \tag{3.9a}$$

$$E_{per} = E_r^- + E_a^- + E_{pot}^- \tag{3.9b}$$

$$E_{rec} = (E_{gen} - E_{per})\eta_{rec} \tag{3.9c}$$

3.2 MODELAGEM PARA PREDIÇÃO DO CONSUMO EM VEÍCULOS

O paradigma da modelagem pode estar relacionado à várias áreas de interesse dentro do campo de desenvolvimento de veículos automotores, tais como: análise para integridade estrutural; vibrações e ruídos; segurança e prevenção de acidentes, custos de desenvolvimento; entre outros. Contudo, este texto tem como enfoque a modelagem para elaboração de uma estratégia de controle do fluxo de energia para economia de combustível em VEHs.

As equações básicas apresentadas na subsecção 3.1.1 representam o ponto inicial para a modelagem de veículos, sendo a base para ferramentas disponíveis que realizam esta tarefa. Tais ferramentas, que podem se tratar de modelos matemáticos genéricos ou mesmo simuladores dedicados, podem utilizar (além da abordagem matemática) ainda dados empíricos por meio de mapas ou tabelas (*look-up tables*) para auxiliar no desenvolvimento de modelos com um maior grau de fidelidade, ou seja, que representam mais precisamente o comportamento físico do sistema.

No entanto, existe uma relação de compromisso (*trade-of*) entre o nível de detalhamento e o custo computacional envolvido no processo de simulação, onde modelos com maior precisão exigem uma máquina mais robusta e um maior tempo de simulação. Dessa forma, uma boa prática de modelagem envolve sempre utilizar um grau de fidelidade coerente com a aplicação e o objetivo desejado.

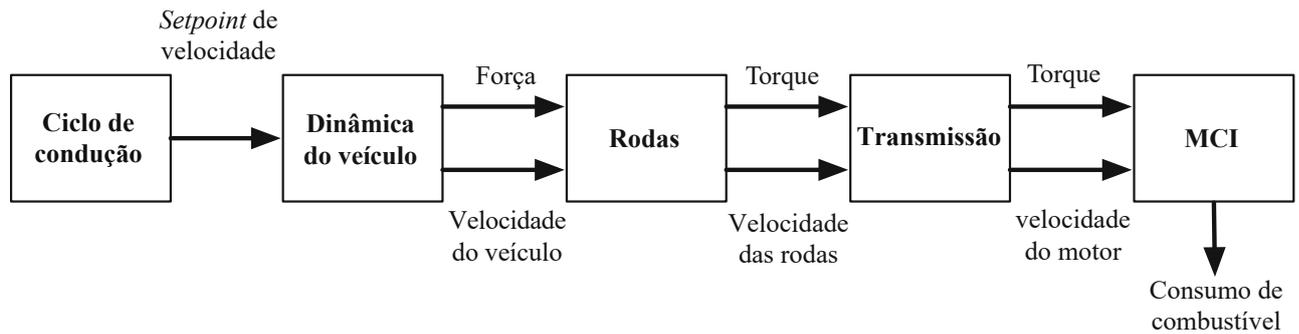
Quanto ao nível de fidelidade no qual cada componente é modelado, uma simulação veicular pode ser classificada em **estática**, **quase-estática** ou **dinâmica**. A primeira trata geralmente de uma análise preliminar para estimativas razoáveis de comportamento do sistema em um regime específico (entradas constantes) (GUZZELLA; SCIARRETTA, 2013). Portanto, em geral, esta abordagem individualmente não oferece a opção de concluir sobre o efeito das estratégias de gerenciamento de energia. As demais abordagens são detalhados a seguir.

3.2.1 Modelagem quase-estática

Em uma simulação quase-estática, a velocidade e a aceleração também não variam, porém apenas em intervalos (passo de simulação) que são pequenos o suficiente para satisfazer esta condição. Dessa forma, como mostra a Figura 3.4, a análise parte de um perfil de velocidade conhecido (ciclo de condução), e com base nas resistências ao movimento, bem como nos parâmetros do veículo, o simulador determina a força de tração (F_t) a ser aplicada, semelhante a como é colocado na Equação 3.5.

A partir dessas informações, o torque que o trem de força deve fornecer é calculado e, em seguida, as características de torque/velocidade dos vários componentes são levadas em consideração para determinar as condições de operação do motor e, finalmente, o consumo de combustível (ONORI; SERRAO; RIZZONI, 2016; WIPKE; CUDDY; BURCH, 1999).

Apesar do esforço computacional relativamente baixo, uma simulação quase-estática é adequada para desenvolver modelagens complexas de VEHs baseadas em controle de

Figura 3.4 – Modelagem quase-estática (*backward*)

Fonte: Adaptado de Onori, Serrao e Rizzoni (2016)

supervisão para otimizar o fluxo de energia dos propulsores, sendo, portanto adequada para tratar de problemas de minimização do consumo de combustível nestes sistemas.

Todavia, a grande desvantagem deste método é sua formulação para trás (*backward*), isto é, a direção na qual os cálculos são realizados não reproduz a causalidade física do sistema. Além disso, o perfil de condução deve ser conhecido a priori (GUZZELLA; SCIARRETTA, 2013). Assim, o método quase-estático isoladamente é incapaz de resolver problemas de tempo real, tal como controle de *feedback*.

3.2.2 Modelagem dinâmica

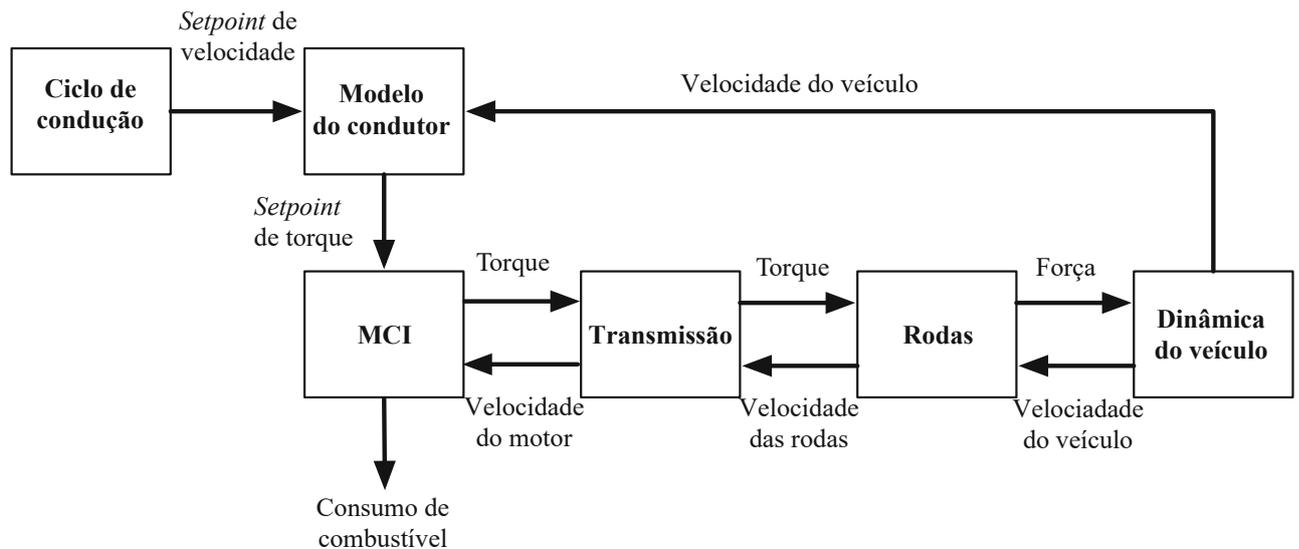
Em uma abordagem dinâmica a aceleração do veículo é consequência da força de tração gerada no trem de força e das resistências, semelhante a como é colocado na Equação 3.1, onde a velocidade do veículo é obtida a partir da integração do termo $\frac{dv}{dt}$.

Como pode ser observado na Figura 3.5, este tipo de abordagem inclui necessariamente um modelo de condutor (geralmente um controlador PID) que compara a velocidade requerida e a atual, para então atuar com comandos de aceleração ou frenagem apropriados para seguir o perfil de velocidade desejado. O comando de direção é traduzido pelos modelos de atuadores (MCI e máquinas elétricas) em um torque, que é então inserido nos modelos subsequentes e transformado de acordo com a relação de transmissão e a eficiência de cada componente.

Por fim, produzindo uma força de tração, que por sua vez é aplicada ao modelo de dinâmica do veículo, onde a aceleração é determinada considerando as cargas da estrada (ONORI; SERRAO; RIZZONI, 2016; WIPKE; CUDDY; BURCH, 1999).

3.3 ABORDAGENS DE MODELAGEM EM VEHS

O modelo de um VEH completo pode ser dividido em vários submodelos, onde estes correspondem aos componentes que formam o trem de força. Segundo Guzzella e Sciarretta (2013), cada subsistema pode representar um modelo autônomo com interfaces (entradas e saídas) bem definidas, que representam a interação com os demais componentes. Dessa forma, a modelagem de um VEH se torna modularizada, permitindo assim que o processo complexo possa ser realizado partindo de modelos mais simples. E independentemente

Figura 3.5 – Modelagem dinâmica (*forward*)

Fonte: Adaptado de Onori, Serrao e Rizzoni (2016)

do nível de hibridização do trem de força, a forma de modelar é a mesma (GUZZELLA; SCIARRETTA, 2013).

A explicação das abordagens quase-estática e dinâmica na seção anterior não contemplou as peculiaridades de um trem de força elétrico híbrido, isto para facilitar o entendimento da forma como é contabilizado o consumo de combustível nos dois tipos de modelagem. No entanto, o fluxo de energia para um VEH irá depender tanto da arquitetura quanto do tipo de modelo utilizados.

As Figuras 3.6 a 3.8 representam as abordagens quase-estática e dinâmica para as três principais arquiteturas (série, paralela e complexa⁴), onde cada bloco representa um componente do sistema, e as setas representam a informação que é transferida para cada subsistema por meio das interfaces. A nomenclatura dos blocos é a mesma utilizada na Figura 2.2, com adição dos termos que representam: o veículo (V), o dispositivo de divisão de energia (D), a tensão elétrica (U), e a corrente elétrica (i).

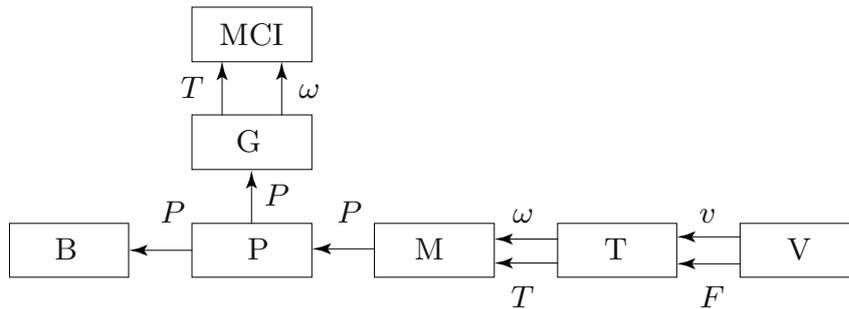
Esta Dissertação não aborda detalhes do equacionamento matemático para todos os componentes de um trem de força elétrico híbrido. No entanto, para demonstrar este processo, é apresentado no Apêndice B uma análise quase-estática e dinâmica para um conjunto planetário. Este é componente comumente utilizado como dispositivo de divisão de energia em VEHs do tipo complexo.

Detalhes acerca dos demais componentes que formam um trem de força de um VEH, bem como suas respectivas equações de modelagem quase-estática e dinâmica podem ser encontradas em Guzzella e Sciarretta (2013).

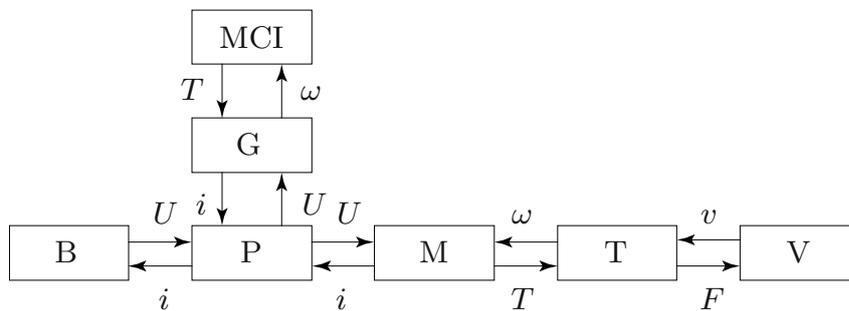
⁴ O fluxo de informação para a arquitetura série/paralela pode ser deduzido a partir da análise dos tipos série e paralelo.

Figura 3.6 – Fluxo de energia para um HEV série utilizando as abordagens quase-estática (a) e dinâmica (b)

(a) Abordagem quase-estática



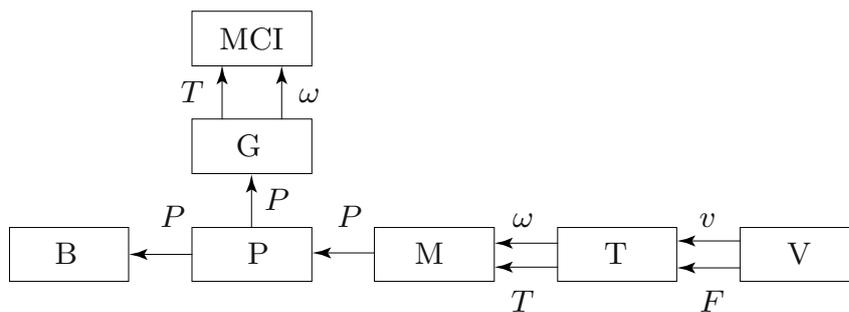
(b) Abordagem dinâmica



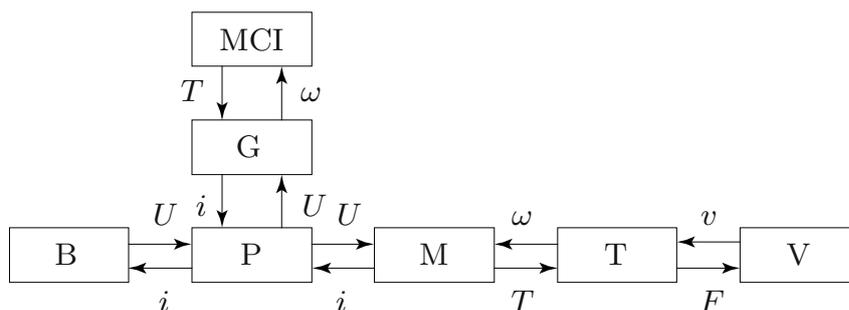
Fonte: Adaptado de Guzzella e Sciarretta (2013)

Figura 3.7 – Fluxo de energia para um HEV paralelo utilizando as abordagens quase-estática (a) e dinâmica (b)

(a) Abordagem quase-estática



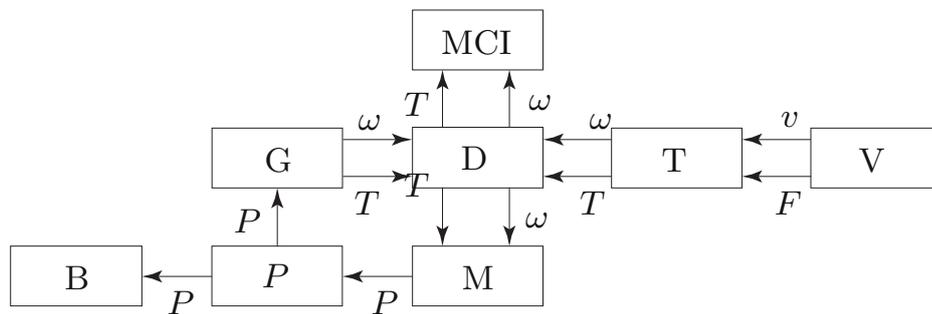
(b) Abordagem dinâmica



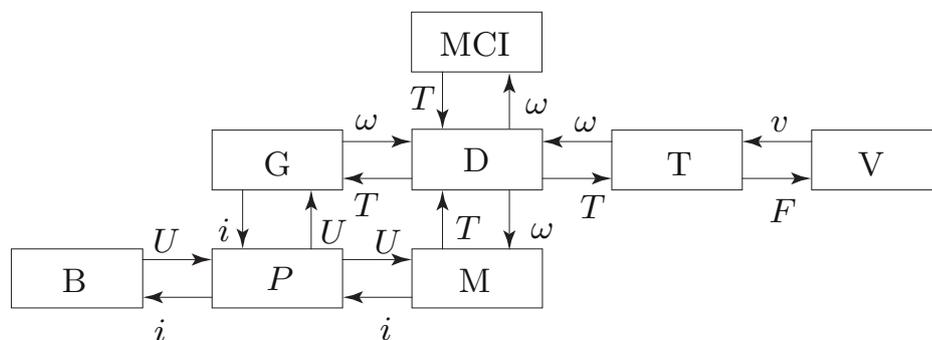
Fonte: Adaptado de Guzzella e Sciarretta (2013)

Figura 3.8 – Fluxo de energia para um HEV complexo utilizando as abordagens quase-estática (a) e dinâmica (b)

(a) Abordagem quase-estática



(b) Abordagem dinâmica



Fonte: Adaptado de Guzzella e Sciarretta (2013)

3.3.1 Ferramentas computacionais de modelagem

Os modelos de simulação são implementados com o auxílio de ferramentas de modelagem, que são classificadas quanto ao tipo de abordagem utilizada, são elas *softwares* codificados em: **linguagem de propósito geral, linguagem de propósito específico e pacote de simulação.**

Nas linguagens de propósito geral, também conhecidas como linguagem de programação, os modelos são construídos na forma de *scripts* com auxílio de programas denominados compiladores. Esta alternativa oferece flexibilidade na formulação do modelo matemático do sistema em estudo, tipo e formato dos dados de saída gerados, por outro lado, possui uma maior complexidade de modelagem exigindo maior habilidade por parte de quem modela (NAYLOR et al., 1966; GAVIRA, 2003). Dentre as linguagens que representam essa abordagem, destacam-se #C, Fortran e Python.

As linguagens de propósito específico, denominadas também como linguagens de simulação, foram desenvolvidas a partir da observação de que alguns sistemas modelados possuem características semelhantes. Dessa forma, foram criadas rotinas específicas para modelagem que resultaram na criação de linguagens de programação dedicadas à simulação, simplificando assim, o processo de criação dos modelos, em contrapartida, há uma

redução da flexibilidade na formulação dos mesmos (EMSHOFF; SISSON, 1970; GAVIRA, 2003). Semelhante ao tipo anterior, os modelos também são construídos com auxílio de compiladores, mas que são usados especificamente para aplicações em simulação. Dentre estas linguagens, destacam-se Modelica, Scilab e Ptolemy.

À medida que os modelos de simulação foram se tornando mais úteis ao projeto e análise de sistemas, as ferramentas precisaram se tornar cada vez mais específicas, robustas e simples. Dessa forma, foram desenvolvidos pacotes de simulação para garantir modelos cada vez mais precisos, e de fácil utilização (GAO; MI; EMADI, 2007). Estes, podem ser definidos como um conjunto de rotinas computacionais projetadas para facilitar a modelagem de sistemas em determinados ambientes, geralmente tendo seu escopo de aplicação reduzido a esses ambientes (LOBAO; PORTO, 1999). Os *softwares* que utilizam esta abordagem são denominados simuladores, e, devido ao avanço das tecnologias de eletrônicos e *softwares*, fornecem uma das ferramentas mais poderosas para as atividades de modelagem e simulação atualmente (GAVIRA, 2003). O Apêndice A apresenta algumas destas ferramentas aplicadas à simulação de veículos automotores.

3.4 CONTROLE DE VEHS

O controle do fluxo de energia em um trem de força elétrico híbrido é desempenhado por uma estratégia de controle que geralmente é implementada no controlador central do veículo na forma de um algoritmo (SALMASI, 2005).

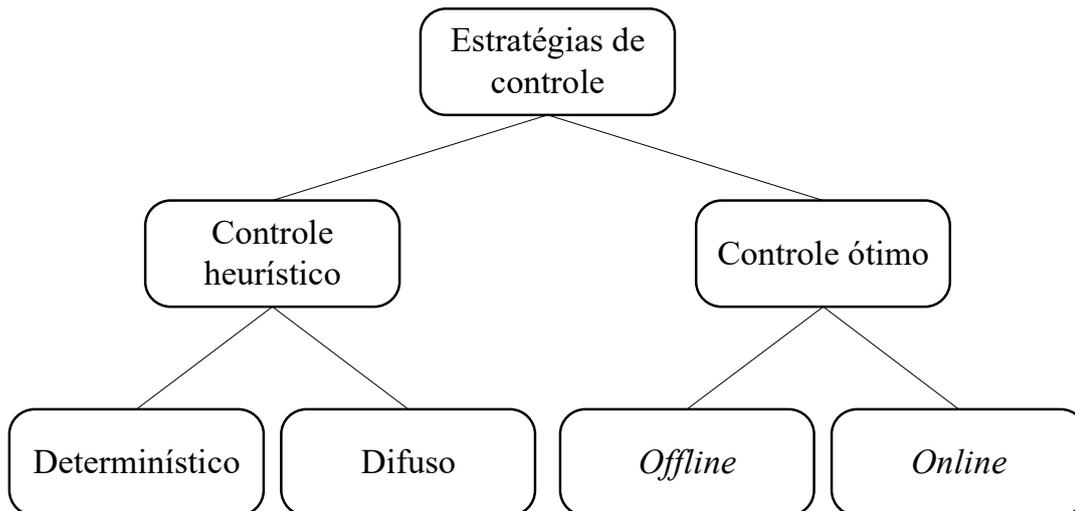
Para otimizar a operação de um VEH é preciso que o sistema de gerenciamento atenda às demandas do condutor em relação capacidade de tracionamento das rodas mantendo o consumo de combustível e as taxas de emissões em um nível aceitável, ao mesmo tempo que preserva o SoC da bateria acima de um *setpoint* mínimo. Contudo, para alcançar esse propósito geral, segundo Salmasi (2007), uma boa estratégia deve resolver o *trade-off* entre objetivos conflitantes, tais como a redução de emissões, desempenho eficiente do trem de força e conforto do condutor.

De acordo com Salmasi (2007), as metodologias de controle de operação utilizadas no EMS dos VEH seguem duas tendências gerais para lidar com o problema, conforme pode ser visualizado na Figura 3.9. Onde a primeira solução corresponde ao controle heurístico do sistema baseando-se em regras, que podem ser determinísticas ou difusas (do inglês, *fuzzy*). A segunda solução é baseada no controle ótimo do trem de força, que pode ser *offline* ou *online*.

3.4.1 Controle Heurístico

O gerenciamento heurístico de um VEH é baseado em regras intuitivas, e em correlações que envolvam variáveis do veículo para definir as saídas de controle (BAUMANN et al., 2000). Dessa forma, estas regras utilizam mapas (de eficiência, consumo ou emissões) e expertise humana como entrada, e são geralmente implementadas por meio de *look-up tables*.

Figura 3.9 – Classificação das estratégias de controle em VEHs



Fonte: Adaptado de Salmasi (2007)

A forma da lógica utilizada nas regras a classificam como **determinísticas** ou **difusas**. Onde a primeira utiliza estruturas do tipo “se/então” (do inglês, *if/else*) para representar sinais lógicos (alto e baixo) que são calculados com base no valor de determinada variável. A lógica difusa se assemelha à determinística, no entanto ao invés de se limitar a sinais lógicos, o valor da variável é discretizado em espaços finitos de forma a caracterizar estados intermediários.

Estes dois tipos de lógica podem ser usados concomitantemente em uma mesma estratégia de controle. Por exemplo, regras determinísticas podem definir o estado do MCI (ligado ou desligado), a depender da demanda de potência do veículo. Por sua vez, regras difusas podem ser utilizadas para caracterizar o SoC da bateria (baixo, médio ou alto) para acionar diferentes modos de carregamento, dentre outras saídas.

Apesar de detalhes a respeito das regras não serem comumente disponibilizados por parte dos fabricantes, análises realizadas em veículos comerciais apontam para dois princípios básicos (GUZZELLA; SCIARRETTA, 2013; SALMASI, 2007; BAUMANN et al., 2000):

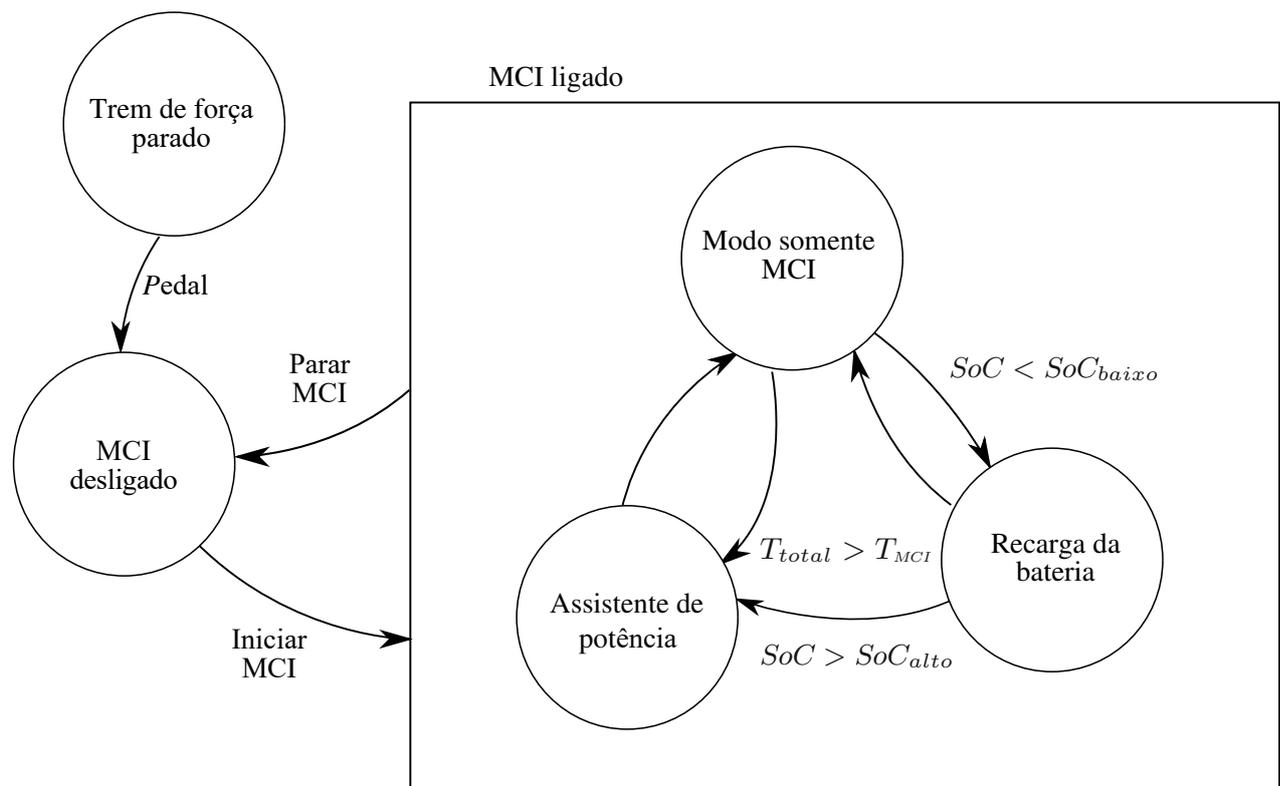
1. A propulsão do MCI deve ser utilizada apenas em situações favoráveis à sua operação, nas demais a propulsão elétrica deve ter preferência. Portanto, enquanto o MCI estiver ligado, seu ponto de operação deve ser mantido próximo das zonas de maior eficiência, de maior economia ou de menor emissão, de acordo com os objetivos da estratégia. Por exemplo, para conseguir uma maior eficiência, o que geralmente acontece em altas cargas, a potência do MCI é aumentada em relação à demanda de energia do motorista e a energia extra é direcionada para a bateria.
2. A carga da bateria deve ser mantida dentro de limites pré-estabelecidos. Assim, quando o SoC cai abaixo de um certo nível a recarga da bateria deve ser favorecida (MCI ligado), enquanto que um modo puramente elétrico deve ser mais apropriado quando o SoC exceder um determinado limite. Requisitos adicionais podem

estar relacionados à temperatura. Por exemplo, durante seu aquecimento o MCI deve ser mantido ligado independentemente de sua eficiência, para acelerar a ativação do catalizador.

Em uma abordagem heurística, a estratégia de gerenciamento é tipicamente implementada como uma máquina de estados finitos⁵ (do inglês, *Finite State Machine*) (GUZZELLA; SCIARRETTA, 2013). Conforme exemplo mostrado na Figura 3.10, onde os estados correspondem aos modos de operação do VEH, e as transições entre os estados são realizadas quando algumas condições são satisfeitas. Por exemplo, para que o modo elétrico (MCI desligado) seja acionado as seguintes condições precisam ser satisfeitas simultaneamente:

- a velocidade e demanda de energia são suficientemente baixas;
- a temperatura do motor ou do catalisador é suficientemente alta;
- o SoC da bateria é suficientemente alto;
- os acessórios acionados pelo motor estão desativados.

Figura 3.10 – Controle heurístico de um VEH paralelo utilizando máquina de estados finitos



Fonte: Adaptado de Guzzella e Sciarretta (2013)

Em uma estratégia prática completa, as regras de transição são mais complexas e podem incluir várias outras sub-regras que são combinadas por meio de álgebra booleana. E

⁵ Modelo matemático usado para representar circuitos lógicos, no qual este é tratado como uma máquina abstrata que deve estar em um número finito de estados.

quando várias condições são introduzidas, sua combinação e priorização tornam-se difíceis de gerenciar, o que é uma desvantagem deste tipo de abordagem.

No entanto, a maior vantagem por parte dos controladores heurísticos está na facilidade de implementação em tempo real, e no fato deles traduzirem diretamente as especificações de controle. Além disso, se bem ajustados, podem fornecer bons resultados em termos de redução de consumo e emissões. Por isso, estes controladores representam os estado da arte dos VEHs comercializados em massa, tal qual o Toyota Prius (ONORI; SERRAO; RIZZONI, 2016).

Entretanto, o comportamento dos controladores heurísticos depende fortemente da escolha dos limiares, bem como dos mapas que definem as transições entre os modos de operação, que na verdade podem variar substancialmente a depender das condições de direção (SCIARRETTA; GUZZELLA, 2005). Além disso, as regras definidas por especialistas não necessariamente exploram o desempenho máximo que o sistema pode obter (GUZZELLA; SCIARRETTA, 2013).

Estas desvantagens tem motivado o desenvolvimento de controladores ótimos baseados em modelos, visando utilizar um método quantitativo bem definido para otimização do sistema.

3.4.2 Controle ótimo

Diferentemente de um controle heurístico que não envolvem otimização explícita, o controle ótimo de um VEH consiste em utilizar modelos para otimizar o fluxo de energia entre os componentes do sistema a partir da minimização de uma função custo J , que geralmente representa o consumo de combustível e/ou emissões.

Matematicamente este problema consiste em encontrar um controle $u(t)$ que leva à minimização do combustível consumido m_f durante um determinado tempo de trajeto t_f (GUZZELLA; SCIARRETTA, 2013), como mostra a equação a seguir:

$$J = \int_0^{t_f} \dot{m}_f(u(t), t) dt, \quad (3.10)$$

onde \dot{m}_f é a taxa do fluxo de massa de combustível consumido. Sendo que a minimização da função J está sujeita a restrições referentes às capacidade dos atuadores e manutenção do SoC da bateria (ONORI; SERRAO; RIZZONI, 2016).

Do ponto de vista conceitual, este tipo de gerenciamento consiste em duas classes. A primeira corresponde ao controle ótimo **offline**, onde a minimização da função custo é realizada usando o conhecimento das demandas de energia futuras e passadas, portanto a solução ótima global para divisão de energia no trem de força pode ser encontrada facilmente (SALMASI, 2007).

No entanto, esta abordagem não pode ser implementada para o gerenciamento de energia em tempo real, uma vez que todo trajeto do veículo deve ser conhecido a priori (solução não-causal), além da sua complexidade computacional. No entanto, segundo (SCIARRETTA; GUZZELLA, 2005), este tipo de abordagem é considerada uma importante ferramenta de projeto, pois fornece uma referência de desempenho ideal do sistema. Por-

tanto pode ser usada para avaliar outras estratégias de controle ou para construção de regras em uma abordagem heurística.

Dentre as várias técnicas utilizadas na implementação de um controle *offline* relatadas na bibliografia, os resultados mais significativos têm sido alcançados utilizando Algoritmo Genético (AG) (PICCOLO et al., 2001; MONTAZERI-GH; POURSAMAD; GHALICHI, 2006; DENIS et al., 2018), Programação Dinâmica (PD) (SUNDSTROM; GUZZELLA, 2009; LIN et al., 2003) e Estratégia de Minimização do Consumo Equivalente⁶ (ECMS) (LI; CHEN, 2016; SERRAO; ONORI; RIZZONI, 2009).

Em Denis et al. (2018) um controle *offline* baseado em algoritmos genéticos é proposto para otimizar divisão de potência de um VEH *plug-in* paralelo para o ciclo de teste *Urban Dynamometer Driving Schedule* (UDDS). Como resultado os autores diminuem o custo computacional ao passo que mantém a minimização do consumo próximo ao ótimo, o que é evidenciado em uma comparação entre as abordagens utilizando AG, PD e regras heurísticas, como mostra a Tabela 3.1. A Figura 3.11 ilustra o gerenciamento do SoC da bateria utilizando as três técnicas, o que evidencia quão próximo estão os resultados obtidos com PD e AG.

Tabela 3.1 – Características e resultados de simulação entre as estratégias PD, AG e regras heurísticas

Estratégia	Requerimento computacional	Conhecimento do trajeto	Consumo de combustível
PD	Pesado (horas)	Sim	1,89 l/100 km
AG	Leve (2 min)	Sim	1,94 l/100 km
Regras	Leve (segundos)	Não	2,58 l/100 km

Fonte: Adaptado de Denis et al. (2018)

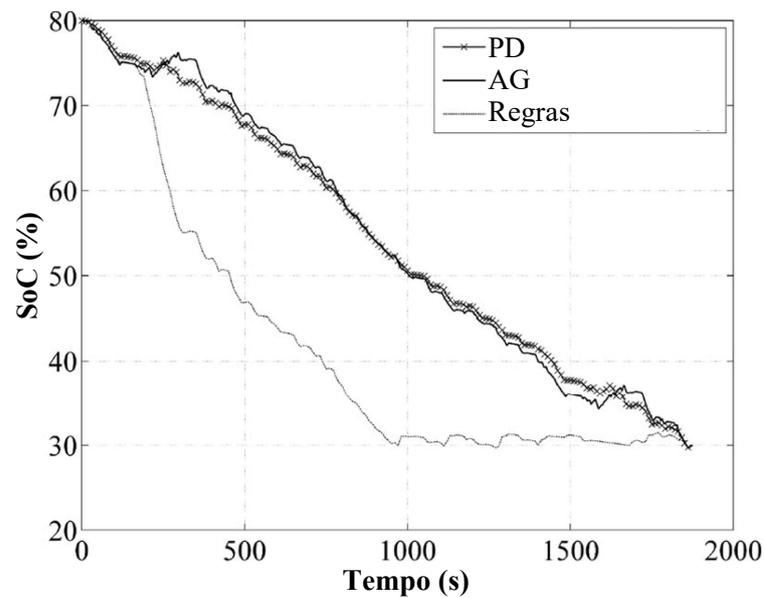
A segunda classe corresponde ao controle **online** ou causal, onde a minimização da função custo acontece em tempo real, que leva em consideração geralmente a medida do consumo de combustível e o SoC da bateria. No entanto, como somente as variáveis do sistema no momento atual são utilizadas, a solução encontrada é um ótimo local ou restrito. Portanto do ponto de vista global, é considerada sub-ótima. Nesta categoria, as técnicas de controle preditivo (LIN et al., 2004; DEBERT; YHAMAILLARD; KETFI-HERIFELLICAUD, 2010) e ECMS adaptada para tempo real (MUSARDO et al., 2005; PAGANELLI et al., 2002) se destacam.

Em Lin et al. (2004) um controle preditivo sub-ótimo baseado em um algoritmo adaptativo de reconhecimento do padrão de condução é desenvolvido. Este é utilizado no gerenciamento de potência dos propulsores de um VEH série/paralelo de grande porte para minimizar o consumo de combustível, bem como as emissões de NO_x e PM.

O conceito da abordagem utilizada é explicitado na Figura 3.12, onde as condições futuras sobre uma determinada rota são estabelecidas para uma janela finita de tempo $f_i T$. Para isso, um histórico do padrão de condução é discretizado no tempo e armazenado

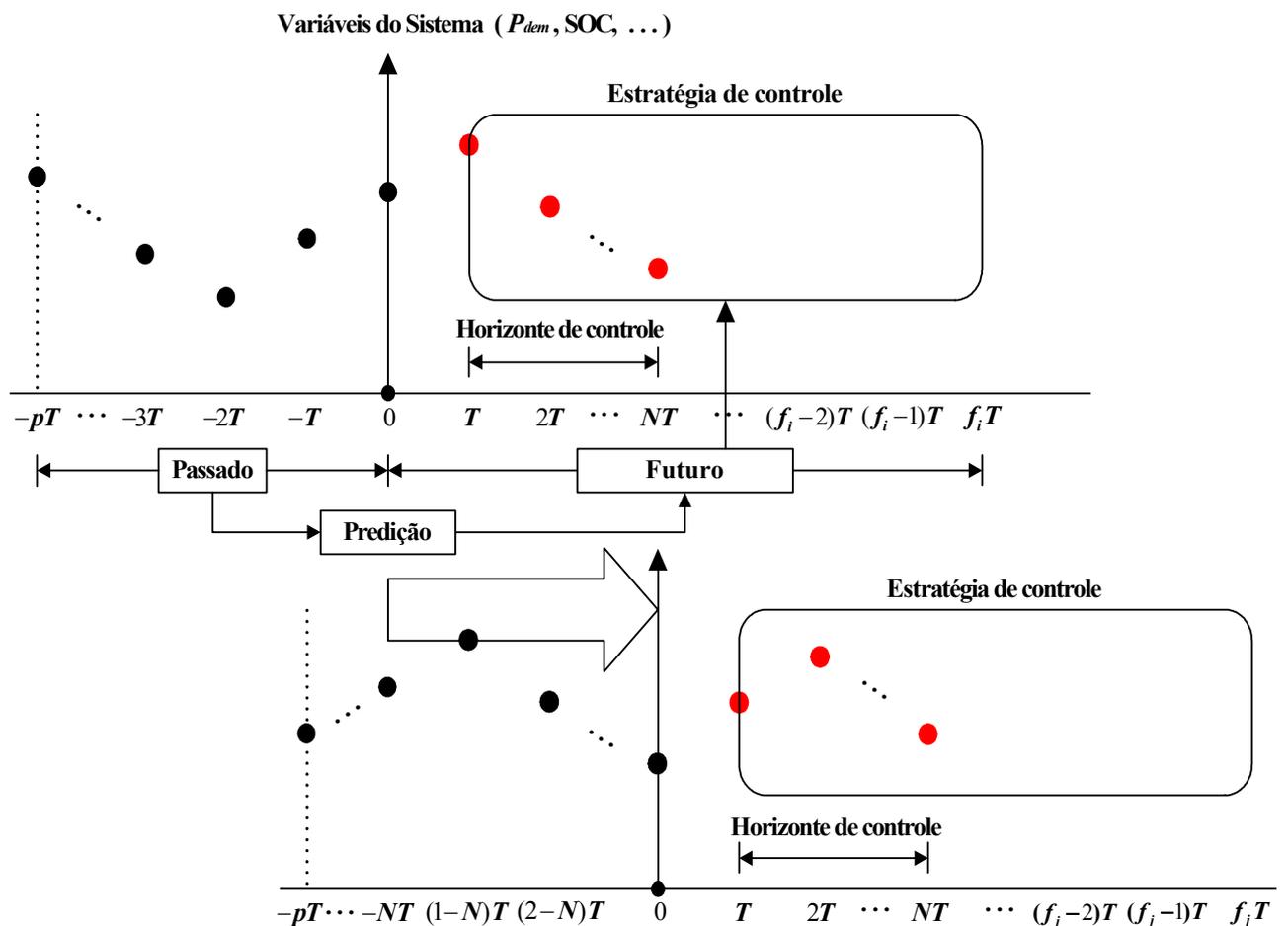
⁶ Do inglês, *Equivalent Consumption Minimization Strategy* (ECMS)

Figura 3.11 – Comparação entre as estratégias PD, AG e regras determinísticas para o gerenciamento do SoC



Fonte: Adaptado de Denis et al. (2018)

Figura 3.12 – Controle preditivo baseado no reconhecimento do padrão de condução



Fonte: Adaptado de Lin et al. (2004)

durante uma janela finita passada pT . Juntamente com as informações atuais do veículo, as médias dessas variáveis são então calculadas e utilizadas para determinar o estado do sistema na janela NT , que representa o horizonte de controle, que depois de passada

fará parte do histórico para determinação da próxima estratégia de controle. O controlador desenvolvido foi testado para vários ciclos de condução, nos quais os resultados foram avaliados comparando-se os dados obtidos por meio do método proposto, com os dados de referência obtidos por meio da técnica de programação dinâmica. Em média o controlador adaptativo conseguiu resultados 8,3% acima do obtido através de controle ótimo global, o que é considerado satisfatório pelos autores.

Detalhes a respeito das técnicas de controle heurístico e ótimo discutidas nesta seção, bem como de outras não relacionadas podem ser encontrados em Salmasi (2007).

3.4.3 Considerações finais

No presente capítulo foi detalhada a modelagem de veículos, partido das equações básicas da dinâmica longitudinal até o cálculo do balanço de energia em um determinado ciclo de condução. Com isso, são definidas as possibilidades de recuperação de energia exploradas pelos sistemas de controle em VEHs.

São apresentadas ainda os tipos de modelagem quase-estática e dinâmica, onde na primeira a força de tração é obtida a partir de um perfil de velocidade pré-estabelecido, e na segunda a força de tração é obtida como consequência do torque gerado pelo trem de força. Posteriormente, são discutidos os dois tipos de abordagem aplicadas às diferentes arquiteturas de um VEHs.

O tema modelagem é finalizado discutindo sobre as diferentes ferramentas computacionais utilizadas na simulação de veículos. Essas são subdivididas em linguagens de propósito geral e específico, além de pacotes de simulação.

Por fim, este capítulo aborda os diferentes tipos de controle utilizados em VEHs, que podem ser do tipo heurístico ou ótimo. Os primeiros se baseiam em regras intuitivas para definir as saídas de controle e se subdividem em Determinístico ou difuso. Já o controle ótimo se utiliza de modelos puramente matemáticos que buscam a minimização de uma função custo e envolvem otimização explícita, e podem ser *offline* ou *online*.

A partir do conteúdo apresentado nos Capítulos 2 e 3, o próximo capítulo traz os passos a serem seguidos para o desenvolvimento de modelos de simulação para VEHs com foco no sistema de controle.

4 ABORDAGEM SISTEMÁTICA PARA MODELAGEM ORIENTADA PARA CONTROLE DE OPERAÇÃO DE VEHS

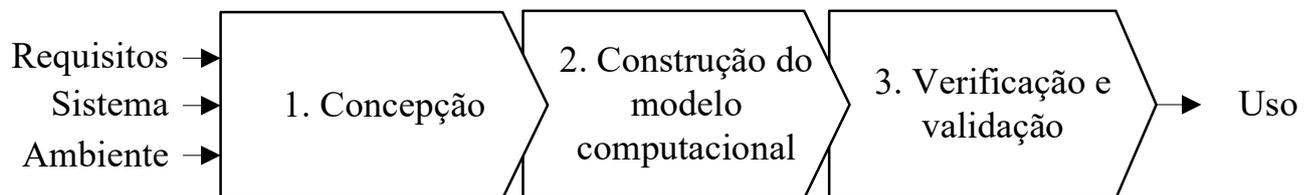
Como ficou evidenciado nos capítulos anteriores, os VEHS necessariamente contam com um controlador de supervisão, que contém uma estratégia de operação responsável por, dentre outras tarefas, minimizar o consumo de combustível. Tal estratégia geralmente é desenvolvida em um ambiente computacional, com o auxílio de ferramentas de modelagem. No entanto, um VEH é uma máquina eletromecânica complexa, e modelar estes sistemas costuma ser uma tarefa árdua aos projetistas.

Dessa forma, este capítulo é destinado à apresentação de uma sistematização do processo de modelagem de VEHS, que neste trabalho é proposta como ferramenta de auxílio na construção de modelos de simulação, para o desenvolvimento e avaliação de estratégias de operação destes veículos.

4.1 VISÃO GERAL DA SISTEMÁTICA

A sistemática é proposta com base no conteúdo apresentado nos Capítulos 2 e 3, sendo esta dividida em três macrofases, que correspondem às etapas de **concepção**, **construção do modelo computacional**, e **verificação e validação**, como mostra a Figura 4.1.

Figura 4.1 – Macrofases da sistemática



Fonte: Autor

As entradas do processo são as informações preliminares referentes aos requisitos da modelagem, bem como das características do sistema e do ambiente no qual se deseja conhecer e testar o desempenho do veículo. Já a saída, corresponde ao uso do modelo, que pode se tratar desde um simples teste de parâmetros (análise de sensibilidade), até uma otimização minuciosa nos modos de operação do VEH.

As macrofases são desdobradas em atividades que serão detalhadas nas seções subsequentes.

4.2 MACROFASE 1 - CONCEPÇÃO

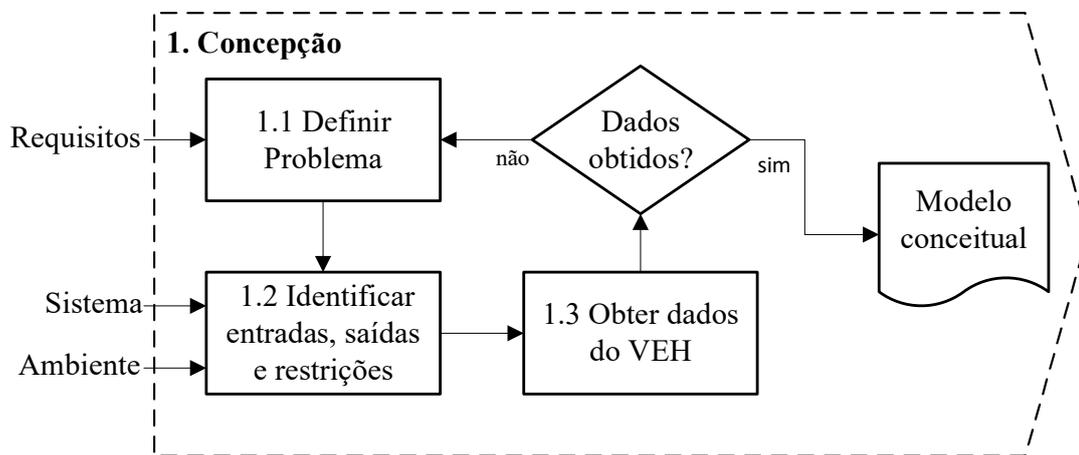
Na macrofase de concepção, o objetivo é entender o problema abordado, e identificar o modelo conceitual no qual se baseará as demais etapas do processo.

Este processo se inicia a partir da declaração do objetivo geral da modelagem, que é expresso em uma frase sucinta, de forma que fique claro, em termos gerais, o que se deseja obter ao fim da modelagem. Por exemplo:

“Modelagem para predição do consumo de combustível de um VEH baseado no Honda Insight® 2001.”

Como mostra a Figura 4.2, esta macrofase é dividida em três atividades, sendo elas: **definir problema, identificar entradas, saídas e restrições e obter dados do VEH.**

Figura 4.2 – Macrofase de concepção



Fonte: Autor

4.2.1 Atividade 1.1 - Definir problema

Esta atividade consiste em definir o escopo do problema, e determinar quais critérios a modelagem deve atender. Para isso, preliminarmente, é preciso realizar uma análise dos requisitos de modelagem.

O levantamento de requisitos tem como ponto principal compreender a modelagem o máximo possível antes de começar a construí-la. Do ponto de vista da criação de *softwares*, estes requisitos podem ser de natureza **normativa**, **funcional** ou **não-funcional** (BEZERRA, 2015):

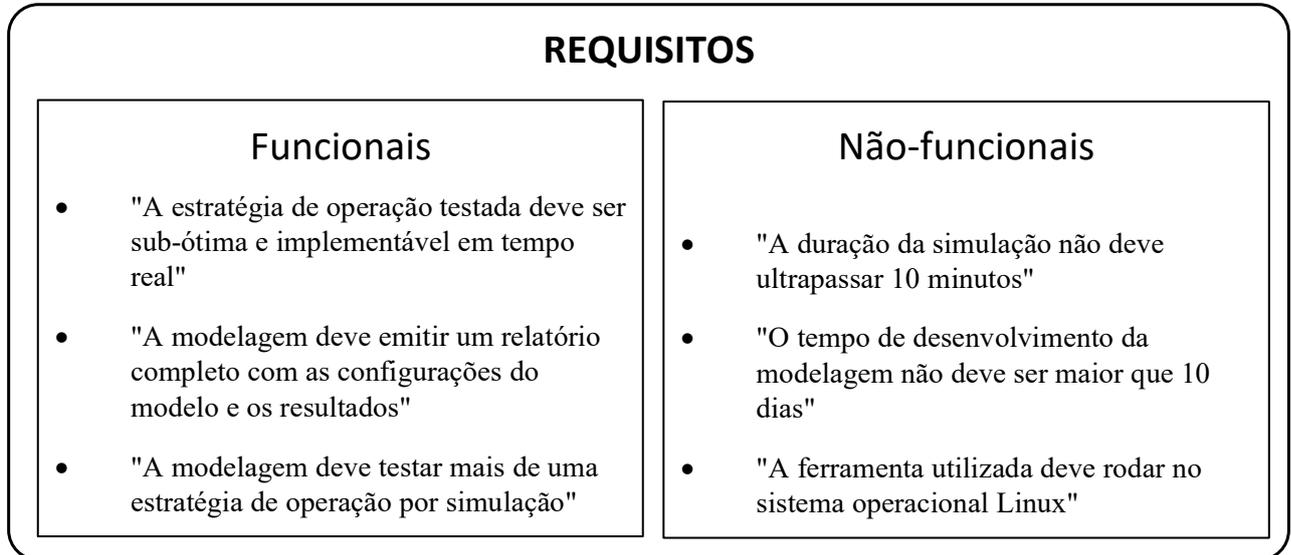
- *Requisitos normativos*: são declarações de restrições impostas sobre o desenvolvimento dos modelos. Por exemplo, adequações a custos e prazos, ou aspectos legais (licenciamento e confidencialidade de informações).
- *Requisitos funcionais*: descrevem as funções que os usuários desejam ou precisam que o modelo ofereça, ou seja, definem a aplicação geral da modelagem.
- *Requisitos não-funcionais*: são atributos globais da modelagem, e declaram características de *qualidade* da mesma, como: desempenho, fidelidade, usabilidade, dentre outras. Estes também estão relacionados com funcionalidades da modelagem.

Ao contrário dos requisitos normativos, os funcionais e não-funcionais são estabelecidos pelo usuário, e reflete o desejo do mesmo em relação à modelagem. Portanto, o atendimento destes requisitos ao final da modelagem significa a validação da mesma.

Em geral, o responsável pela construção dos modelos (analista) também é um usuário dos mesmos, no entanto, outras pessoas podem eventualmente utilizá-lo. Dessa forma, é importante que estes agentes estejam envolvidos no processo de levantamento dos requisitos.

A Figura 4.3 traz alguns exemplos de requisitos funcionais e não-funcionais.

Figura 4.3 – Exemplos de requisitos funcionais e não-funcionais



Fonte: Autor

Por serem de natureza qualitativa, os requisitos não-funcionais são difíceis de mensurar, e as vezes podem ser controversos (BEZERRA, 2015). Por exemplo, fidelidade e desempenho geralmente são atributo conflitantes em um modelos. Assim, a análise dos requisitos não-funcionais se torna subjetiva, o que dificulta um posterior processo de validação a partir destes.

Os *requisitos funcionais*, após definidos, são organizados por ordem de importância, e classificados em obrigatórios ou desejáveis para a modelagem. Onde os primeiros são necessariamente atendidos, e os demais são ponderados em função de critérios específicos, que também podem estar relacionados aos requisitos não-funcionais e normativos, tais como custo, ferramentas disponíveis e usabilidade.

Para a tarefa de priorização, recomenda-se a utilização de uma ferramenta de hierarquização como o **diagrama de Mudge**. Esta técnica permite a comparação entre duas funções, com o objetivo de organizá-las por ordem de relevância, e assim avaliar o cumprimento das exigências requeridas pelo usuário. A comparação é realizada geralmente enumerando as funções, como 1,2,3... *n*, onde *n* é o número de funções comparadas. E, em sequência são atribuídos valores para as comparações (NICKEL et al., 2010).

Como pode ser observado na Figura 4.4, as funções são representadas pelos números (de 1 a 5), as letras em maiúsculo (de A a E) representam a ordem de importância que um tem sobre o outro. Por exemplo, na segunda coluna considera-se que o item 2 tem relevância D sobre o item 3. Na coluna soma os pesos de cada item são somados e, na última coluna, calcula-se a porcentagem que cada função representa sobre o total.

Figura 4.4 – Exemplo de diagrama de Mudge

Eficiência		2	3	4	5	SOMA	%	
A	5	1	1B	1A	1A	1B	18	56
B	4		2D	2D	5C	4	13	
C	3		3	4D	3C	3	9	
D	2			4	5D	2	6	
E	1				5	5	16	
TOTAL						32	100	

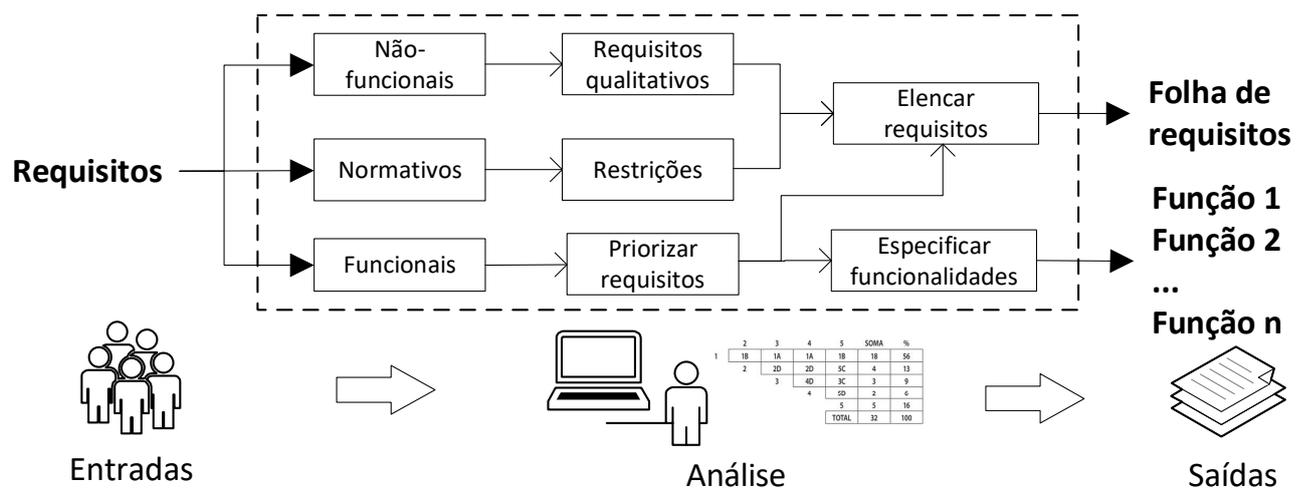
Fonte: Adaptado de Nickel et al. (2010)

Após conhecidos e priorizados, os requisitos funcionais, juntamente como os demais, dão origem à folha de requisitos (BEZERRA, 2015). Este documento é utilizado durante o processo de modelagem, auxiliando nas tomadas de decisão e, posteriormente, na validação da modelagem.

Nesta atividade, os requisitos funcionais ordenados ainda são utilizados para especificar as funcionalidades da modelagem. Assim, cada requisito é traduzido em uma ou mais funcionalidades para a modelagem, de forma que ao final se conheça as funções que serão implementadas. Por exemplo, o primeiro requisito funcional elencado na Figura 4.3, pode ser traduzido nas seguintes funções: “*usar controle heurístico do tipo determinístico*” e “*usar método de máquina de estados finitos*”.

Depois de conhecidos e priorizados os objetivos e/ou restrições impostas pelo usuário estes são devidamente analisados, de forma que se possa estabelecer o problema central, bem como as especificações das funcionalidades que o modelagem deverá atender. Este processo é evidenciado na Figura 4.5).

Figura 4.5 – Processo de análise dos requisitos de modelagem



Fonte: Autor

A saída desta atividade corresponde à folha de requisitos da modelagem, que expõe com clareza informações importantes como: pretensões de grau de abstração, custos e tempo de desenvolvimento. Além disso, uma outra saída diz respeito às principais funções que devem ser implementadas.

4.2.2 Atividade 1.2 - Identificar entradas, saída e restrições do sistema

Nesta atividade, o objetivo é entender o funcionamento do trem de força e, com isso, definir o fluxo energético no mesmo. Para isso, o *sistema* a ser modelado e o *ambiente* no qual o veículo deve ser testado são analisados matematicamente, de modo que seja possível esboçar um modelo conceitual do VEH em estudo, tanto para a planta quanto para o controle.

Inicialmente, para a formulação matemática da planta opta-se entre as abordagens quase-estática ou dinâmica, apresentadas no Capítulo 3. Esta escolha depende diretamente dos requisitos elencados na atividade anterior, como por exemplo: o nível de detalhamento da análise, o custo, e o tempo de desenvolvimento.

Como o objetivo é uma análise energética do VEH, deve se partir inicialmente das equações básicas da dinâmica longitudinal¹, e se utilizar das equações de modelagem pretendida para cada componente (presentes em Guzzella e Sciarretta (2013)), para formar um arranjo de blocos interconectados que represente o trem força².

Os blocos devem representar os componente do sistema, para que, por meio das suas interfaces, fique evidenciado o fluxo energético na planta. Este tipo abordagem é conveniente, pois as principais ferramentas de modelagem utilizam blocos como forma representação dos componentes nas suas respectivas bibliotecas.

Já para o modelo de controle é preciso optar por uma técnica a ser utilizada. Esta seleção se inicia a partir da decisão de usar um controle heurístico ou ótimo. A partir disso, opta-se por um subtipo e, por fim, é determinada uma técnica de controle específica. Esta escolha também é realizada a partir da análise dos requisitos que, de alguma forma, fazem referência à natureza do gerenciamento pretendido para VEH.

A Tabela 4.1 apresenta algumas das principais técnicas, listadas de acordo com o tipo e subtipo de controle, bem como as respectivas fontes de informações, assim, pode ser usada como ferramenta de seleção.

O modelo conceitual do controlador deve evidenciar as variáveis de entrada e saída do mesmo, e dentre essas, quais devem ser utilizadas para a tomada de decisão no decorrer de um determinado trajeto (variáveis de controle). Em uma análise de consumo energético de VEHS, a vazão mássica de combustível, o SoC da bateria e a razão de distribuição de torque³ geralmente são selecionadas como variáveis de controle.

Os blocos interconectados, e suas respectivas correlações com o controlador correspondem a uma modelagem conceitual do VEH, sendo esta a base para o entendimento e construção do modelo computacional.

É importante que a complexidade não se exceda além da necessidade do VEH em estudo definidos na atividade anterior, pois, de acordo com Gavira (2003), a violação desta recomendação apenas acrescentará esforço computacional e dificultará a construção do modelo.

Como pode ser observado na Figura 4.6, o nível de abstração atribuído a uma mode-

¹ ver seção 3.1.1

² Ver seção 3.3

³ Para VEH do tipo complexo.

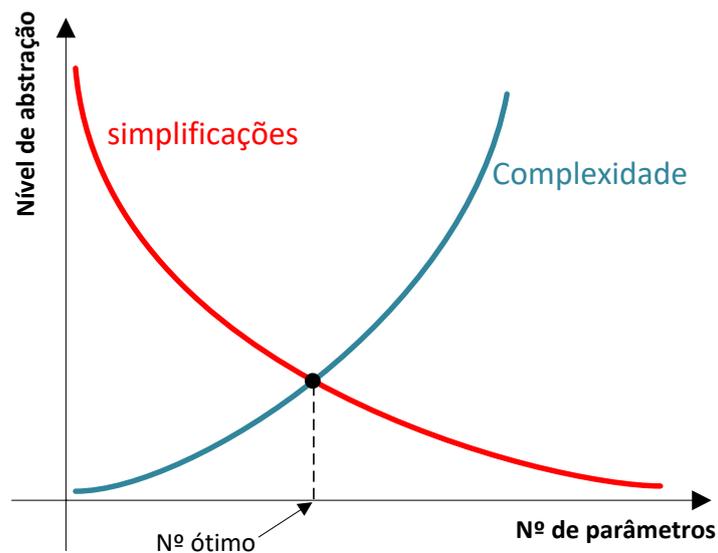
Tabela 4.1 – Tabela de seleção do tipo de controle

Tipo	Subtipo	Técnica	Fonte
Controle heurístico	Determinístico	Controle <i>on/off</i>	Shabbir, Arana e Evangelou (2012)
		Seguidor de potência	Johnson, Wipke e Rausen (2000)
		Máquina de estado	Phillips, Jankovic e Bailey (2000)
	Difuso	Convencional	Lee e Sul (1998)
		Adaptativo	Langari e Won (2005)
Controle ótimo	Offline	Preditivo	Rajagopalan, Rizzoni e Guezennec (2001)
		Programação linear	Tate e Boyd (2000)
		Programação dinâmica	Sundstrom e Guzzella (2009)
		ECMS	Li e Chen (2016)
		Controle clássico	Delprat et al. (2004)
	Online	Algoritmo genético	Montazeri-Gh, Poursamad e Ghalichi (2006)
		Preditivo	Lin et al. (2004)
		Controle robusto	Pisu et al. (2003)
		Controle desacoplado	Pisu, Koprubasi e Rizzoni (2005)
		ECMS modificada	Musardo et al. (2005)

Fonte: Autor

agem tem correlação com a quantidade de parâmetros contidos na análise (CLAESKENS; HJORT, 2008). Dessa forma, a complexidade será tão alta quanto maior for a quantidade de parâmetros, podendo assim ser mesurada.

Figura 4.6 – Relação entre nível de abstração e quantidade de parâmetros



Fonte: Autor

Ao final desta atividade, um conjunto blocos interligados evidenciando o fluxo de energético e o grau de abstração do sistema é obtido, sendo este um escopo do modelo conceitual para o VEH em estudo.

4.2.3 Atividade 1.3 - Obter dados do VEH

Esta atividade tem como objetivo a busca por dados necessários à construção dos modelos, sendo estes: os *parâmetros adicionais* e os *dados de resposta* do veículo. Os primeiros são utilizados na construção dos modelos, enquanto que os segundos são empregados nos processos de verificação e validação dos mesmos.

Os parâmetros adicionais são aqueles que geralmente não fazem parte dos dados de entrada (sistema e ambiente) da sistemática, e que são solicitados depois de esboçado o modelo conceitual. Em geral, estes dados correspondem aos mapas de eficiência dos atuadores e da bateria, que dependem da estratégia de modelagem, e do nível de detalhamento requerido. A origem destes dados são, geralmente, trabalhos científicos, livros especializados, ou mesmo modelos já validados.

Os dados de resposta do veículo, por sua vez, referem-se a um conjunto de informações coletadas a partir de testes padronizados do veículo. Porém, no caso em que os dados não estejam disponíveis, ou caso o VEH inexista (novo produto), uma possibilidade é obter uma estimativa subjetiva relativa ao sistema, por meio de comparações com dados de sistemas semelhantes (BANKS, 1998).

A decisão sobre quais dados serão buscados esta diretamente ligada aos objetivos da modelagem, ou seja, depende de "*como*" e "*o que*" será analisado na modelagem. Por exemplo, se um dos objetivos almejados é prever a economia de combustível em determinado ciclo de condução, é necessário que um histórico de consumo seja obtido, de forma que se possa compará-lo com as respostas do modelo quando testado em situações semelhantes. O mesmo poderia ser feito para o *SoC* da bateria.

Quanto maior a quantidade de dados de comparação, mais eficazes serão os processos de verificação e validação dos modelos. No entanto, tão importante quanto a quantidade é a qualidade destes dados (PACE, 2003). Neste sentido, a forma como os dados são obtidos atestam a sua confiabilidade. Por isso, recomenda-se o uso de fontes fidedignas, como relatórios de laboratórios de pesquisa certificados, bibliografias especializadas e/ou dados dos fabricantes.

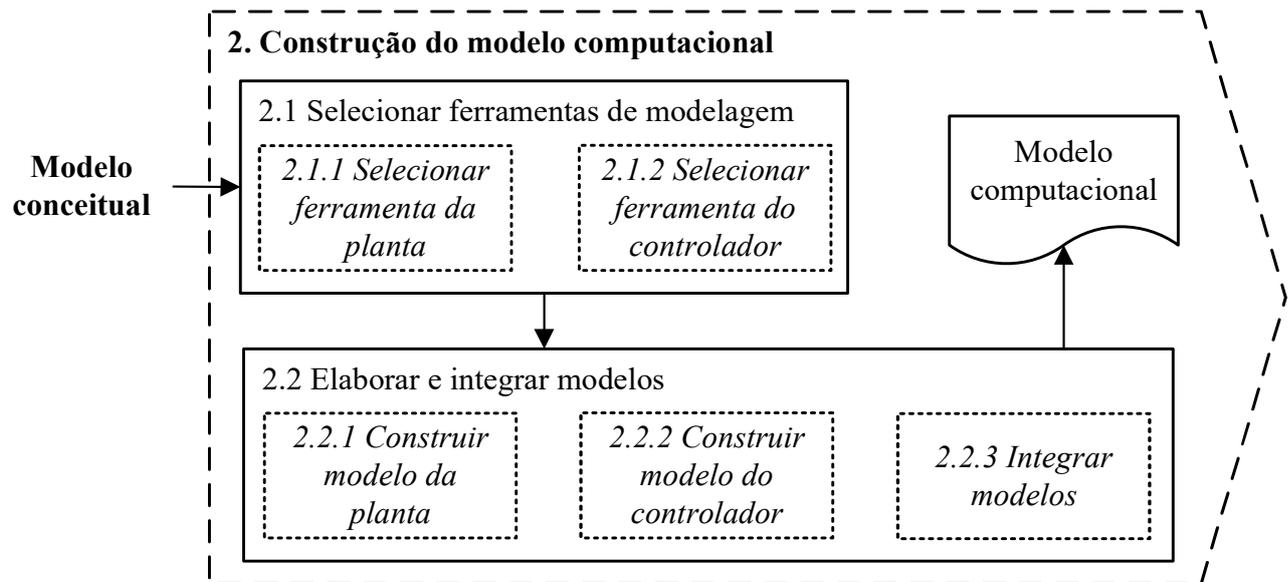
Caso não seja possível a obtenção dos dados, as atividades subsequentes estarão comprometidas. Assim, caso isto ocorra, a recomendação é que a definição do problema seja revista, e adequada aos dados disponíveis.

Como saída desta atividade, tem-se um conjunto de dados de resposta e parâmetros de funcionamento do VEH, que devem servir de auxílio para as etapas seguinte da sistemática.

4.3 MACROFASE 2 - CONSTRUÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL

Esta macrofase engloba as atividades que resultam na tradução da modelo conceitual em uma versão computacional, composta pelos modelos de planta e controle. Como pode ser observado na Figura 4.7, esta macrofase engloba duas atividades: **selecionar ferramentas de modelagem**, e **elaborar e integrar modelos**. Estas ainda são subdivididas em tarefas que são explicadas a seguir.

Figura 4.7 – Macrofase de construção do modelo computacional



Fonte: Autor

4.3.1 Atividade 2.1 - Selecionar ferramentas de modelagem

Esta atividade visa a definição das ferramentas computacionais a serem utilizadas para a elaboração dos modelos. Como pode ser visto na Figura 4.7, esta atividade se subdivide em duas tarefas, que correspondem à seleção da ferramenta para elaboração do modelo da planta e do controlador, respectivamente.

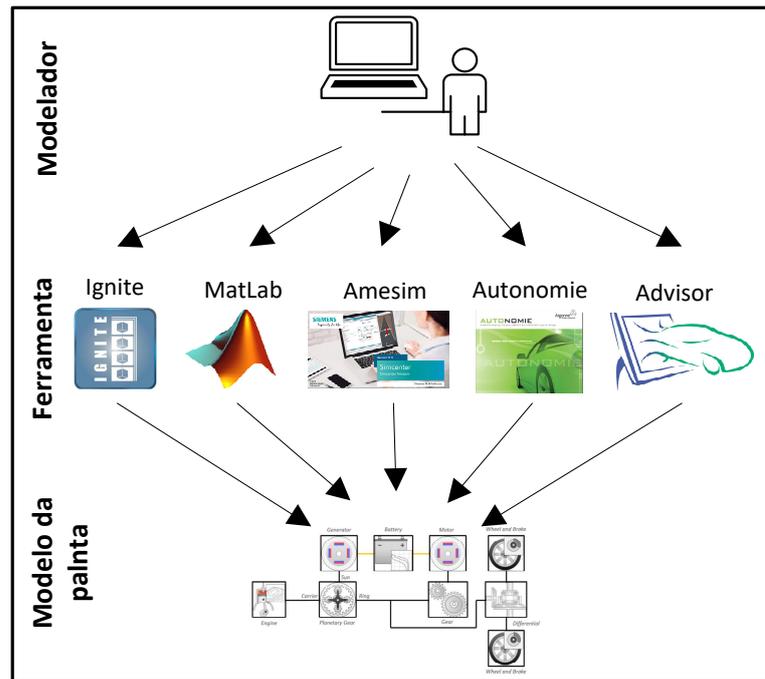
4.3.1.1 Tarefa 2.1.1 - Selecionar ferramenta da planta

A seleção da ferramenta computacional corresponde à escolha da plataforma na qual será construído o modelo. Esta tarefa é norteadada pela decisão tomada na atividade 1.2 (a partir dos requisitos), onde uma escolha entre as abordagens quase-estática ou dinâmica é realizada. Além disso, aqui os requisitos normativos também devem ser consultado, pois problemas legais de licenciamento, ou termos de uso podem inviabilizar a utilização de uma ferramenta.

Como foi visto na Subseção 3.3.1, existem três tipos de ferramentas utilizadas para construção de modelos de simulação. No entanto, para elaboração do modelo de planta, esta sistemática recomenda a utilização de pacotes de simulação com bibliotecas dedicadas a sistemas automotivos, tendo em vista a agilidade que estes simuladores proporcionam ao processo construção dos modelos. Algumas dessas ferramentas são apresentadas no Apêndice A.

Além do tipo de abordagem e das questões normativas, deve-se levar em consideração também outros critérios para selecionar a ferramenta adequada, como: a familiaridade com o *software*, e a capacidade de integração com outras plataformas (co-simulação). Sendo este último preponderante também para a realização da próxima tarefa.

Figura 4.8 – Escolha da ferramenta para elaboração do modelo da planta



Fonte: Autor

4.3.1.2 Tarefa 2.1.2 - Selecionar ferramenta do controlador

Uma vez determinada a técnica de controle (na Atividade 1.2), é possível selecionar a ferramenta para auxiliar a construção do modelo do controlador. E, igualmente ao sugerido na tarefa 2.1.1, é preciso que os requisitos normativos sejam atendidos.

Como o controle é representado por um algoritmo (SALMASI, 2007), deve-se optar por uma forma de implementá-lo, seja por meio de uma linguagem de programação específica, ou utilizando soluções gráficas contidas em *softwares* dedicados (simuladores).

Das plataformas elencadas no Apêndice A, o Matlab é a mais amplamente utilizada para elaboração de algoritmos de controle (GAO; MI; EMADI, 2007). Porém, a maioria das ferramentas (Ricardo Ignite e Sincenter Amesim, por exemplo) possuem blocos que aceitam algoritmos em linguagens de propósito geral como #C e Python. Dessa forma, compiladores específicos dessas linguagens podem servir como ferramenta de construção do controlador.

Dentre as ferramentas disponíveis, recomenda-se optar pela qual o modelador tenha maior afinidade, e que ofereça a melhor manipulação do algoritmo, o que fornece agilidade ao processo de modelagem. Como exigência, a ferramenta escolhida deve permitir integração dos modelos. Então é importante tomar essa decisão juntamente com a tarefa anterior.

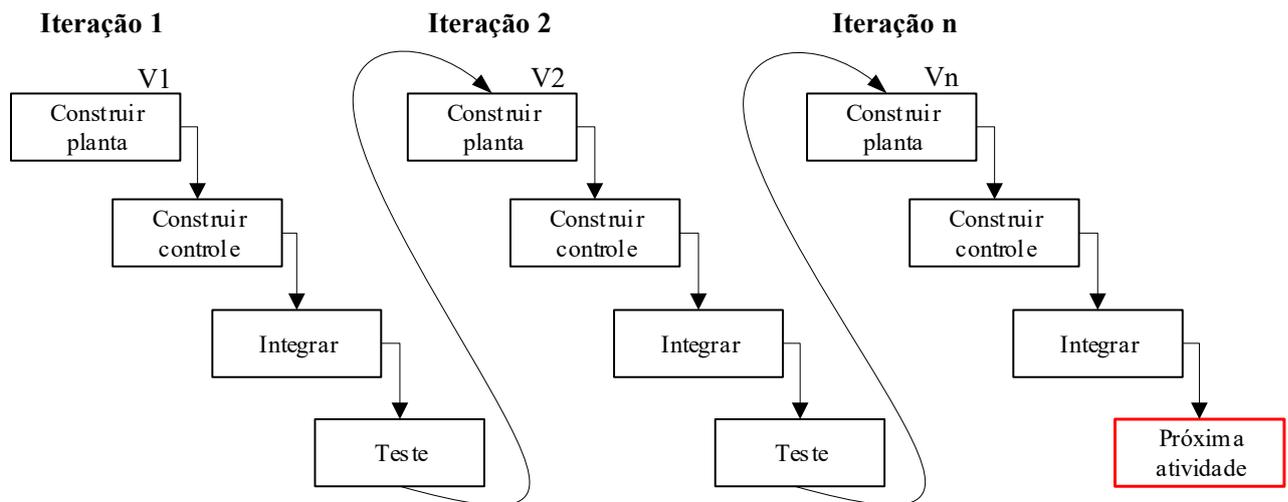
4.3.2 Atividade 2.2 - Elaborar e integrar modelos

O objetivo desta atividade é, a partir da modelagem conceitual, a construção dos modelos computacionais com o auxílio das ferramentas de modelagem. Como pode ser visualizado na Figura 4.7, a atividade 2.2 se decompõe em três tarefas que englobam a construção do modelo da planta e do controlador, bem como a integração dos mesmos.

Acompanhando metodologia para desenvolvimento de *softwares* apresentada por Bezerra (2015), recomenda-se que esta atividade seja realizada de forma incremental e iterativa. Dessa forma, são evitados os erros de construção decorrentes da manipulação vários parâmetros e variáveis ao mesmo tempo.

Assim, como mostra a Figura 4.9, as tarefas 2.2.1 a 2.2.3 são executadas gradativamente, ou seja, o processo se repete por “n” vezes, até que se alcance o nível de detalhamento pretendido à modelagem. Onde, o numero de iterações depende do quão complexo é o sistema.

Figura 4.9 – Método iterativo incremental para elaborar e integrar os modelos



Fonte: Adaptado de Bezerra (2015)

Para fins didáticos a Figura 4.9 fornece uma noção de que, a cada iteração, as tarefas são realizadas em série, ou seja, uma após a outra. No entanto, na prática estas são desempenhadas concomitantemente, pois fazem parte do mesmo processo de construção. Além disso, como será visto a diante, cada iteração é finalizada com um teste de coerência, porém o teste da última versão da modelagem é realizada na próxima macrofase, correspondendo à verificação do modelo finalizado.

4.3.2.1 Tarefa 2.2.1 - Construir modelo da planta

Esta tarefa corresponde à tradução do modelo conceitual da planta em uma versão computacional. Assim, o arranjo de blocos e suas respectivas equações, bem como dados do veículo, são utilizados para construir a planta em ambiente virtual.

O modelo da planta é formado pelos subsistemas mecânico e elétrico, assim como pelos blocos que representam o ambiente de teste (incluindo o condutor).

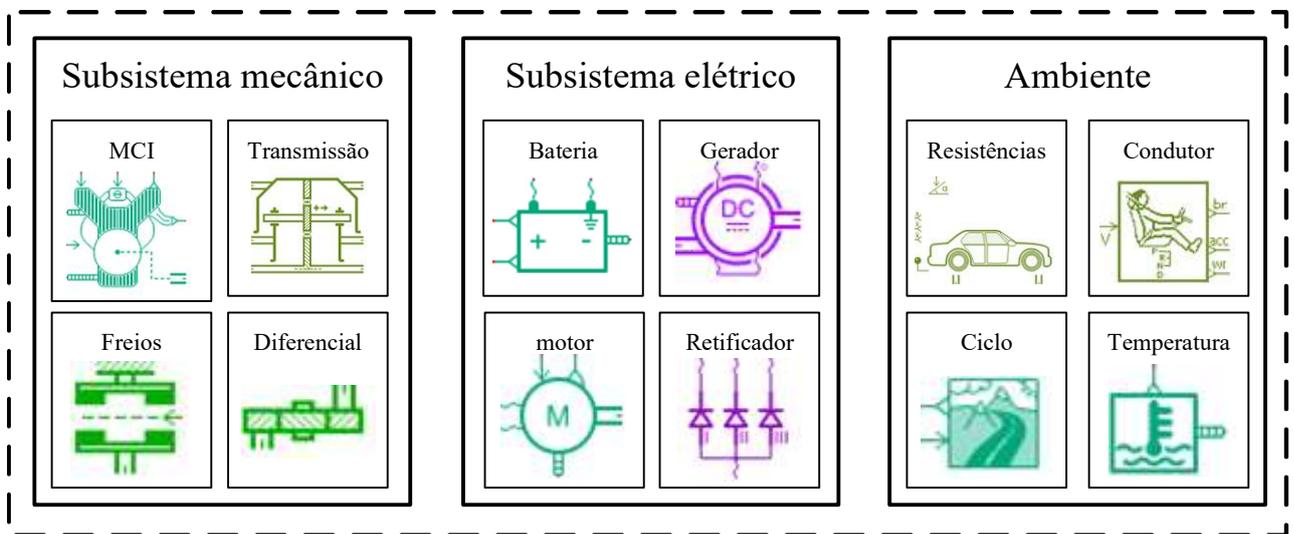
Apesar dos passos para realização desta tarefa dependerem diretamente da ferramenta selecionada, a partir de uma análise das mesmas, é possível concluir que a construção do modelo da planta utilizando simuladores tende a se basear nas seguintes etapas:

- **Construção esquemática:** A partir da manipulação dos blocos contidos nas bibliotecas do *software*, é criado um esboço do modelo, que podem representar desde uma

operação matemática até um componente completo, como os exemplos mostrados na Figura 4.10. Os blocos são interconectados respeitando a causalidade da abordagem de modelagem selecionada, de forma que, ao final, a planta do VEH esteja representada, completamente ou parcialmente, a depender da iteração na qual se encontra o processo.

- **Definição matemática:** Depois de esboçada a planta do VEH, é preciso configurar os blocos, para que seja definido o nível de complexidade das equações que estes representam. Assim, cada bloco é ajustado individualmente, observando o nível de complexidade que define o modelo conceitual. Por exemplo, o bloco do MCI pode ser ajustado para contabilizar apenas a vazão de combustível, ou ainda as emissões.
- **Definição de parâmetros:** Uma vez esboçado e configurado, é preciso alimentar o modelo com os dados do VEH. Nesta etapa, é importante atentar-se para as unidades de medida desses valores, para evitar interpretações erradas dos resultados.
- **Teste:** Por último, ao final de iteração, são realizados testes na versão atual do modelo (ver Figura 4.9), para verificar se o processo de modelagem encontra-se coerente. Nesse momento, não existe comparação com os dados de reposta do veículo real, apenas uma verificação grosseira para se certificar de que o processo está indo bem.

Figura 4.10 – Exemplo de blocos do modelo de planta no Amesim



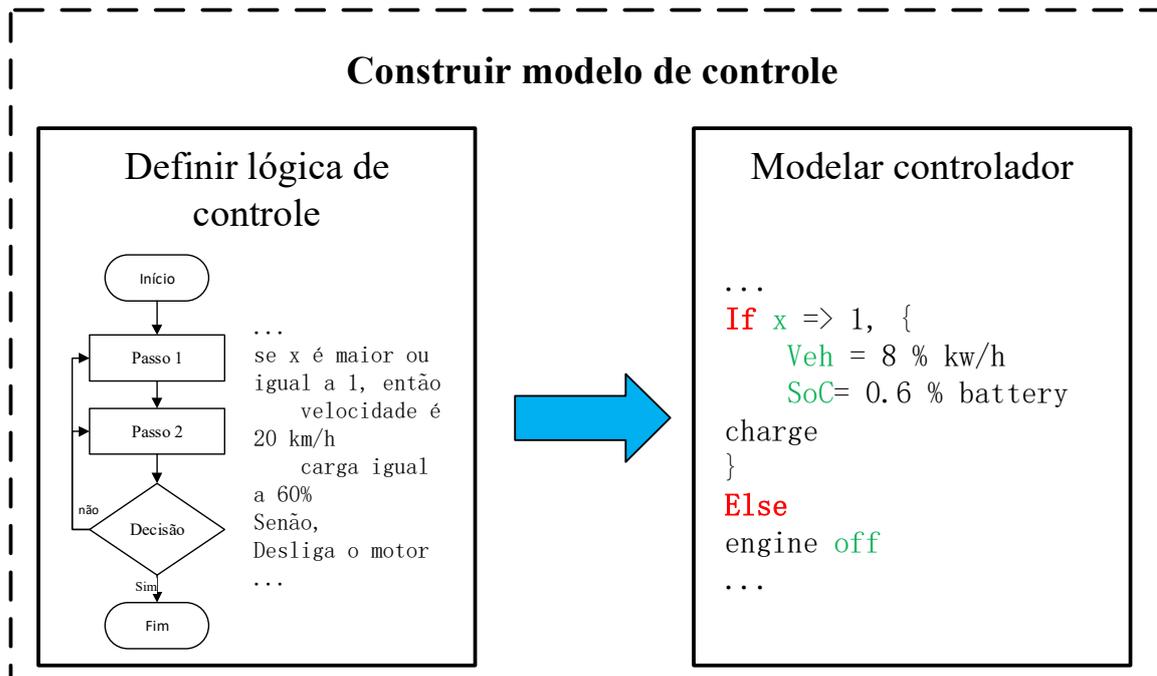
Fonte: Autor

4.3.2.2 Tarefa 2.2.2 - Construir modelo do controlador

A construção do modelo de controle pode ser interpretada como uma tarefa de programação, que consiste em definir a lógica de controle e modelar o controlador (Figura 4.11).

A definição da lógica de controle compreende em determinar a sequência de instruções que conduzirá o funcionamento do VEH. Para isso, é recomendado seguir as reco-

Figura 4.11 – Construção do modelo de controle



Fonte: Autor

mendações básicas para o desenvolvimento de algoritmos, que inclui a elaboração de um fluxograma lógico para organização do processo (SILVA, 1991).

Nesse momento, é interessante a elaboração de um pseudo-código⁴ para uma verificação preliminar da consistência e eficiência do processo, que pode envolver sequências, condições e repetições (*loops*), a depender da técnica de controle utilizada.

Uma vez definida a lógica de controle, deve-se partir para a declaração formal do algoritmo, utilizando a ferramenta selecionada. Nesse momento, para evitar problemas na integração dos modelos de planta e controle, é conveniente que se padronize as unidades e a nomenclatura das variáveis que devem ser compartilhadas entre os dois modelos.

Como explicado anteriormente, a construção do modelo de controle deve acompanhar a construção do modelo da planta. Dessa forma, o algoritmo deve ser construído incrementalmente acompanhando as iterações de desenvolvimento da atividade.

4.3.2.3 Tarefa 2.2.3 - Integrar modelos

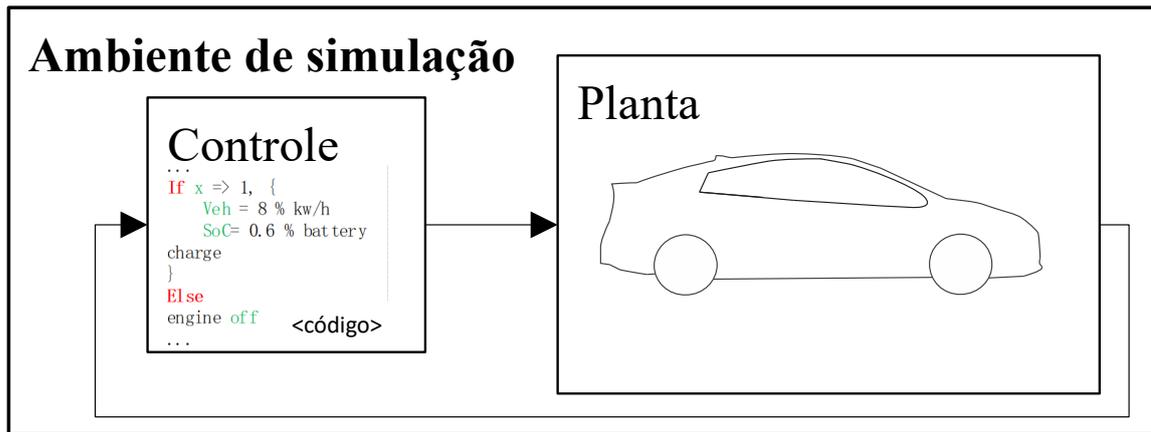
Esta tarefa visa a integração dos dois modelos, que devido a característica incremental da atividade, é realizada a partir da primeira iteração de construção dos modelos de planta e controle.

Dois cenários são possíveis para a realização desta tarefa, a depender se os modelos permitem integração no mesmo ambiente, ou se uma co-simulação entre dois *softwares* se faz necessária.

No primeiro caso, o modelo de controle é adicionado na forma de um subsistema à plataforma na qual foi construída a planta, formando um modelo macro, como mostra a Figura 4.12.

⁴ Descrição genérica de um algoritmo em linguagem informal e de simples entendimento.

Figura 4.12 – Integração dos modelos em ambientes iguais

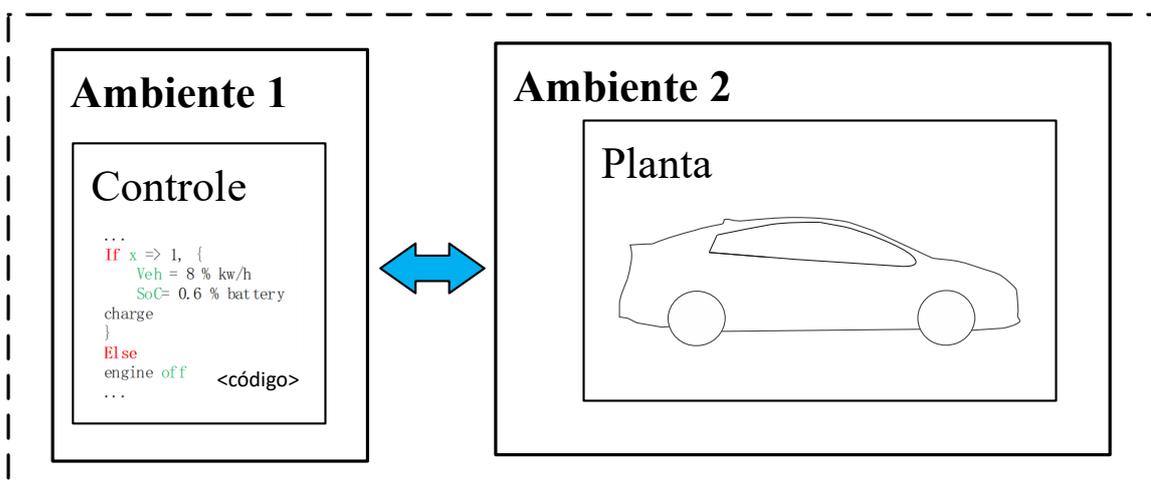


Fonte: Autor

Dependendo da ferramenta utilizada no modelo de planta, a adição do código como um subsistema pode ser realizada de diferentes formas. Entretanto, geralmente os pacotes de simulação possuem em suas bibliotecas blocos específicos para comportar o algoritmo de controle. Dessa forma, o arquivo na extensão específica da linguagem de código utilizada pode ser incluído especificando seu diretório no disco.

No segundo caso, as duas plataformas devem ser configuradas para que seja possível realização da co-simulação. Esta tarefa inclui a criação dos blocos que representarão cada um dos modelos nas respectivas ferramentas, ou seja, deve existir um bloco que represente as entradas e saídas da planta no modelo de controle, e o mesmo deve ocorrer na outra ferramenta. Além disso, o tempo e passo de simulação precisa ser o mesmo em ambos os ambientes.

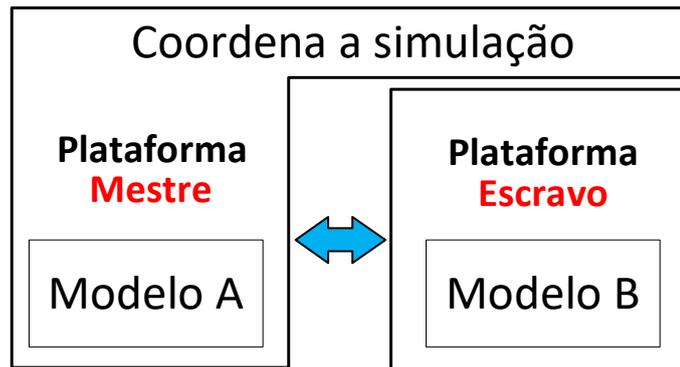
Figura 4.13 – Integração por meio de co-simulação



Fonte: Autor

Apesar de cada ferramenta ser responsável por resolver seu respectivo modelo, em um processo de co-simulação geralmente um dos *softwares*, chamado de mestre, é responsável por coordenar a simulação geral, enquanto o outro, denominado escravo, simula um sub-problema (BASTIAN et al., 2011), como pode ser visualizado na Figura 4.14.

Figura 4.14 – Co-simulação mestre-escravo



Fonte: Autor

Para a co-simulação, recomenda-se escolher para coordenar o processo a ferramenta na qual os dados referentes à análise pretendida estejam mais fáceis de manipular e visualizar. Fatores como interface amigável e facilidade para plotar gráficos podem influenciar esta escolha, que é feita durante a configuração dos respectivos ambientes.

Como saída desta atividade, tem-se os modelos de planta e controle integrados, o que corresponde ao modelo computacional concluído.

4.4 MACROFASE 3 - VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO

A macrofase de verificação e validação, como foi mostrado no Capítulo 2, é a responsável por garantir que os modelos estejam, respectivamente, em conformidade com as especificações (ou funcionalidades) e requisitos da modelagem (Figura 2.9), que são estabelecidos na etapa de definição do problema.

Como pode ser observado na Figura 4.15, esta macrofase se subdivide em três atividades: **dividir dados em grupos**, **verificar e ajustar modelo** e **validar e calibrar modelo**.

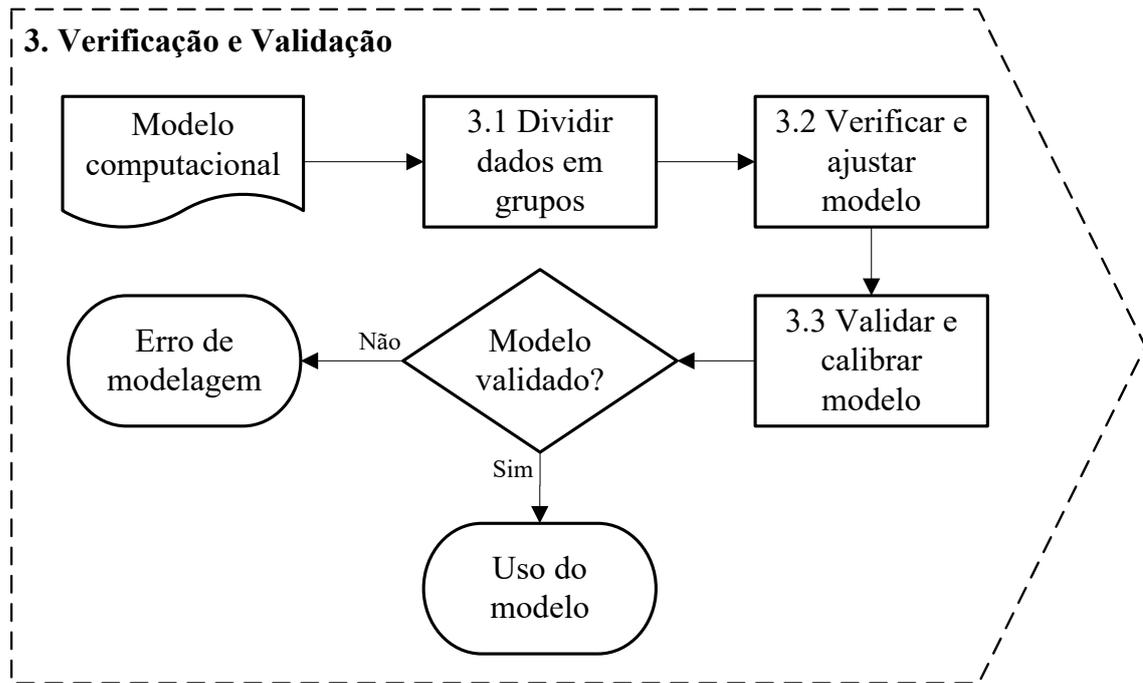
4.4.1 Atividade 3.1 - Dividir dados em grupos

Esta atividade consiste em dividir os dados de resposta (obtidos na atividade 1.3) em dois grupos distintos, que, como pode ser observado na Figura 4.16, serão comparados às saídas da modelagem em momentos diferentes: no processo de verificação (primeiro grupo); e na validação do modelo (segundo grupo).

Tendo em vista que a semelhança destes dados com as saídas do modelo atestam a sua usabilidade, é de grande importância que os grupos não compartilhem os mesmos dados, pois os processos verificação e validação não podem ter correlação um com o outro (PACE, 2003).

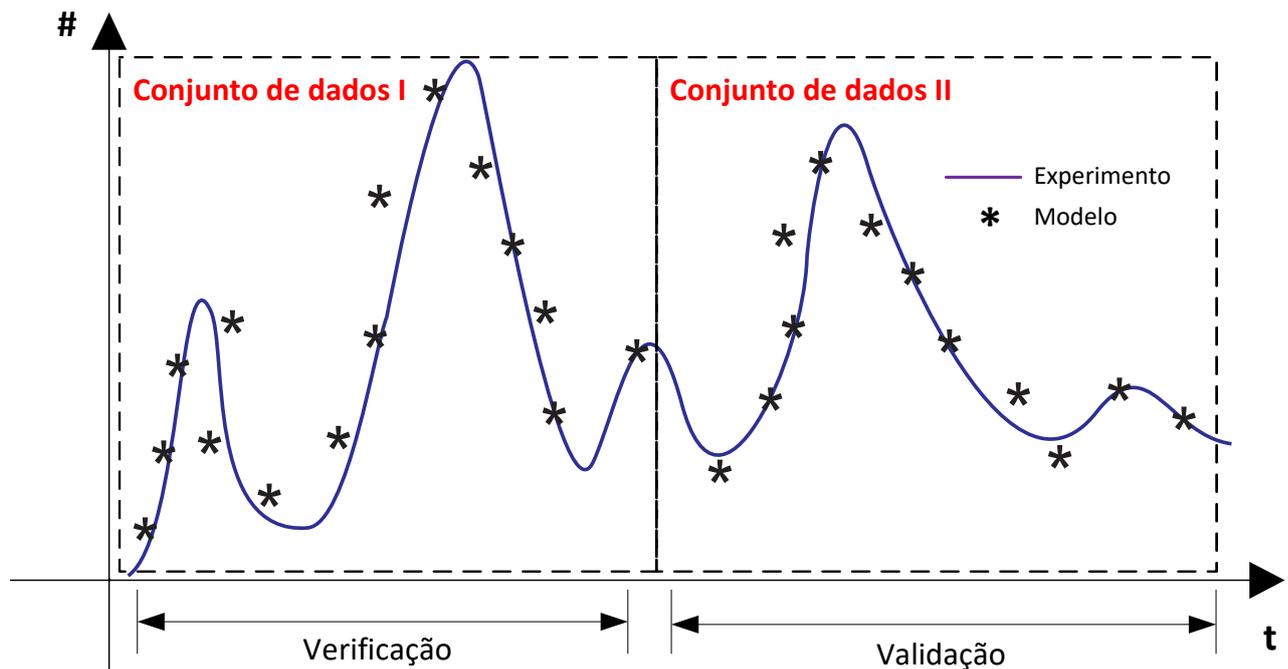
Os dados de teste separados em dois grupos distintos correspondem à saída desta atividade.

Figura 4.15 – Macrofase de verificação e validação



Fonte: Autor

Figura 4.16 – Divisão dos dados de teste em grupos



Fonte: Autor

4.4.2 Atividade 3.2 - Verificar modelo

Esta atividade tem como objetivo garantir que os modelos de planta e controle estejam funcionando adequadamente, ou seja, sem erros construtivos na sua estrutura lógica. Para isso, o modelo deve ser submetido a repetidas simulações e depurações.

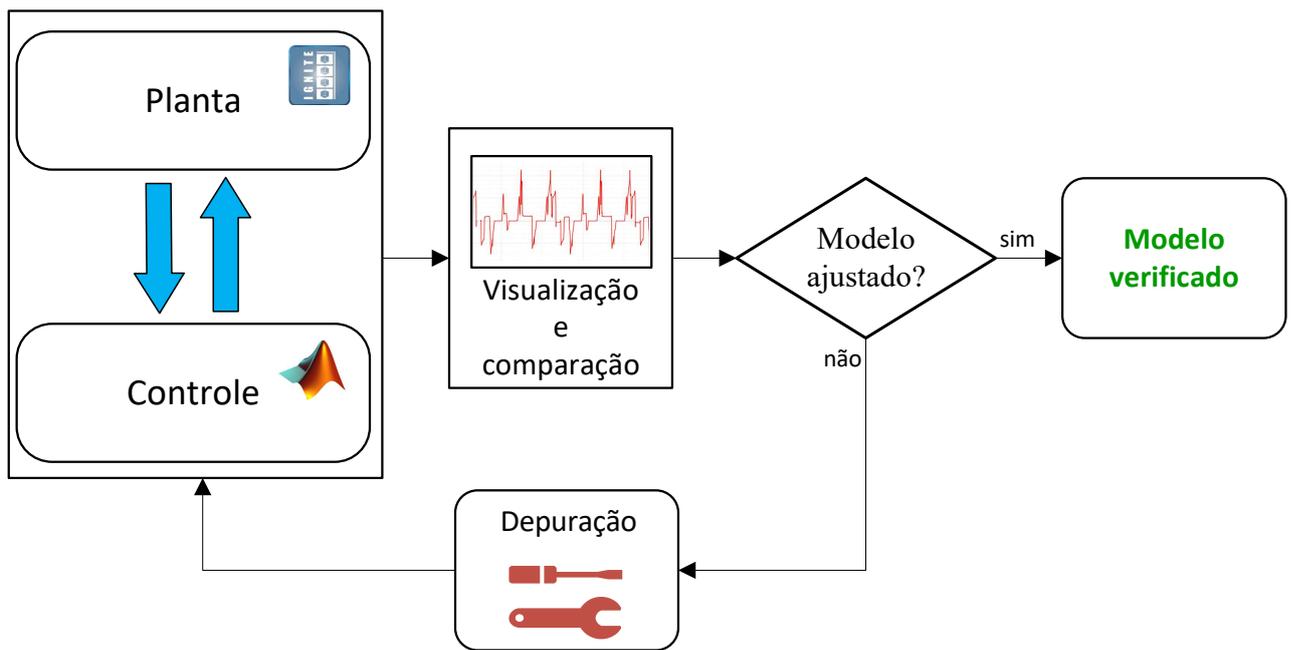
Apesar de outras verificações terem sido efetuadas até aqui, esta atividade se difere das demais pelo fato de se dedicar exclusivamente à depuração estruturada do modelo

computacional como um todo, utilizando um conjunto de dados de teste específico.

Segundo Balci (1997), para execução da verificação é recomendado executar simulações, observando cada rotina computacional e os gráficos gerados.

À medida que o processo de verificação evolui, os erros encontrados são corrigidos. Em seguida, a simulação é reiniciada, analisada, e se necessário, novamente o modelo é corrigido. Este ciclo (*model in the loop*) é mantido até que a modelagem esteja totalmente ajustada, não havendo mais erros de construção no modelo, quando este é considerado verificado. O processo de verificação é mostrado na Figura 4.17.

Figura 4.17 – Processo de verificação do modelo



Fonte: Autor

Nota-se que, no processo de verificação, os dados de resposta são usados como um ferramenta para que se tenha uma noção de coerência do modelo. Assim, não é necessário que as saídas da modelagem tenham a exata semelhança com o comportamento do sistema real.

Ao final desta atividade, tem-se o modelo computacional devidamente ajustado, ou seja, sem erros de construção, e de acordo com todas as funcionalidades contempladas.

4.4.3 Atividade 3.2 - Validar modelo

A validação do modelo é a última atividade da sistemática, e tem como objetivo garantir que a modelagem alcance os objetivos estabelecidos na etapa de definição do problema. Para isso, é utilizado o segundo conjunto de dados de teste como ferramenta de comparação.

Semelhante à verificação, o modelo é submetido a sucessivas simulações e comparações. No entanto, as discrepâncias com o sistema real são agora reduzidas por meio da calibração do modelo, que corresponde ao refinamento iterativo dos parâmetros, até que seja obtida uma correspondência aceitável entre o sistema e a modelagem.

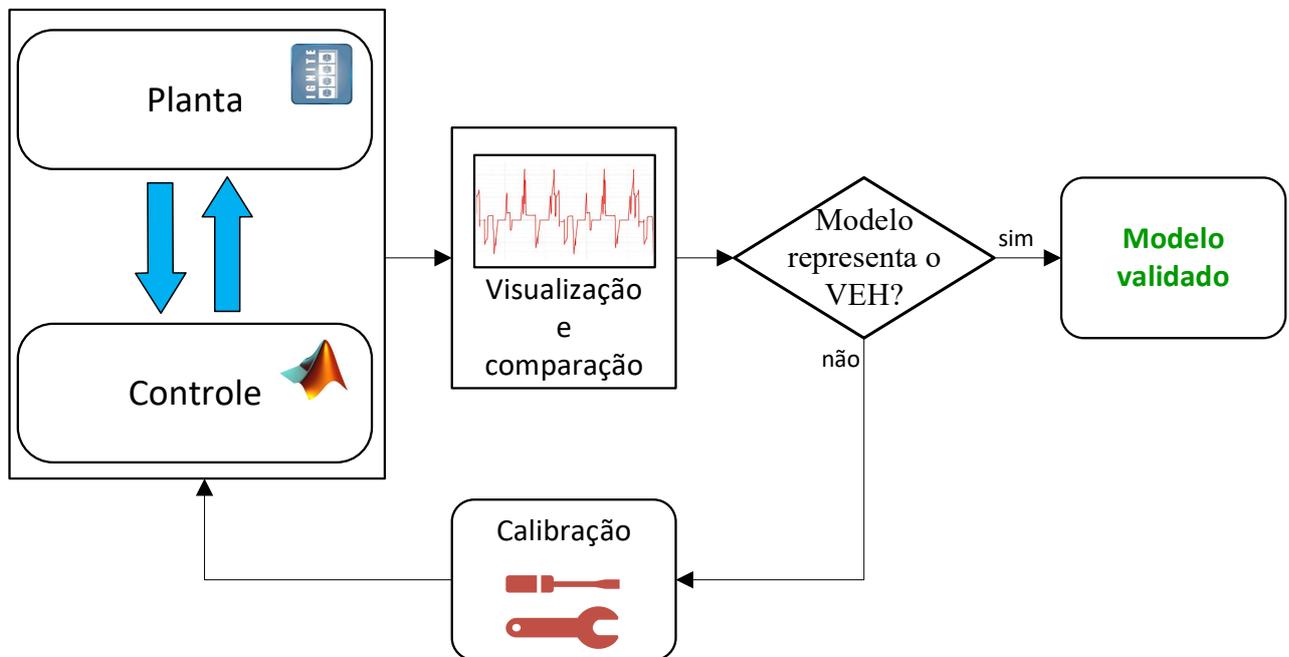
É importante ressaltar que, devido a grande complexidade relacionada aos VEHS, chegar em uma correspondência próxima da exata exige muito tempo de análise e estudos. Dessa forma, é preciso ponderar e definir uma correspondência factível, ou seja, que esteja de acordo com os recursos de tempo e custo da modelagem.

O modelo é considerado validado quando a diferença entre conjunto de dados de teste e as saídas do modelo estiverem abaixo de um valor pré-estabelecido. Este valor, denominado erro ou desvio, e pode ser verificado desde por meio de comparações diretas, até com auxílio de técnicas de estatística (BALCI, 1997), como erro médio quadrático (RMSE), ou Nash-Sutcliffe (R^2), por exemplo.

Esta característica é um dos motivos pelo qual o método de verificação e validação baseado na comparação de dados é classificado como **estatístico** (MANNER, 1995). Outras técnicas utilizadas para este fim podem ser encontradas em Balci (1998) e Menner (1995).

O processo de validação pode ser visualizado na Figura 4.18.

Figura 4.18 – Processo de validação do modelo



Fonte: Autor

Uma vez validado, os resultados de simulações futuras podem ser acreditados, desde que respeitadas as restrições e simplificações estabelecidas na sua formulação (condições de uso).

Caso não seja possível a validação do modelo, é provável que algum erro tenha sido cometido em algumas das atividades anteriores. Dessa forma, recomenda-se que sejam refeitas as atividades da sistemática, com o intuito de procurar inconsistências no processo de modelagem.

Um dos motivos para uma modelagem mal sucedida é, por vezes, a complexidade excessiva dos modelos (BALCI, 1998), dessa forma, uma saída para este problema pode ser aumentar o grau de abstração do modelo (simplificar) tanto quanto os requisitos permitirem.

4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo explicitou os passos para executar a modelagem de VEHs para o desenvolvimento de estratégias de operação em VEHs. A sistemática proposta partiu do conteúdo apresentado nos dois capítulos anteriores, e se subdividiu nas macrofases de Concepção, Construção do modelo computacional, e Verificação e validação.

A etapa inicial se destina a construção do modelo conceitual do veículo, e portanto ao entendimento do problema abordado, e para isso são proposta três atividades que respectivamente têm as seguintes funções: definir o problema e determinar os critérios que a modelagem deve atender; definir o fluxo energético no trem de força; e obter os dados de teste que serão utilizados para depuração e calibração do modelo, além de parâmetros adicionais do veículo. O sucesso desta última atividade define se é possível passar para próxima macrofase, ou se é preciso uma reformulação do problema que torne o modelo adequado aos dados disponíveis.

A segunda macrofase se destina à conversão do modelo conceitual em uma versão computacional. Para isso, são sugeridas duas atividades que consistem na seleção de uma ferramenta computacional, e na elaboração e integração dos modelos de planta e controle. O primeiro passo corresponde às seleção da ferramenta computacional para o modelo de planta, e para o modelo de controle. A segunda atividade engloba três tarefas equivalentes à construção dos dois modelos, bem como a integração dos mesmos. Estas são realizadas em paralelo e de forma iterativa, dando origem várias versões do modelo.

A última etapa corresponde ao processo de verificação e validação dos modelos e tem como entrada o modelo computacional construído. Para a realização desta etapa, são definidas três atividades. A primeira correspondem à subdivisão dos dados de resposta do veículo em dois grupos, onde o primeiro grupo é utilizado para verificação e depuração dos modelos (segunda atividade) e o segundo é utilizado na validação e calibração (terceira atividade).

Por fim, depois de verificado e validado, o modelo pode ser utilizado, desde que respeitadas as restrições e simplificações estabelecidas.

Uma vez estabelecidos os passos que compõem a sistemática, no Capítulo 5 será apresentada uma aplicação da mesma, por meio de um estudo de caso no qual será desenvolvida a modelagem de um VEH com as características do Toyota Prius.

5 ESTUDO DE CASO

Com o objetivo de compreender e avaliar a procedimento sistemático proposto, este capítulo traz um estudo de caso que tem como foco o processo de modelagem de um VEH baseado na terceira geração do Toyota Prius. Este modelo foi escolhido por conta dos ótimos resultados obtidos em relação à economia de combustível. Além disso, preliminarmente, é apresentado uma visão geral do veículo em estudo, e algumas particularidades do seu sistema de controle.

5.1 TOYOTA PRIUS

5.1.1 Descrição geral

Como foi relatado no Capítulo 2, no início da década de 1990 a tecnologia híbrida passou a ser o foco dos setores de pesquisa e desenvolvimento das maiores fabricantes de veículos automotores. Isto resultou em uma relativamente grande quantidade de protótipos testados até o final do Século XX. Dentre estes, o Toyota Prius se destacou de forma expressiva, por ter sido o primeiro VEH de passageiros a alcançar um nível de economia satisfatório que justificasse os investimentos realizados. Como consequência, o Prius se tornou o primeiro VEH produzido em massa no mundo. E, desde de o lançamento em 1997 no Japão, o seu projeto original não sofreu mudanças significativas, passando por alguns refinamentos que otimizaram a tecnologia utilizada. Hoje, o Prius se encontra na quarta geração.

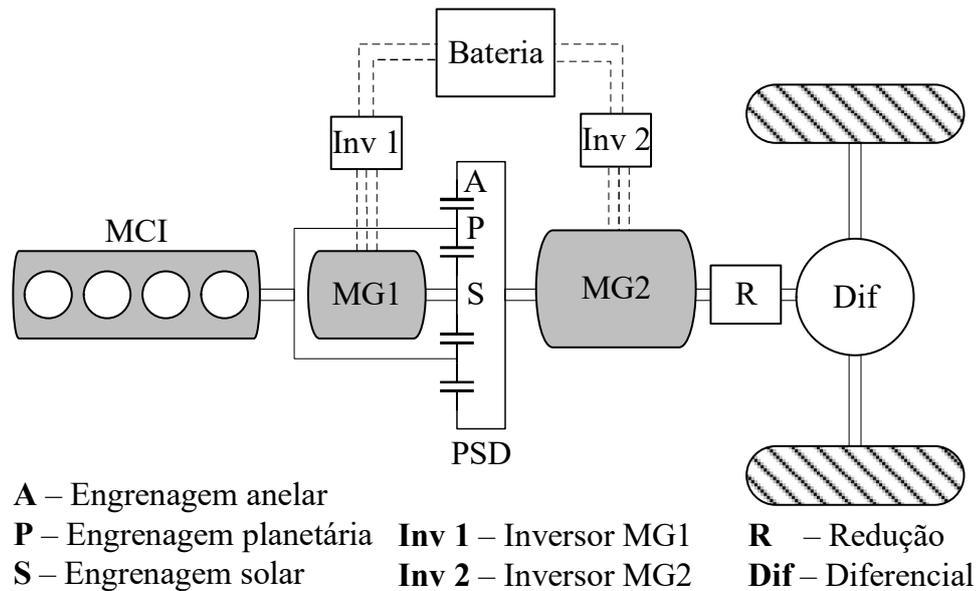
Os bons resultados obtidos pelo Prius são em grande parte atribuídos a forma inovadora com a qual é realizada a transmissão de potência neste veículo (ZENG; WANG, 2018). Tal sistema corresponde a um conjunto de tecnologias desenvolvido pela Toyota Motor chamado de THS¹ (do inglês *Toyota Hybrid System*), um sistema do tipo *drive-by-wire*, onde os comandos de controle enviados pelo condutor não têm conexão mecânica direta com os atuadores, sendo esta comunicação realizada por meio de comandos elétricos, e intermediada por um controle supervisor.

A Figura 5.1 mostra uma representação esquemática do THS. Este é um sistema eletromecânico que consiste em uma arquitetura do tipo complexa (ver Figura 2.2d), caracterizada pela ausência de marchas, ao invés disso, utiliza um dispositivo de divisão de energia chamado *Power Split Device* (PSD), que corresponde a um conjunto planetário (ver apêndice B), onde um MCI e um motor-gerador (MG1) são acoplados às engrenagens satélite (braço planetário) e solar, respectivamente, e na saída do PSD (engrenagem anelar) é conectado um motor-gerador mais potente (MG2).

O MG2 tem como principal função fornecer potência diretamente às rodas, e (em desacelerações) recuperar parte da energia que seria dissipada nos freios (modo regenerativo). Já o MG1 tem a função de ligar o MCI (motor de arranque), bem como possibilitar a

¹ O termo THS foi utilizado na primeira e segunda geração do Prius, mas, posteriormente, a Toyota passou a denominá-lo HSD (do inglês *Hybrid Synergy Drive*), se antecipando à utilização deste sistema fora da marca (TOYOTA, 2015)

Figura 5.1 – THS utilizado na primeira geração do Toyota Prius



Fonte: Adaptado de Ehsani et al. (2018)

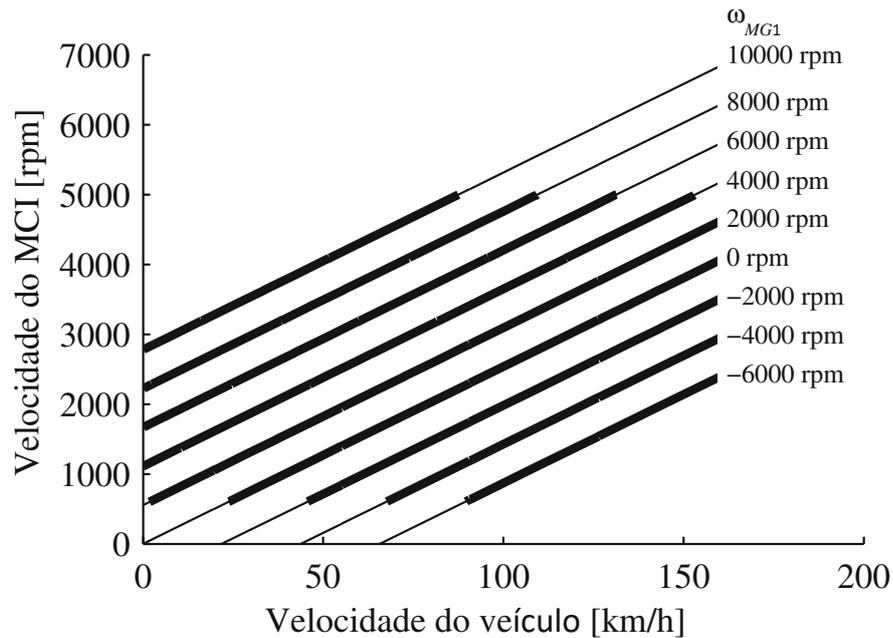
divisão de energia no PSD, funcionando ora como gerador (alimentando bateria ou MG2), e ora como motor elétrico. Já o MCI é a fonte primária de potência do sistema, com a missão de propelir as rodas, e (por intermédio do MG1) carregar a bateria. Esta última, funciona como um reservatório energia do sistema, e fornece eletricidade às duas máquinas elétricas, com o auxílio de inversores de potência.

No sistema THS, a rotação do MCI pode assumir qualquer valor (dentro da sua faixa de operação admissível), independentemente da velocidade do veículo, apenas variando a rotação do MG1, que funciona como uma transmissão continuamente variável controlada eletronicamente (E-CVT, do inglês *Electrically Continuously Variable Transmission*) (ver Apêndice B). A Figura 5.2 mostra como as velocidades do MCI e veículo variam para diferentes rotações do MG1, com os valores admissíveis em negrito.

Assim, o THS funciona movimentando a energia entre as duas máquinas elétricas e a bateria, com o objetivo de equilibrar a carga no MCI. Desse modo, este último pode ser dimensionado para cargas médias, pois os picos de carga podem ser supridos com o auxílio da eletricidade, o que permite a diminuição (*downsizing*) do MCI, e conseqüentemente uma melhora em termos de aproveitamento de energia. Pois, segundo Heywood (1988), a eficiência de um MCI aumenta à medida que o seu tamanho diminui.

Além disso, durante a operação do veículo o controle supervisorório pode optar por uma faixa de operação que priorize potência, economia ou baixas emissões, com a bateria fornecendo ou absorvendo energia para equilibrar a demanda de potência exigida pelo condutor. Dessa forma, a energia proveniente do MCI pode ser aproveitada para fornecer torque adicional nas rodas (sob velocidade constante), velocidade extra (sob torque constante) ou para gerar eletricidade (acionando o MG1) (TOYOTA MOTOR, 2009).

Figura 5.2 – Funcionamento da E-CVT para diferentes velocidades do MCI e do veículo



Fonte: Adaptado de Onori, Serrao e Rizzoni (2016)

5.1.2 Controle supervisor

O controlador supervisor utilizado neste veículo é do tipo heurístico baseado em regras, e, de acordo com Ehsani et al. (2018), segue a seguinte estratégia de funcionamento:

1. No início de um determinado trajeto o MG2 fornece a força motriz primária para as rodas. O motor começa imediatamente se o SoC da bateria estiver baixo. Quando a velocidade ultrapassar os 25km/h o MCI é iniciado.
2. Em condições normais de direção a potência fornecida pelo MCI é dividida em dois caminhos: uma parte aciona as rodas juntamente com o MG2, e outra parte aciona o MG1 para produzir eletricidade. Nesse momento o controlador seleciona a melhor taxa de distribuição de energia para a máxima eficiência do MCI.
3. Durante acelerações bruscas (em ultrapassagens, por exemplo) a energia gerada pelo MG1 (que aciona o MG2) é complementada pela energia da bateria. Dessa forma, o torque do motor combinado com o MG2 fornece a potência necessária para acelerar o veículo.
4. Em condições de desaceleração ou frenagem o MG2 é acionado pelas rodas do veículo. Assim, este atuador funciona como um gerador permitindo a recuperação de energia regenerativa, que por sua vez é armazenada na bateria.

A utilização do PSD como um E-CVT possibilita ao Prius um funcionamento versátil sob diferentes modos de operação, que são selecionados pelo controlador mediante as condições de condução. O funcionamento de cada atuador de acordo os diferentes modos de operação são detalhados no Apêndice C.

5.1.3 Prius THS III

A terceira geração do Prius (THS III) foi lançada em 2009, e foi resultado de um minucioso refinamento da tecnologia utilizada nas duas gerações anteriores. As principais mudanças foram em relação à potência dos atuadores, e ao adição de mais um conjunto planetário ao trem de força.

A tabela 5.1 traz uma comparação entre a segunda e terceira geração do Prius. O MCI utilizado em todas as versões deste veículo é baseado no ciclo Atkinson². Porém, no THS III o MCI possui um volume útil de 1,8 litros, contra 1,5 litros na versão anterior, resultando em um ganho considerável de potência. Além disso, as máquinas elétricas, que em todas as versões são do tipo imã permanente, possuem especificações diferentes em ambas as versões, bem como a bateria, como também mostra a tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Comparação entre a segunda e terceira geração do Toyota Prius

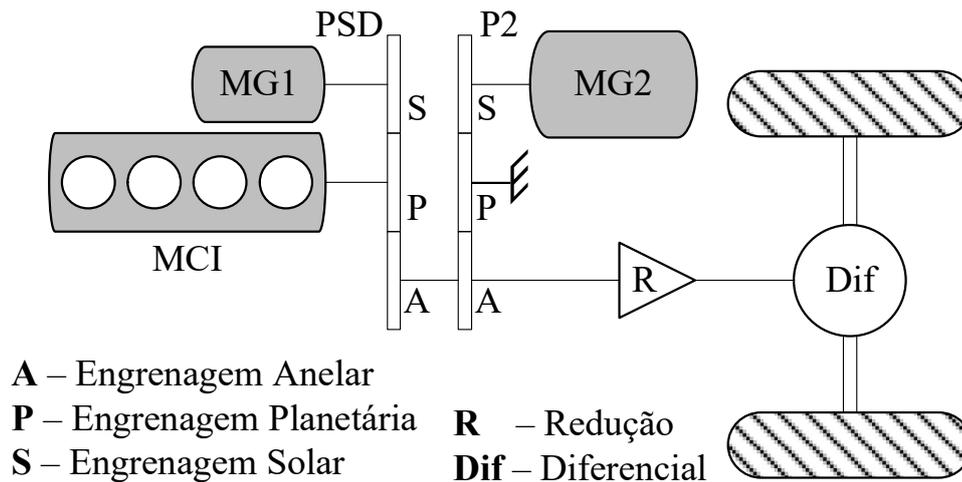
Elemento	Atributo	THS II	THS III
MCI	Tipo	4 cilindros, 16 válvulas	DOHC, VVTi (Atkinson)
	Volume	1,5 l	1,8 l
	Torque máx.	111 Nm @ 4.200 rpm	142 Nm @ 4.000 rpm
	Potência máx.	57 kW @ 5.000 rpm	73 kW @ 5.200 rpm
MG1	Tensão	200-500 Vca	200-650 Vca
	Torque max.	20 Nm	30 Nm
	Potência máx.	33 kW	42 kW
	Velocidade máx.	10.000 rpm	10.000 rpm
MG2	Tensão	200-500 Vca	200-650 Vca
	Torque máx.	400 Nm	207 Nm
	Potência máx.	50 kW	60 kW
	velocidade máx.	6.000 rpm	13.500 rpm
Bateria	Tipo	Ni-MH	Ni-MH
	Potência	20 kW	27 kW
	Capacidade	6,5 Ah	6,5 Ah
Transmissão	Redução no PSD	2,6	2,6
	Redução final	4,113	3,27

Fonte: Adaptado de Toyota Motor (2009) e Rask et al. (2010)

Já a mudança referente a configuração da planetária pode ser observada na Figura 5.3, onde o MG2 não mais se conecta diretamente à engrenagem anelar do PSD, e sim à engrenagem solar de um segundo conjunto planetário. Este, por sua vez, tem o braço planetário fixo ao chassi do veículo, e a anelar conectada diretamente à engrenagem anelar do PSD. Dessa forma, o segundo conjunto funciona como uma redução fixa entre o MCI e o MG2, resultando em um ganho de torque compensando as mudanças de projeto realizadas no MG2. O anexo A traz as especificações completas referentes ao THS III.

² MCI caracterizado por utilizar tempo de válvula variável³ (VVT) para obter uma expansão mais longa do que a compressão. Mais detalhes sobre esse MCI podem ser encontrados em Zhao (2017).

Figura 5.3 – Configuração do Trem de força no THS III



Fonte: Autor

5.2 APLICAÇÃO DA SISTEMÁTICA PROPOSTA

A aplicação da sistemática é realizada seguindo a sequência de atividades apresentada no Capítulo 4. O processo é descrito a seguir.

5.2.1 Macrofase 1 - Concepção

A sistemática inicia-se a partir da declaração do objetivo geral da modelagem:

“Modelagem de um VEH baseado no Toyota Prius THS-III para predição do consumo, e do desempenho dinâmico longitudinal, a partir de um ciclo de condução padronizado.”

5.2.1.1 Atividade 1.1 - Definir problema

Após definido o objetivo geral, inicia-se a análise dos requisitos de modelagem para definição do problema.

Os requisitos normativos são apresentados abaixo:

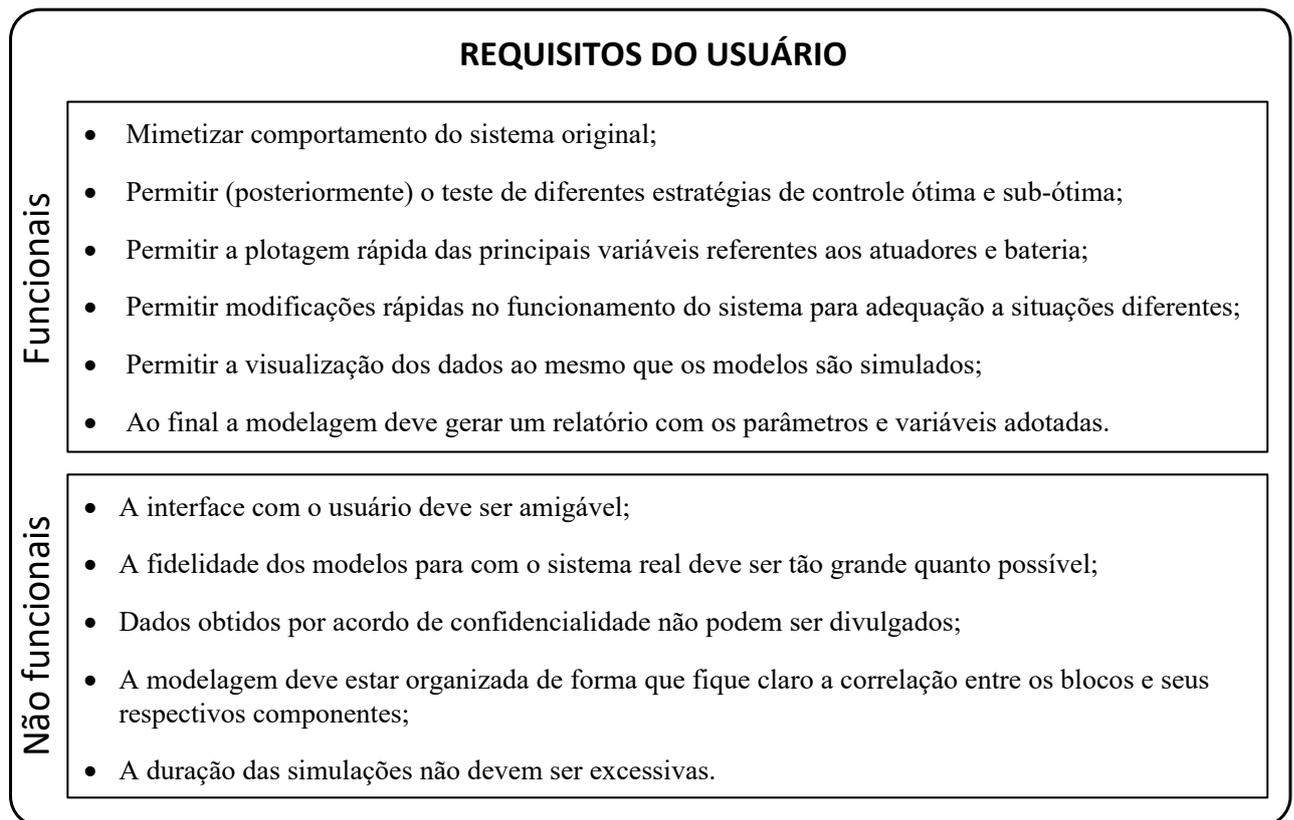
- O tempo de desenvolvimento não pode ultrapassar dois meses;
- As ferramentas utilizadas devem estar dentre as já adquiridas pela UFSC;
- O uso da modelagem deve ser unicamente para fins acadêmicos.

Os requisitos funcionais e não funcionais foram levantados levando em consideração que o modelador é o único usuário da modelagem. Esses podem ser visualizados na Figura 5.4.

Os requisitos funcionais foram devidamente ordenados utilizando o diagrama de Mudge, sendo este processo apresentado no Apêndice D. Estes requisitos, juntamente com os demais dão origem à *folha de requisitos*.

A Figura 5.5 traz os requisitos funcionais ordenados, bem como as respectivas funções geradas a partir dos mesmos. Com base na análise, os requisitos 5 e 6 foram considerados como desejáveis, portanto a implementação das funções referentes aos mesmos

Figura 5.4 – Requisitos funcionais e não funcionais da modelagem



Fonte: Autor

será condicionada aos critérios de tempo e custo. Os demais requisitos são classificados como obrigatórios e devem ser atendidos.

5.2.1.2 Atividade 1.2 - Identificação das entradas, saídas e restrições

A definição do fluxo energético no trem de força iniciou-se a partir da obtenção das informações do VEH, e do ambiente de teste.

Como foi exposto e justificado anteriormente, o veículo utilizado neste estudo de caso corresponde à terceira geração do Toyota Prius (THS III), cujos dados preliminares podem ser encontrados na Seção 5.1 deste capítulo, bem como no Anexo A, que traz as especificações técnicas do veículo fornecidas pelo fabricante.

As condições do ambiente no qual o veículo deve ser testado corresponde à escolha do ciclo de condução, e das características ambientais do local de teste. Para este estudo, a norma ABNT NBR 6601 foi utilizada. Esta, estabelece um método para a medição do consumo de combustível em veículos, onde o ciclo de condução utilizado é baseado no FTP-75.

O ciclo de teste em questão pode ser visualizado na Figura 5.6, onde: a primeira fase inclui a partida com o MCI frio com duração de 505 s e percurso de 5,7 km; a segunda fase é conhecida como período de estabilidade, com duração de 867 s e percurso de 6,2 km; depois acontece um intervalo de 10 min com o veículo parado (MCI desligado); e a terceira fase é uma partida a quente similar à primeira fase. Neste trabalho, apenas as duas

Figura 5.5 – Requisitos funcionais ordenados e funcionalidades da modelagem

Requisitos	<ol style="list-style-type: none"> 1 - Mimeticar comportamento do sistema original; 2 - Permitir (posteriormente) o teste de diferentes estratégias de controle ótima e sub-ótima; 3 - Ao final a modelagem deve gerar um relatório com os parâmetros e variáveis adotadas; 4 - Permitir a plotagem rápida das principais variáveis referentes aos atuadores e bateria; 5 - Permitir modificações rápidas no funcionamento do sistema para adequação a situações diferentes; 6 - Permitir a visualização dos dados ao mesmo que os modelos são simulados;
Funcionalidades	<ol style="list-style-type: none"> 1 - Usar controle heurístico baseado em regras (máquina de estados finitos); <ul style="list-style-type: none"> - Usar modelo de atuadores mapeados; 2 - Separar modelos de planta e controle, e integrá-los por meio de co-simulação; 3 - Utilizar ferramenta com função de gerar relatório; 4 - Adicionar funções de plotagem para os atuadores e bateria; 5 - Utilizar blocos parametrizados; <ul style="list-style-type: none"> - Usar bloco específico para representar o ciclo de condução com informações dos principais ciclos; 6 - Usar ferramenta que permita visualização simultânea dos gráficos.

Fonte: Autor

primeiras fases foram consideradas.

Um resumo referente às informações das fases utilizadas do ciclo, bem como dos demais dados referentes ao ambiente de teste do veículo são apresentadas na Tabela 5.2.

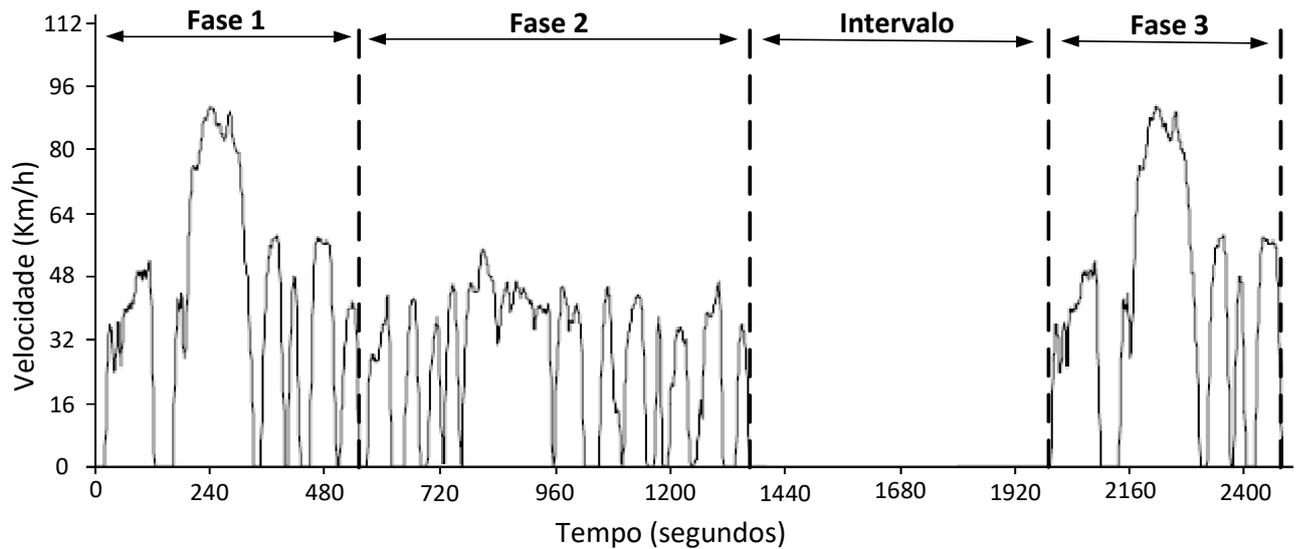
Tabela 5.2 – Dados referentes ao ambiente e ciclo

Fonte	Atributo	Valor
Ambiente	Temperatura	300 K
	Pressão	101325 Pa
	Inclinação	sem influência
	Vel. vento	sem influência
Ciclo NBR 6601	Vel. máxima	25,35 m/s
	Vel. média	11,71 m/s
	Distância total	11900 m
	Tempo total	1372 s

Fonte: Autor

Nesta etapa, são definidas as interfaces referentes à operação de cada componente

Figura 5.6 – Ciclo de condução urbano



Fonte: Adaptado de ABNT NBR 6601 (2012)

do trem de força. E, como o principal objetivo elencado é a representação do comportamento original do VEH em estudo, foi selecionada uma abordagem *dinâmica* para modelagem dos componentes. Dessa forma, pretende-se atender ao requisito qualitativo de fidelidade com o sistema real, por meio do uso da causalidade física nos modelos.

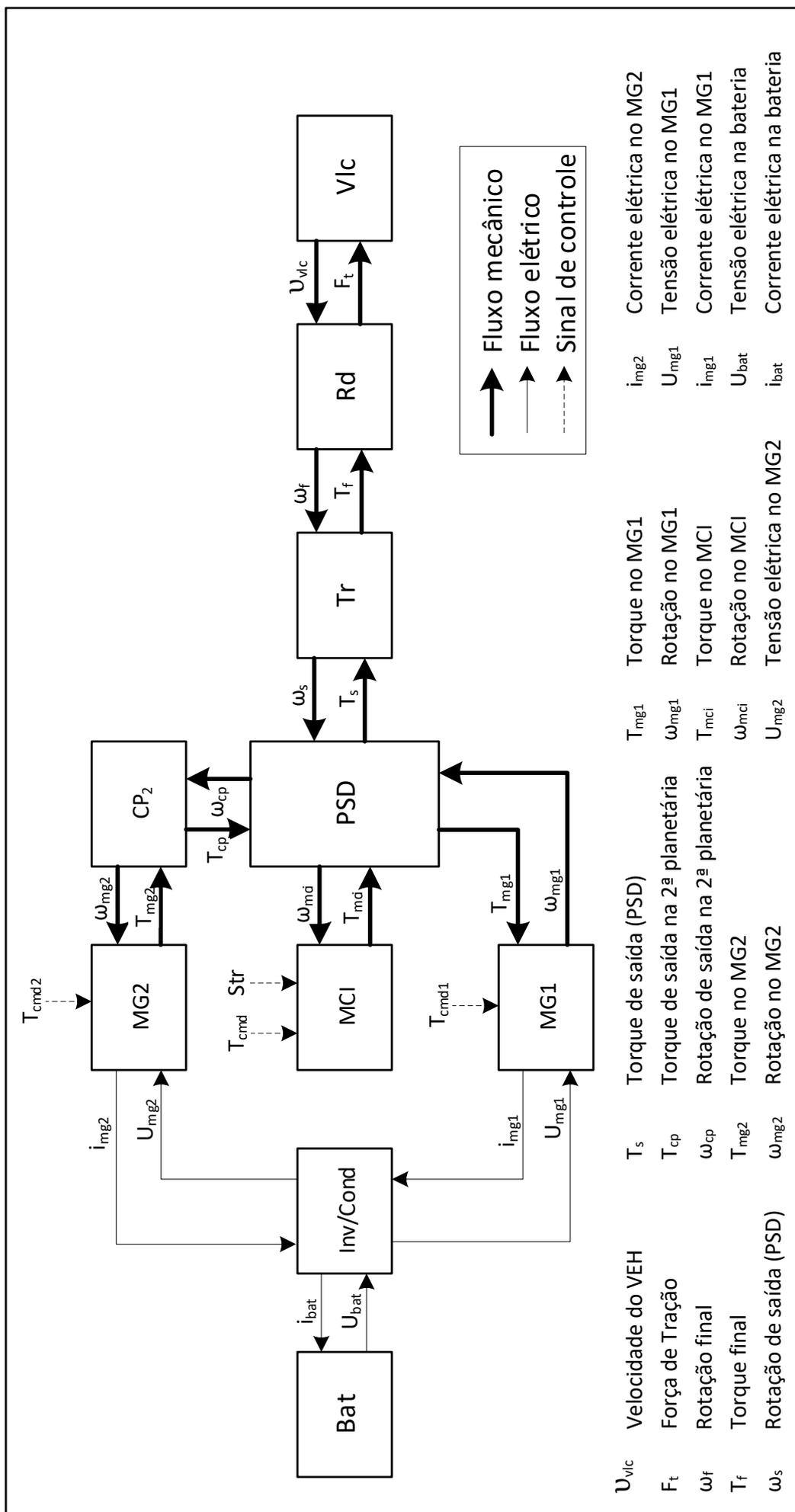
Para isso, as equações básicas da dinâmica longitudinal (contidas no Capítulo 3) juntamente com os modelos matemáticos dinâmicos para os componentes (disponíveis em Guzzella e Sciarretta (2013)) foram utilizados para definir o fluxo energético no sistema, dando origem ao escopo do modelo conceitual da planta, baseado no Prius THS-III.

A Figura 5.7 mostra a interligação entre os blocos do modelo de planta, onde as setas contínuas grossas representam o fluxo mecânico, as setas contínuas finas evidenciam o fluxo elétrico, e as setas pontilhadas representam os *inputs* provenientes do controle supervisor, sendo T_{cmd} , T_{cmd1} e T_{cmd2} os torques requeridos pelo MCI, MG1 e MG2 respectivamente, e Str representa o comando para ligar ou desligar o MCI (*start/stop*).

O modelo conceitual referente ao controle de alto nível é mostrado na Figura 5.8, onde é possível verificar as variáveis utilizadas para coordenar o comportamento do VEH no decorrer do percurso. Dessas, as variáveis controladas foram a razão de torque (r_{trq}) entre os caminhos elétrico e mecânico, e a manutenção do (*SoC*) da bateria.

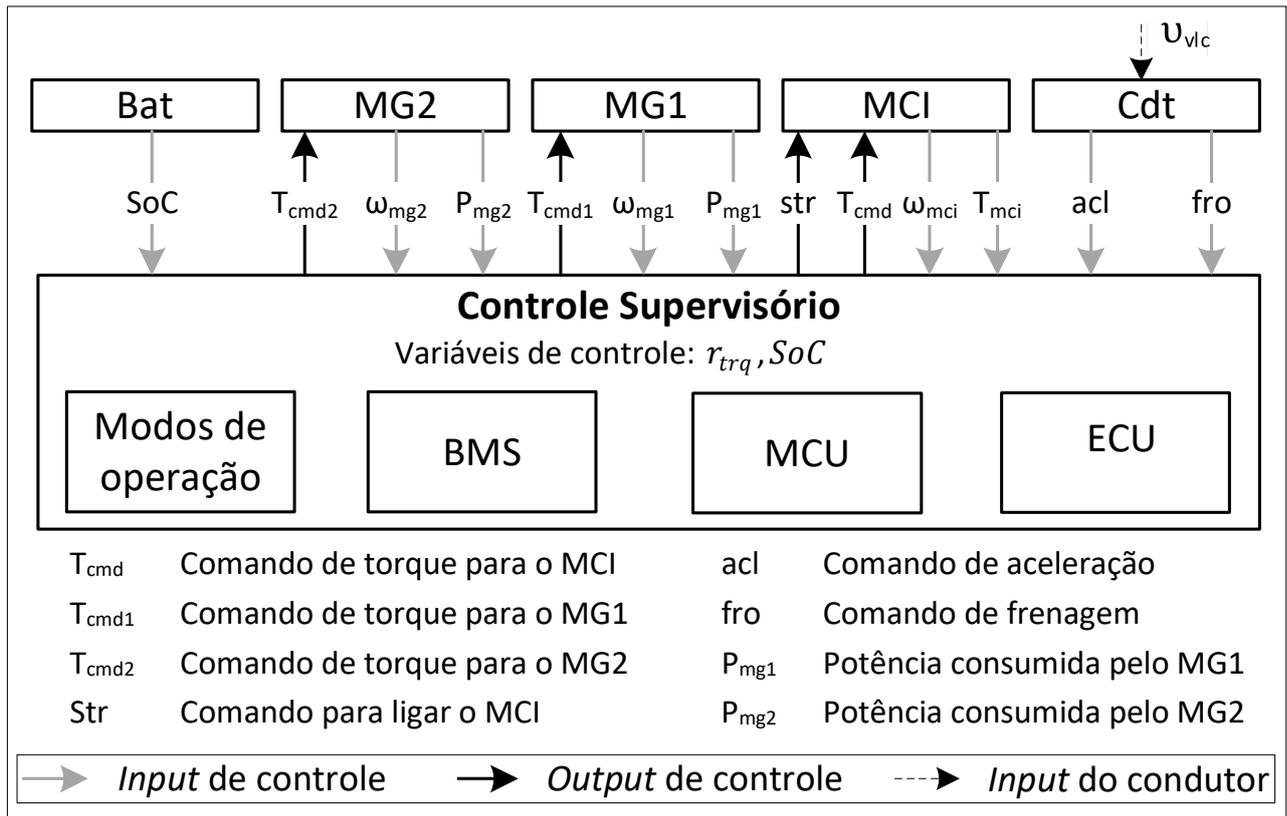
As principais restrições do sistema são referentes às limitações de velocidade e torque de cada atuador. Como exemplo, a Figura 5.9 ilustra os limites de rotação para os três atuadores, onde é possível notar que a rotação de MG1 pode se inverter totalmente para se adequar às condições dos modos de operação selecionados pelo controlador. A rotação de MG2 se inverte até certo nível, apenas para permitir a marcha ré no veículo a uma velocidade máxima de aproximadamente 40 km/h. Já ao MCI, não é permitido a inversão de velocidade, nem o funcionamento a baixo da rotação de marcha lenta (1000 rpm).

Figura 5.7 – Escopo do modelo conceitual da planta



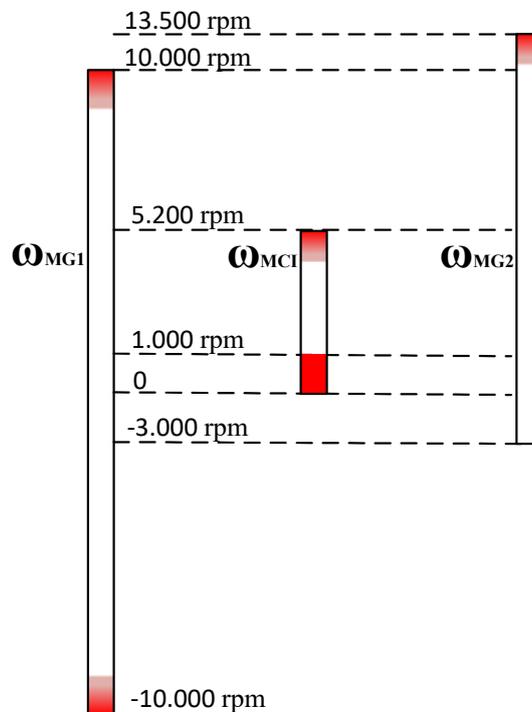
Fonte: Autor

Figura 5.8 – Escopo do modelo conceitual do controlador



Fonte: Autor

Figura 5.9 – Restrições de velocidade dos atuadores



Fonte: Autor

5.2.1.3 Atividade 1.3 - Obter dados do VEH

A obtenção dos dados do veículo em estudo foi realizada explorando as bases de dados de artigos científicos, repositórios de trabalhos universitários, modelos validados, e

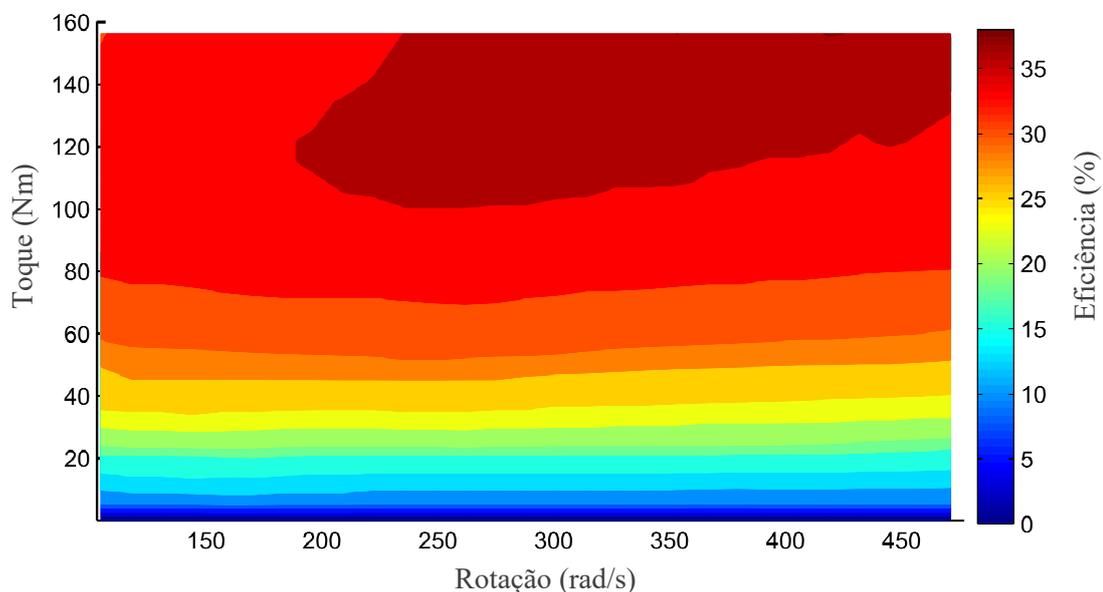
relatórios técnicos de laboratórios de certificação e homologação de veículos.

5.2.1.3.1 Parâmetros adicionais

Para atender o requisito número 1, optou-se por utilizar modelos mapeados para os atuadores, por meio da utilização de *look-up table*. Estes dados foram coletados de fontes específicas, e são apresentados a seguir.

Para o **MCI**, os mapas necessários para construção do modelo são referentes à eficiência, ao consumo específico e à curva ótima de operação. A curva de eficiência é apresentado na Figura 5.10, esta foi retirada de Chehresaz (2013), que a partir de um modelo validado do MCI utilizado no THS-II, utilizou um algoritmo de escalonamento para obter o dado correspondente ao THS-III.

Figura 5.10 – Mapa de eficiência do MCI



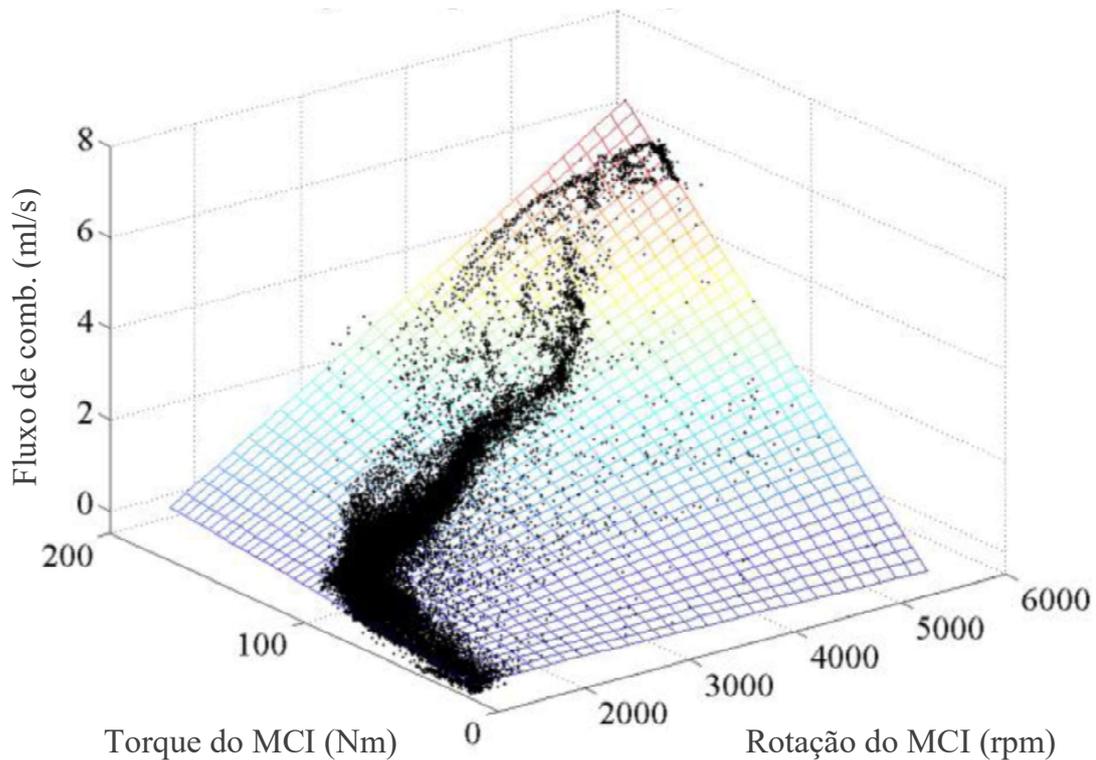
Fonte: Adaptado de Chehresaz (2013)

Os mapas de consumo e operação ideal do MCI são apresentados respectivamente nas Figuras 5.11 e 5.12. Estes foram retirados de Kim, Rousseau e Rask (2012), e foram obtidos a partir de testes padronizados realizados no veículo em dinamômetro de chassi.

Os mapas de eficiência das **máquinas elétricas** foram coletados de Mathworks (2019), que modelou e validou **MG1** e **MG2** a partir de dados experimentais fornecidos por Burress et al. (2011). Estes podem ser observados respectivamente nas Figuras 5.13 e 5.14, onde a curva em preto representa a máxima potência, sendo a área abaixo da curva a faixa de operação admissível, onde assume-se que o comportamento é o mesmo para os demais quadrantes.

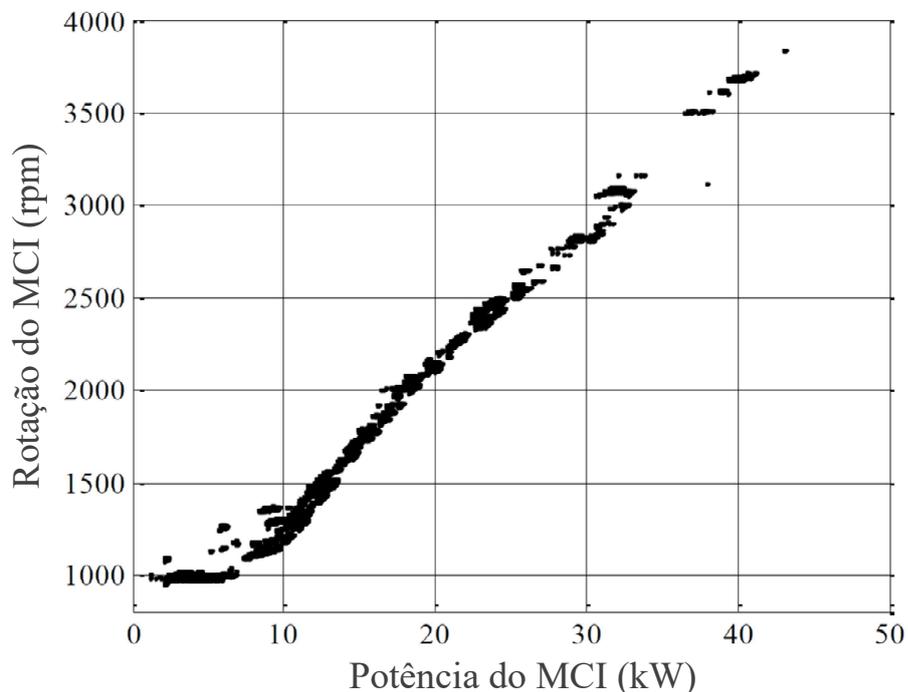
De acordo com Onori, Serrao e Rizzoni (2016), o objetivo do modelo da bateria em um simulador de veículos é prever a mudança no SoC para uma dada carga elétrica. Dessa forma, para modelar dinamicamente o comportamento da bateria, são necessários os dados referentes às variações do SoC em relação à voltagem de circuito aberto, e à resistência interna juntamente com a temperatura de operação. Estes dados podem ser visualizados nas Figuras 5.15 e 5.16, respectivamente.

Figura 5.11 – Mapa do consumo de combustível do MCI



Fonte: Adaptado de Kim, Rousseau e Rask (2012)

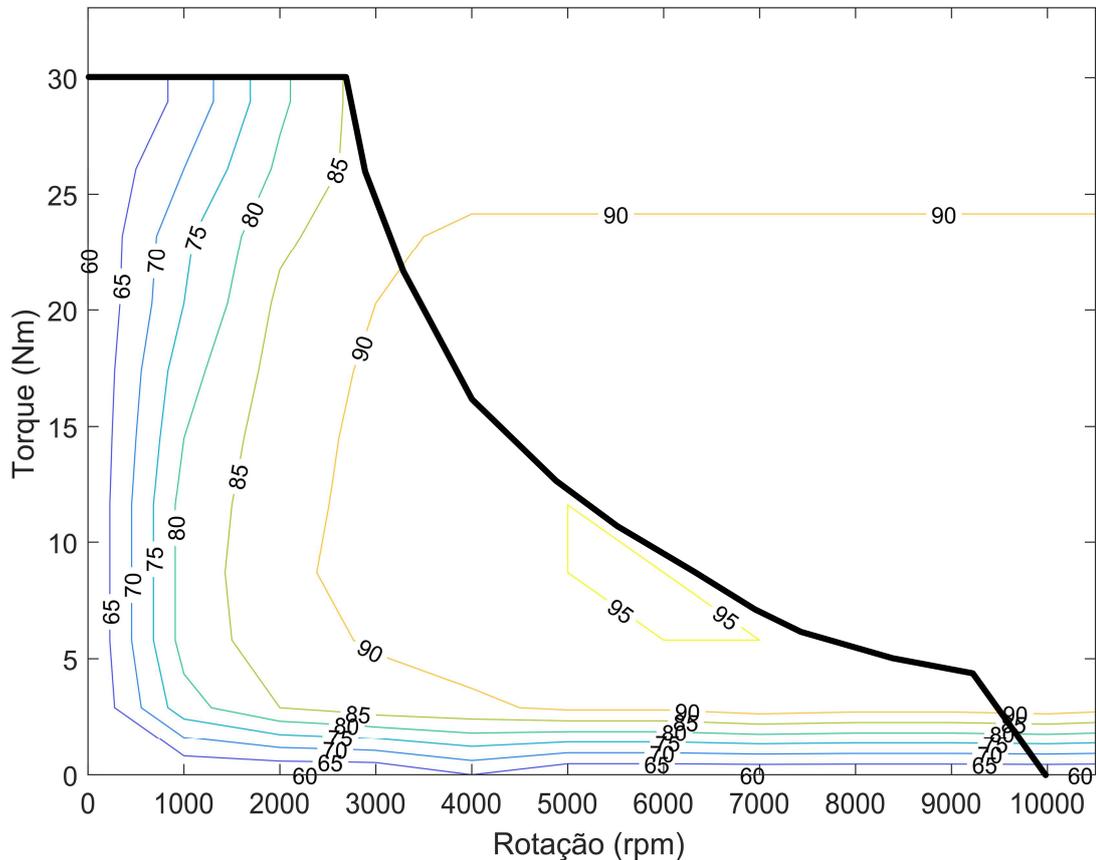
Figura 5.12 – Curva de potência ótima de operação do MCI



Fonte: Adaptado de Kim, Rousseau e Rask (2012)

Como um dos objetivos da modelagem sugere que o controle supervisor seja semelhante ao praticado no veículo original, é preciso que os dados de tomada de decisão do controlador correspondente ao Prius THS-III também sejam adquiridos. A partir da análise dos dados de teste realizados por Burress et al. (2011), foi possível verificar as informações de saída do controlador. Como mostra a Figura 5.17, os modos de operação do VEH são

Figura 5.13 – Mapa de eficiência do MG1



Fonte: Adaptado de Mathworks (2019) e Burrell et al. (2011)

selecionados em função da rotação e do torque requerido nas rodas.

Outro dado necessário ao sistema de controle diz respeito manutenção da carga da bateria. Kim, Rousseau e Rask (2012) testou o veículo e mapeou o comportamento da demanda de potência da bateria em função SoC. Como pode ser visto na Figura 5.18, a estratégia adotada no veículo objetiva a manutenção do SoC em 60%, tendendo ao descarregamento da bateria quando se encontra acima deste valor, e ao recarregamento quando estiver abaixo.

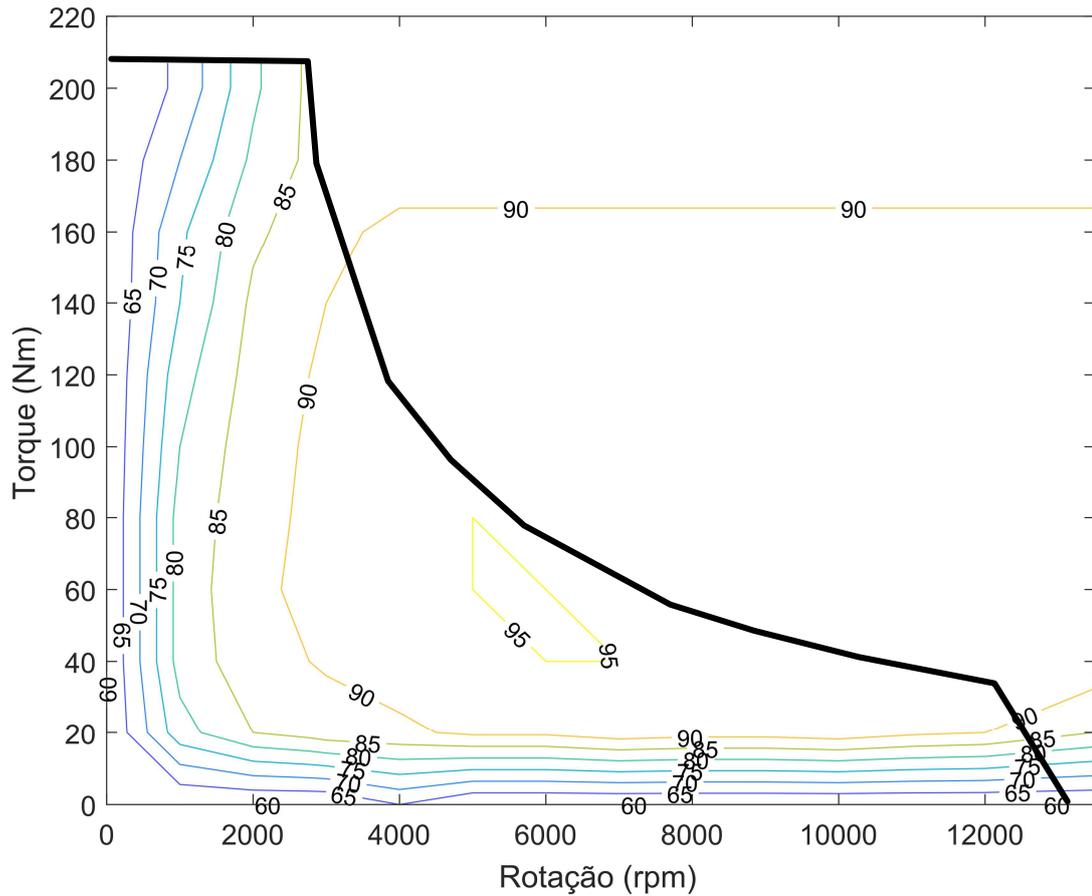
Além dos dados apresentados, outros parâmetros também podem ser encontrados nestas mesmas fontes de pesquisa, no caso de futuras atualizações nos modelos.

5.2.1.3.2 Dados de resposta

Os dados de resposta do veículo foram retirados de Rask et al. (2010), que submeteu o THS-III a vários testes em dinamômetro de chassis utilizando, dentre outros ciclos de condução, o FTP-75, que corresponde ao mesmo ciclo indicado na NBR-6601.

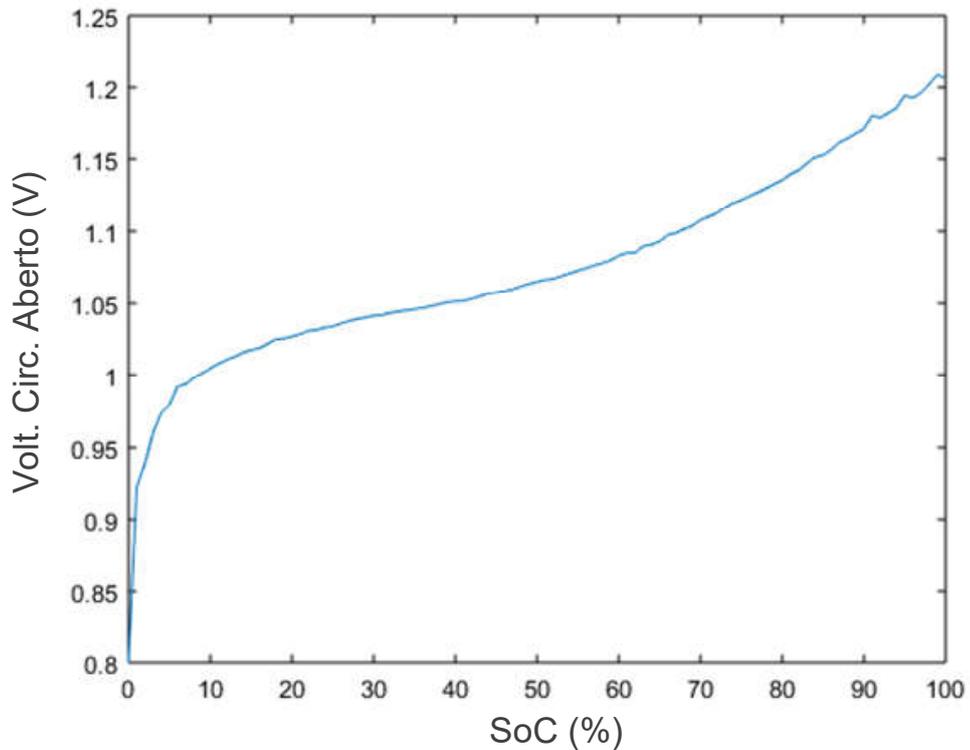
Os dados coletados do experimento foram: rotação do MCI, vazão de combustível, e potência da bateria. Estes são apresentados na Seção 5.2.3 durante o processo de verificação e validação.

Figura 5.14 – Mapa de eficiência do MG2



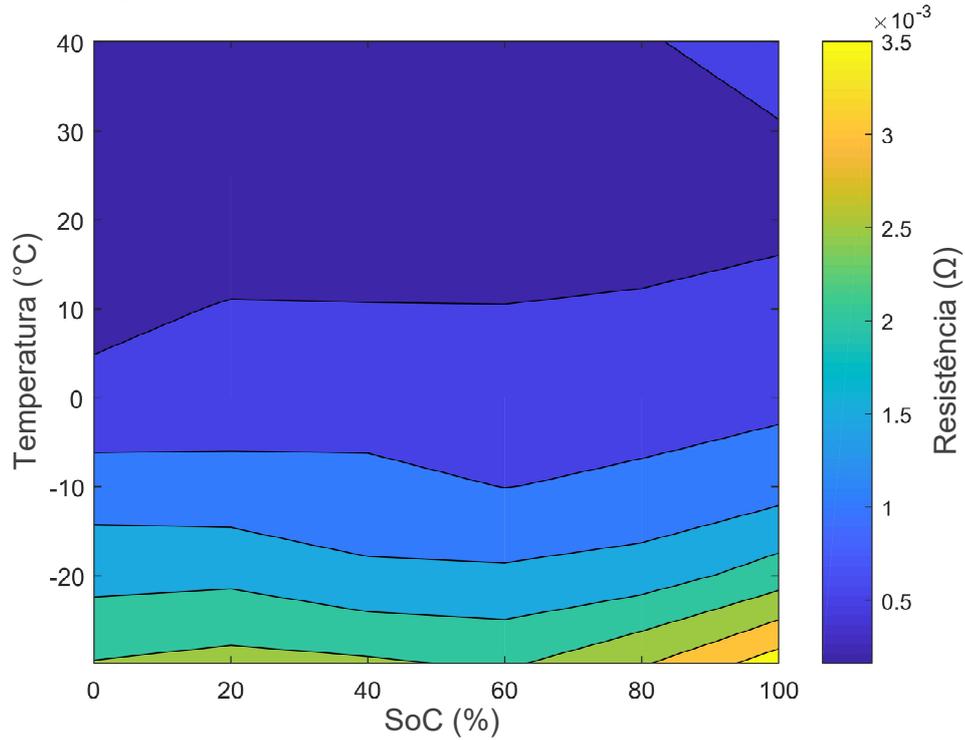
Fonte: Adaptado de Mathworks (2019) e Burress et al. (2011)

Figura 5.15 – Variação do SoC com a voltagem de circuito aberto da bateria



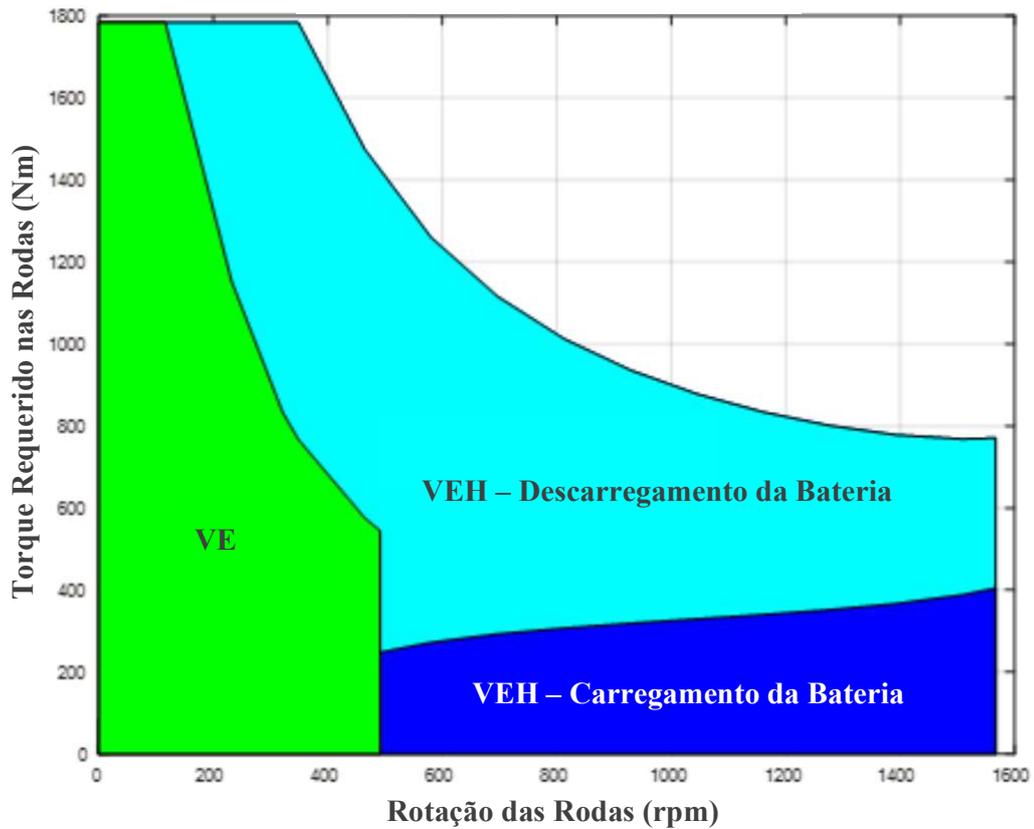
Fonte: Adaptado de Mathworks (2019) e Burress et al. (2011)

Figura 5.16 – Variação da resistência interna em relação ao SoC e à temperatura da bateria



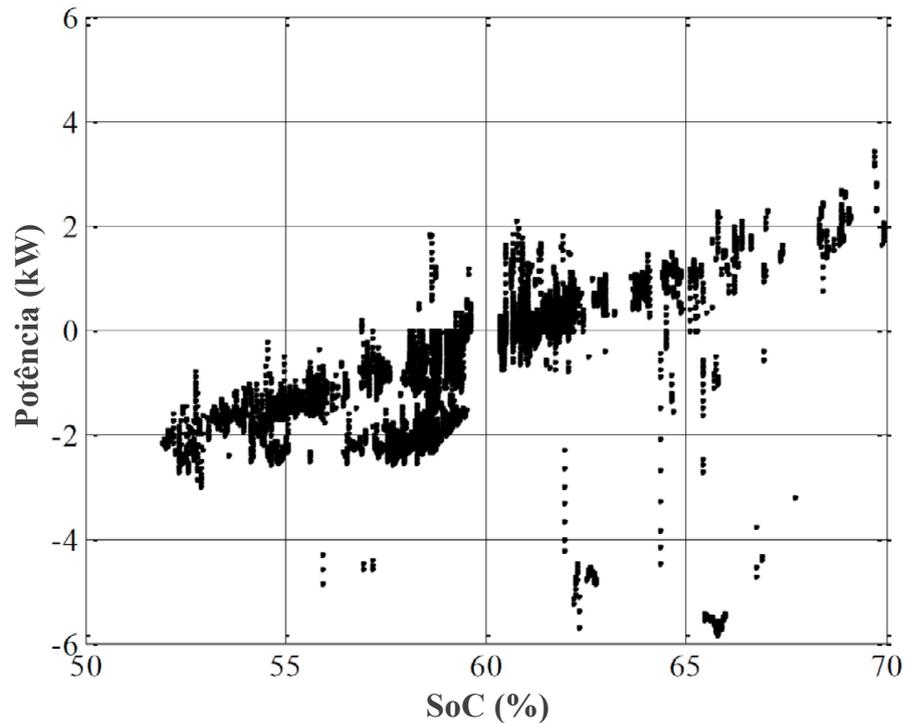
Fonte: Adaptado de Mathworks (2019) e Burress et al. (2011)

Figura 5.17 – Regiões dos principais modos de operação no Prius THS-III



Fonte: Adaptado de Mathworks (2019) e Burress et al. (2011)

Figura 5.18 – Variação do SoC em função da demanda de potência da bateria



Fonte: Adaptado de Kim, Rousseau e Rask (2012)

5.2.2 Macrofase 2 - Construção do Modelo Computacional

5.2.2.1 Atividade 2.1 - Selecionar ferramentas de modelagem

A escolha das ferramentas foram realizadas com base nos requisitos normativos e nas decisões a respeito do tipo abordagem de modelagem, e da técnica de controle a ser utilizada.

5.2.2.1.1 Tarefa 2.1.1 - Selecionar ferramenta da planta

Para o modelo de planta, três pacotes de simulação capazes de fornecer modelagens dinâmicas, estavam disponíveis: Ricardo Ignite, Simcenter Amesim e Matlab/Simscape. Dentre estes, o Ignite é o mais indicado para construção do modelo, por ser dedicado exclusivamente a sistemas automotivos, no entanto a licença adquirida pela UFSC permite apenas a utilização do *software* nos programas de extensão universitária, tais como Formula e Baja SAE.

O Amesim foi selecionado para ser a ferramenta de construção da planta. Esta escolha se justificou pelo fato de que este pacote de simulação permitir a implementação de todas as funcionalidades de modelagem referentes ao modelo da planta. Pois, permite desde co-simulações e plotagem rápida de gráficos, até a geração automática de relatórios de modelagem. Além disso, esta ferramenta apresenta uma grande variedade de bibliotecas dedicadas a sistemas automotivos, e que contemplam todos os domínios necessários à elaboração dos modelos.

5.2.2.1.2 Tarefa 2.1.2 - Selecionar ferramenta do controlador

Para a construção do modelo de controle o Matlab/simulink foi selecionado como ferramenta, pois este *software*, além de não ir de encontro às questões normativas, atende aos requisitos funcionais do controlador, que envolvem principalmente a construção do algoritmo por meio de máquina de estados finitos. Ademais, o Matlab/simulink permite co-simulação com a ferramenta selecionada para construção do modelo de planta.

Outras opções para ferramentas de controle seria a utilização de compiladores de #C ou Python. Porém, a implementação de máquinas de estado finitos nessas linguagens não é algo trivial, e exige muita expertise por parte de quem modela. Dessa forma, as limitações de tempo para desenvolvimento inviabilizaram estas escolhas.

5.2.2.2 Atividade 2.2 - Elaborar e integrar modelos

Como essa atividade é iterativa, decidiu-se por dividir a construção dos modelos em duas versões: Arranjo e controle individual dos atuadores; e implementação completa dos modos de operação.

5.2.2.2.1 Tarefa 2.2.1 - Construir Modelo da planta (Iteração 1)

Para iniciar a modelagem da planta, os modelos referentes aos três atuadores foram cuidadosamente selecionados nas bibliotecas da ferramenta, e dispostos na área de trabalho, observando principalmente a organização do modelo conceitual.

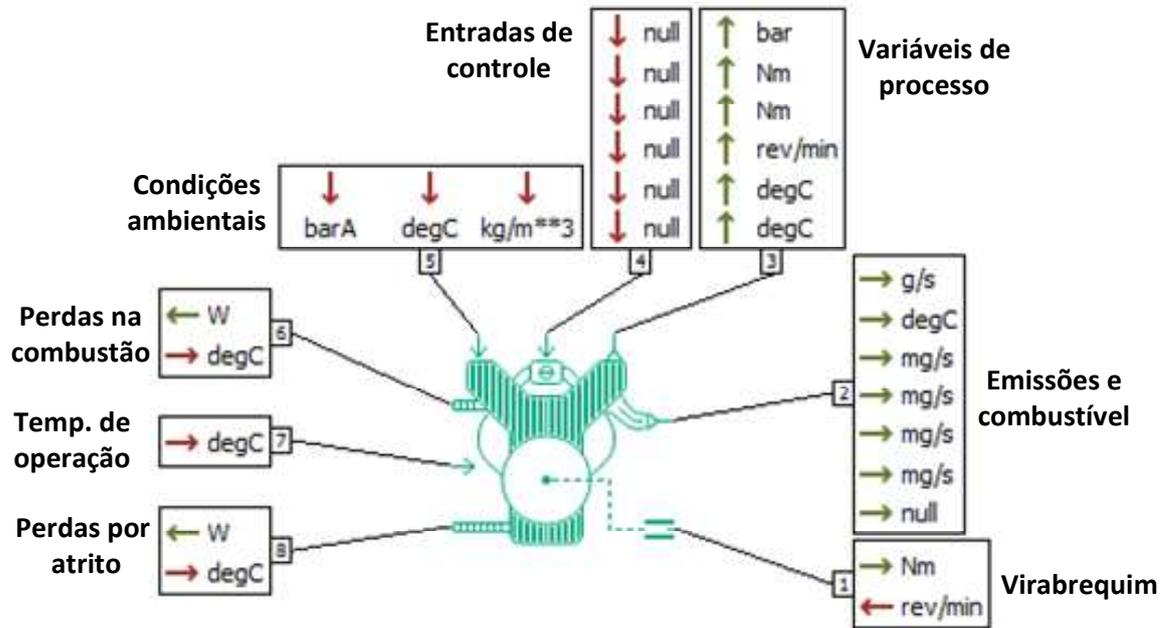
O Amesim utiliza uma abordagem multi-portas para seus modelos, assim cada canal de comunicação pode transmitir múltiplos sinais paralelamente. Além disso, os modelos geralmente possuem portas que vão além das interfaces definidas no modelo conceitual. Porém, estas podem ser ignoradas e finalizadas com terminais de conexão, caso não sejam necessárias.

A Figura 5.19 e 5.20 trazem detalhadamente as interfaces multi-portas utilizadas nos modelos para o MCI e para as máquinas elétricas. O MCI, além da causalidade já conhecida do modelo (porta 1), ainda conta com várias outras interfaces de comunicação que definem: as emissões de gases de exaustão e vazão de combustível (porta 2); as variáveis de processo em tempo real (porta 3); as entradas para os comandos de controle definidos pela ECU (porta 4); as condições de pressão, densidade e temperatura do ar atmosférico (porta 5); as perdas oriundas do processo de combustão (porta 6); temperatura de operação (porta 7); e as perdas devido ao atrito (porta 8).

As interfaces contidas no modelo utilizado para as máquinas elétricas (Figura 5.20), além das interfaces de torque/rotação (porta 2) e tensão/corrente (portas 5 e 6), também contam com: as informações de torques negativo e positivos máximos (porta 3); as perdas e temperatura de operação (porta 1); e o comando de torque vindo do MCU (porta 4).

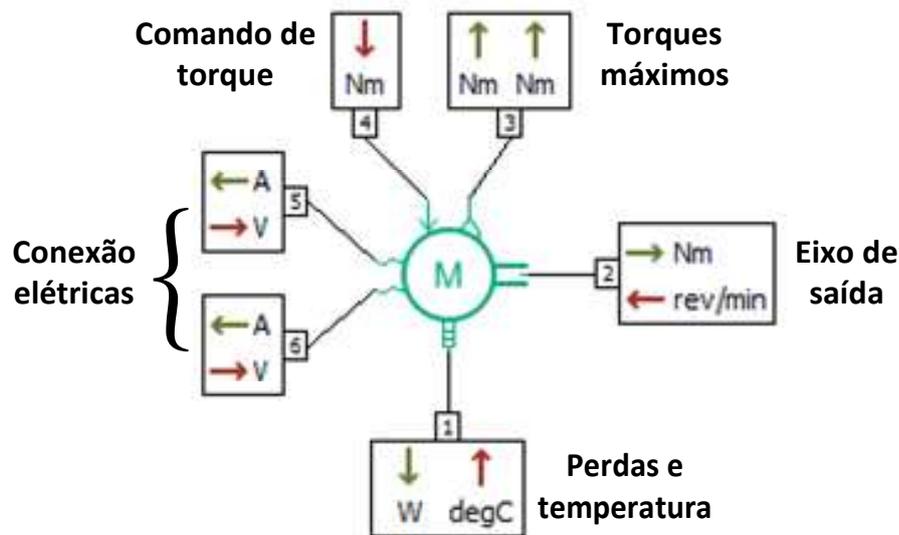
O PSD, representado por um conjunto planetário, foi o último componente da planta a ser adicionado. O detalhamento da abordagem multi-portas do modelo referente á planetária é mostrado na Figura 5.21, onde as interfaces representam basicamente as rotações e

Figura 5.19 – Modelo do MCI no Amesim detalhando a bordagem multi-portas



Fonte: Autor

Figura 5.20 – Modelo das máquinas elétricas no Amesim detalhando a bordagem multi-portas



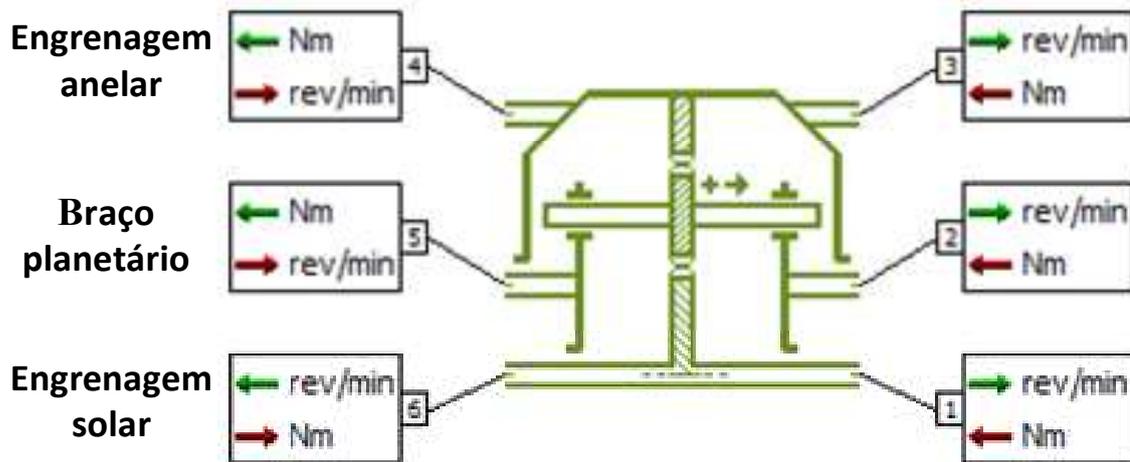
Fonte: Autor

torques nos eixos de entrada e saída da engrenagem solar (portas 1 e 6), do braço planetário (portas 2 e 5), e da engrenagem anelar (portas 3 e 4). Nota-se que, este modelo negligencia os efeitos da inércia, o que é admissível, uma vez que este efeito no conjunto planetário é pequeno quando comparado às inércias dos eixos e atuadores conectados ao PSD.

Com o intuito de suprir o déficit de componentes nesta versão da modelagem, foi preciso adicionar blocos de valores constantes, inércia dos eixos, *input* de temperatura, e por fim, uma fonte de tensão elétrica para MG1 e MG2. Além disso, sensores foram posicionados nas linhas de conexão entre os blocos, para coletar informações necessárias ao funcionamento do controlador, tais como: torque e rotação, ou diretamente as potências dos atuadores.

Finalmente, para finalizar esta versão do modelo da planta, o bloco de representação

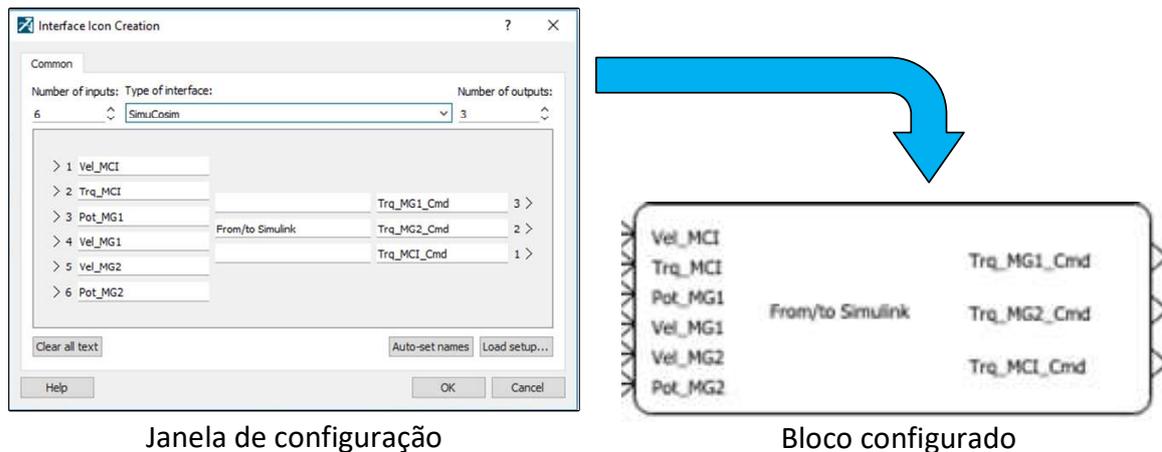
Figura 5.21 – Modelo do PSD no Amesim detalhando a bordagem multi-portas



Fonte: Autor

do controlador é adicionado. No Amesim, esta inclusão corresponde a uma pré-configuração da co-simulação. Portanto, como mostra a Figura 5.22 as entradas e saídas da planta são adicionadas por meio de uma janela, onde são colocadas (na devida ordem) as informações que são enviadas para o controlador, e as que chegam para a planta.

Figura 5.22 – Inclusão do bloco de representação do controlador no Amesim



Janela de configuração

Bloco configurado

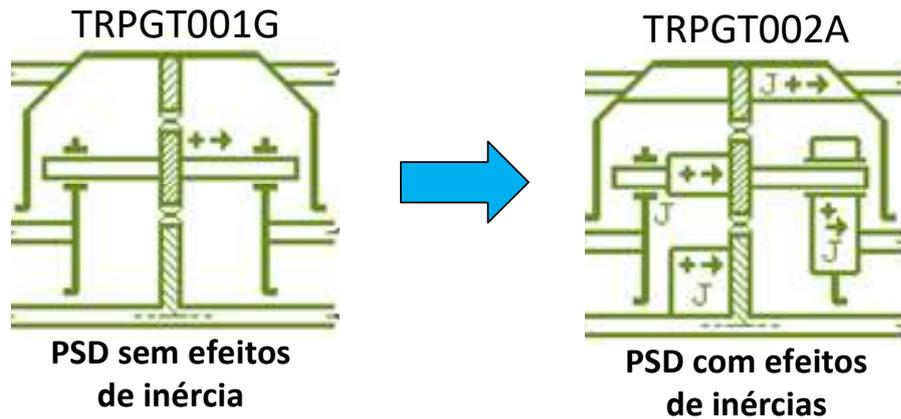
Fonte: Autor

A construção esquemática do modelo da planta para primeira iteração (versão 1) pode ser visualizada por completo na Figura E.1, no Apêndice E.

Seguindo a sistemática, após finalizada a construção esquemática, inicia-se a definição matemática, que no Amesim corresponde à seleção de submodelos para cada um dos objetos retirados das bibliotecas. Neste caso específico, os modelos iniciais padrões para cada bloco foram utilizados, não necessitando realizar mudanças nas equações que definem os mesmos. No entanto, se fosse necessário alguns dos modelos poderiam ser alterados. Por exemplo, o bloco referente ao PSD (TRPGT001G) poderia ser alterado nesta etapa para contemplar os efeitos da inércia rotacional das engrenagens e eixos (TRPGT002A), como pode ser visualizado na Figura 5.23.

Na sequência, foram atribuídos valores para os parâmetros de cada bloco, incluindo as constantes utilizadas para complementar o modelo. Assim, as informações iniciais do

Figura 5.23 – Diferenças entre submodelos para o PSD no Amesim



Fonte: Autor

Figura 5.24 – Definição de parâmetros para o MG2 no Amesim

The image shows a screenshot of the Amesim software interface for defining parameters for a motor (MG2). On the left, there is a small icon of a motor labeled 'M'. A blue arrow points from this icon to a table of parameters. The table is titled 'Parameters of drv_electrictortherm_1 [DRVEM01-1]'. The table has three columns: 'Title', 'Value', and 'Unit'. The parameters are grouped into 'maximum torques' and 'losses'. The 'maximum torques' group includes 'torques definition' (constant), 'maximum positive torque' (207 Nm), and 'negative torque definition' (reversed from positive torque). The 'losses' group includes 'losses definition' (efficiency file), '1st axis dependency' (motor speed [rev/min]), '2nd axis dependency' (motor torque [Nm]), '3rd axis dependency' (no: 2D/M1D file), and 'filename for efficiency [fraction]' (...rid_ParallelHybrid_Vehicle/lost_power.data). A red arrow points from the motor icon to the table, with the text 'Tabela de eficiência' (Efficiency table) written vertically. Another red arrow points from the table to the text 'Valores máximos' (Maximum values) written vertically.

Title	Value	Unit
maximum torques		
torques definition	constant	
maximum positive torque	207	Nm
negative torque definition	reversed from positive torque	
losses		
losses definition	efficiency file	
1st axis dependency	motor speed [rev/min]	
2nd axis dependency	motor torque [Nm]	
3rd axis dependency	no: 2D/M1D file	
filename for efficiency [fraction]	...rid_ParallelHybrid_Vehicle/lost_power.data	

Fonte: Autor

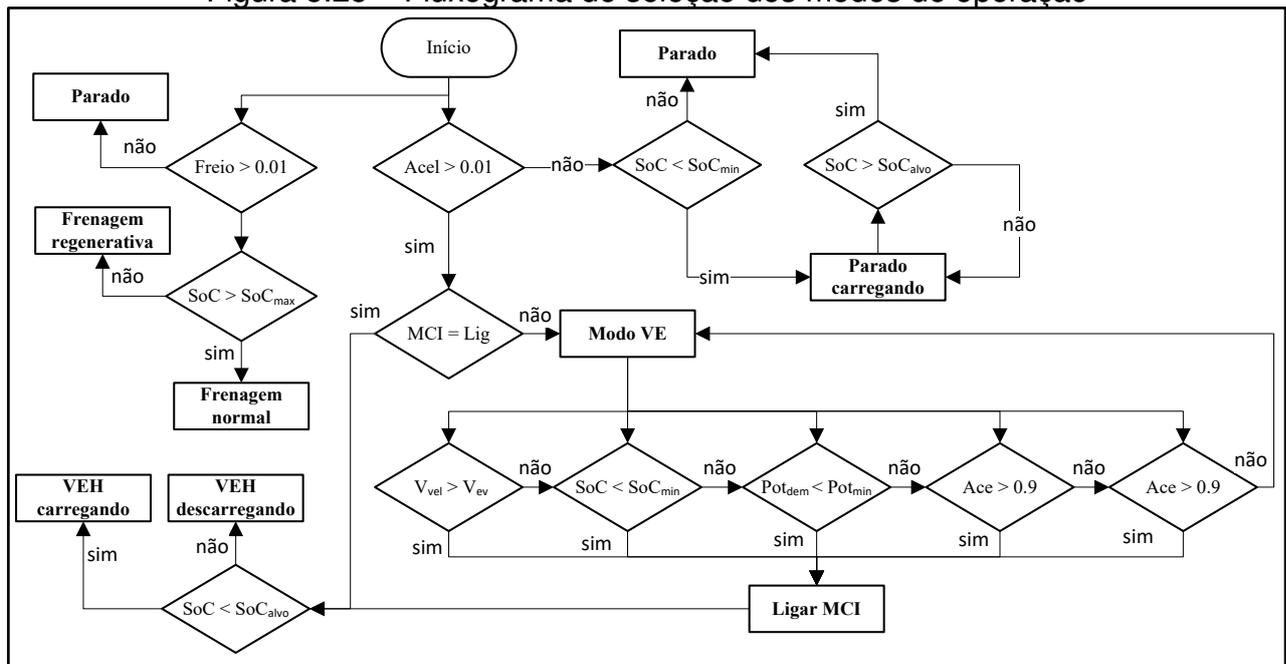
o sistema, bem como as tabelas de consulta (coletadas na atividade 1.3) foram utilizadas para alimentar os modelos. Na ferramenta utilizada, esta etapa é realizada definindo os parâmetros modelo a modelo. Como exemplo, a Figura 5.24 apresenta a definição dos parâmetros para o MG2.

5.2.2.2.2 Tarefa 2.2.2 - Construir Modelo do controlador (Iteração 1)

Como foi definido no início do processo de modelagem, o controle utilizado é do tipo heurístico baseado em regras, foi determinado ainda que o mesmo seria implementado no Simulink por meio do *State Flow* que simula uma máquina de estados finitos⁴. E, conforme recomenda a processo sistemático proposto, foi criado um fluxograma para auxiliar na construção das duas versões do controlador. Este é mostrado na Figura 5.25, que evidencia as condições para a seleção de cada modo de operação a ser contemplado na modelagem.

⁴ O sistema de controle foi construído tendo como base o modelo apresentado em Mathworks (2019)

Figura 5.25 – Fluxograma de seleção dos modos de operação



Fonte: Autor

Os modos de operação (controle de alto nível) vão determinar como cada atuador deve funcionar. Dessa forma, a elaboração do controlador se inicia a partir da determinação dos controles individuais referentes ao MCI, MG1 e MG2 (controle de baixo nível). Para isso, são utilizados os dados coletados referentes às restrições e eficiências destes atuadores, e são implementados por meio de *look-up tables*, utilizando funções do próprio Simulink juntamente com a máquina de estados finitos.

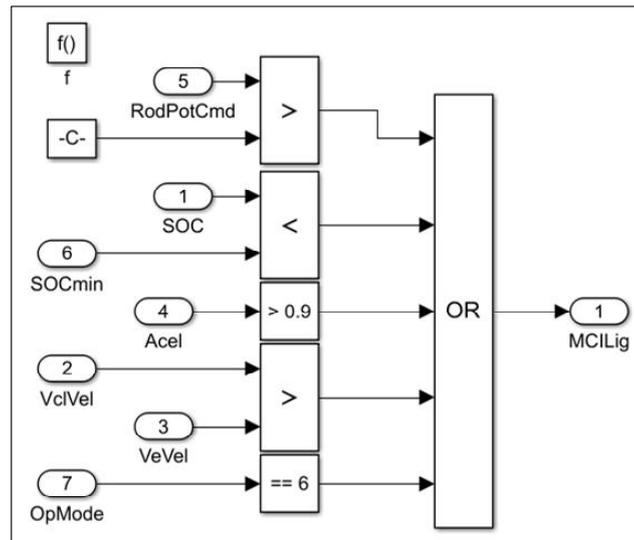
A ECU foi o primeiro bloco de controle a ser modelado. Para isso, foram utilizados os mapas de eficiência e operação coletados na Atividade 1.3. O MCI pode se encontrar em três estados diferentes: Desligado, Iniciando (transição), e Ligado. Além disso, como pode ser notado no fluxograma, o mesmo inicia mediante uma série de condições independentes, dessa forma foi criada uma função para monitorá-las (Figura 5.26).

O bloco de controle do MCI utiliza esta função para selecionar um dos seus estados de operação como mostra a Figura 5.27. A seleção dos torques e rotações ótimas é realizada a partir da demanda de potência do MCI, e é implementada por meio de uma função do Simulink inserida no *State Flow*.

Como pode ser visto no Apêndice B, para uma determinada rotação do MCI e MG2, o controlador envia um comando de torque para MG1, respeitando as restrições de valores máximos e mínimos para estes parâmetros, que para rotação e torque de MG1 seria [-10000 rpm, 10000 rpm] e [-30 Nm, 30 Nm], respectivamente. Portanto, o comportamento de MG1 define a distribuição de torque no sistema.

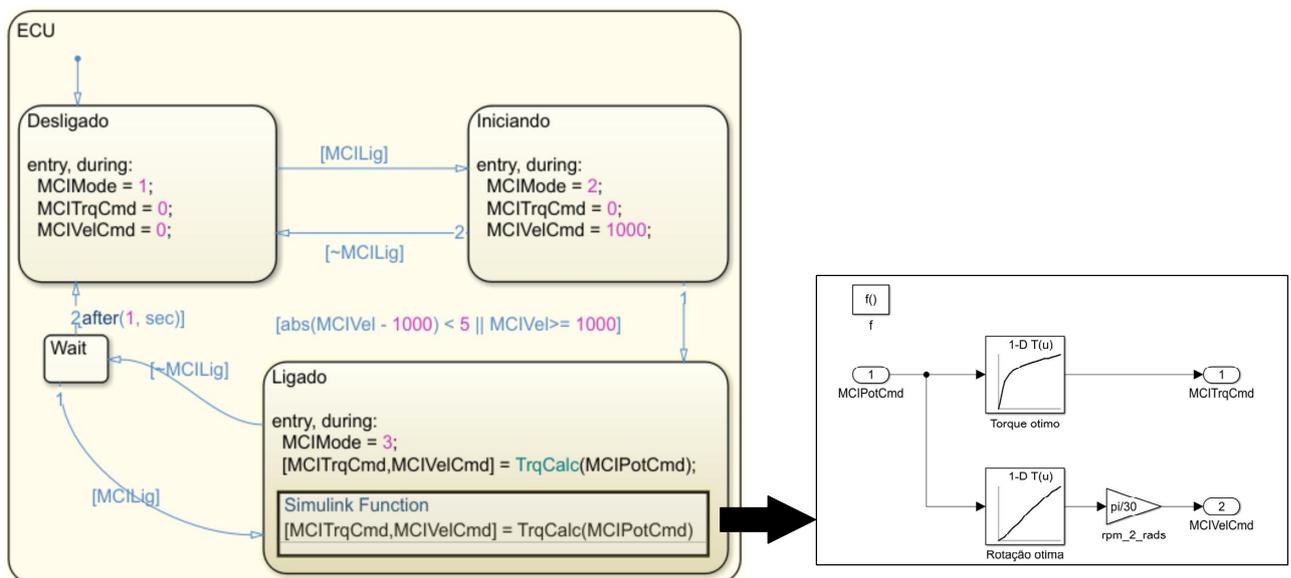
A Figura 5.28 mostra a implementação da lógica de controle utilizada para selecionar a saída de torque de MG1 que será enviada à planta. Primeiramente, há uma conversão de energia elétrica em mecânica realizada por meio do mapa de eficiência extraído da Figura 5.13. Em seguida, a partir das entradas provenientes dos demais atuadores são verificados

Figura 5.26 – Função para ligar o MCI



Fonte: Autor

Figura 5.27 – Implementação do ECU



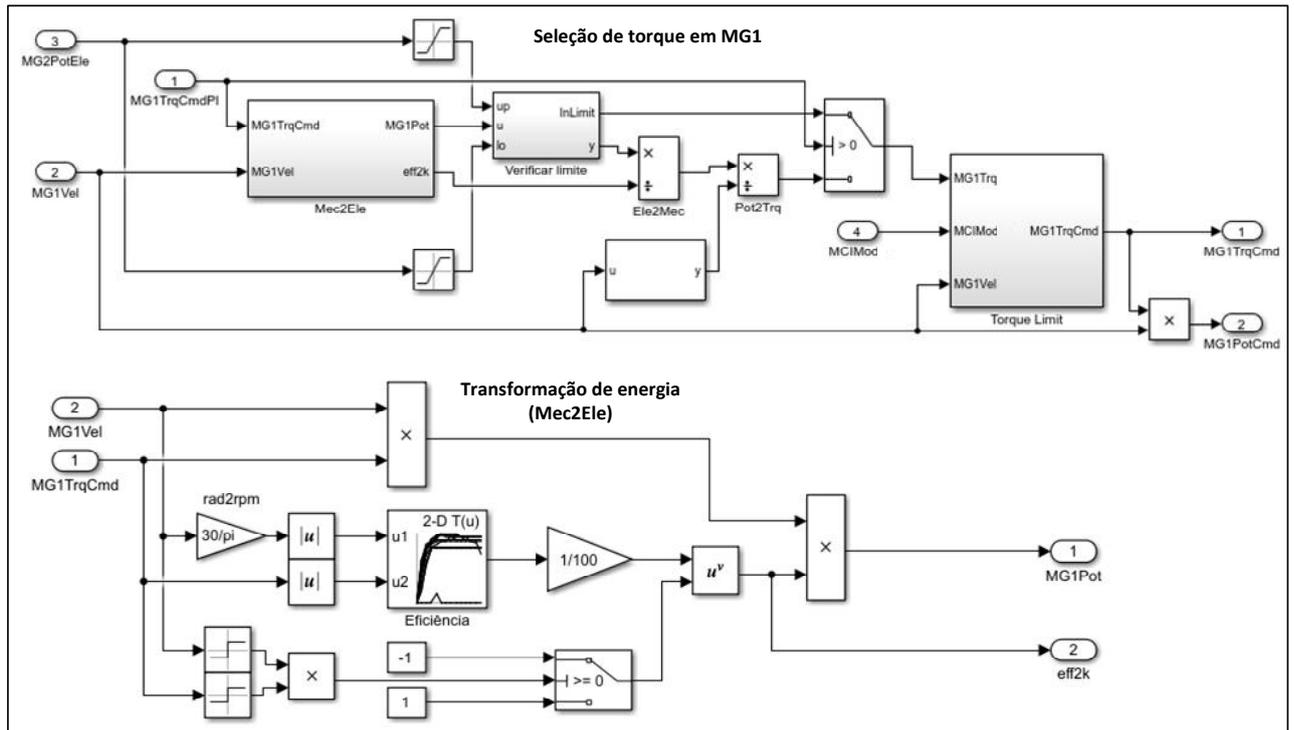
Fonte: Autor

o torque necessário, e se respeita os limites das restrições.

Assim como no caso do MCI, a operação de MG2 também depende se o veículo está no modo VE ou VEH, como mostra a Figura 5.29. Devido sua rotação ser sempre fixa em relação às rodas (ver Figura 5.3), no modo VE onde, o comando de torque deve ser igual à demanda de torque das rodas dividida pelo relação de transmissão na segunda planetária. Já no modo VEH, a demanda de potência de MG2 é selecionada pelo controlador de alto nível, e juntamente com a velocidade do veículo, define a demanda de torque.

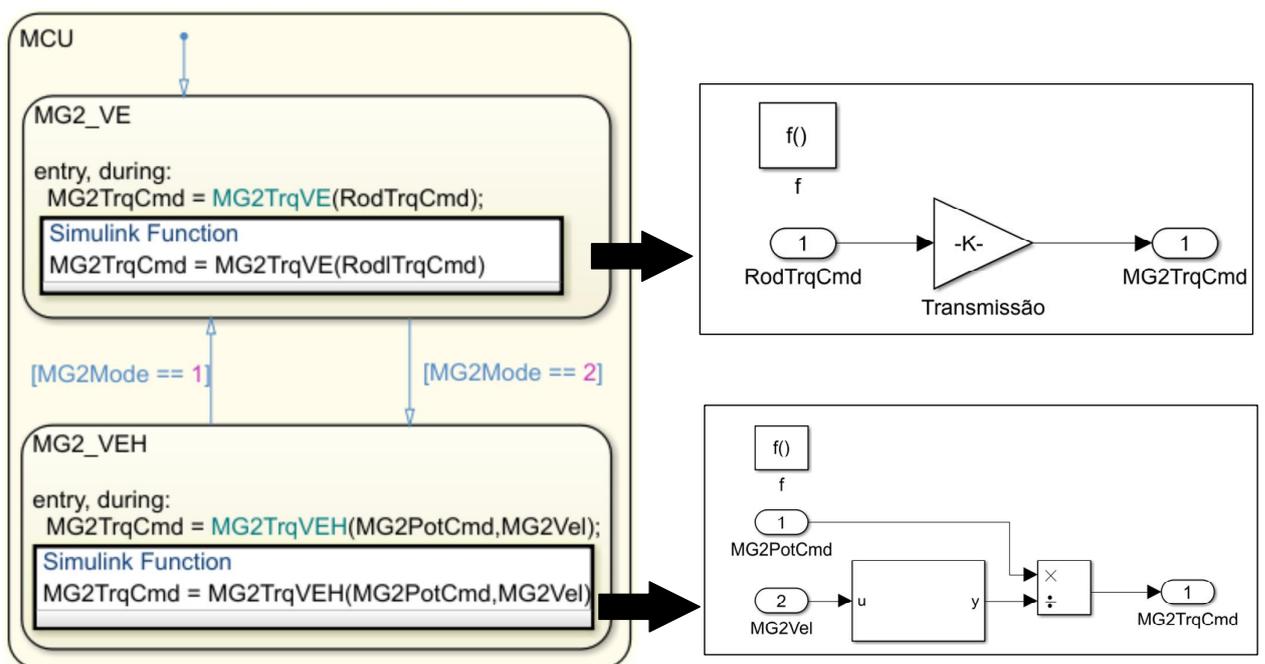
Para que se possa testar essa primeira iteração, é preciso que um controle de operação mínimo seja implementado. Portanto, é preciso construir um controle de operação preliminar, este precisa conter apenas uma lógica simples para o modo VEH, sem levar em consideração carga ou descarga da bateria. Este controlador pode ser visualizado na Figura 5.30, este já utiliza a função "MCILig" para determinar o ligamento do MCI, mesmo que nessa

Figura 5.28 – Implementação do controle do MG1



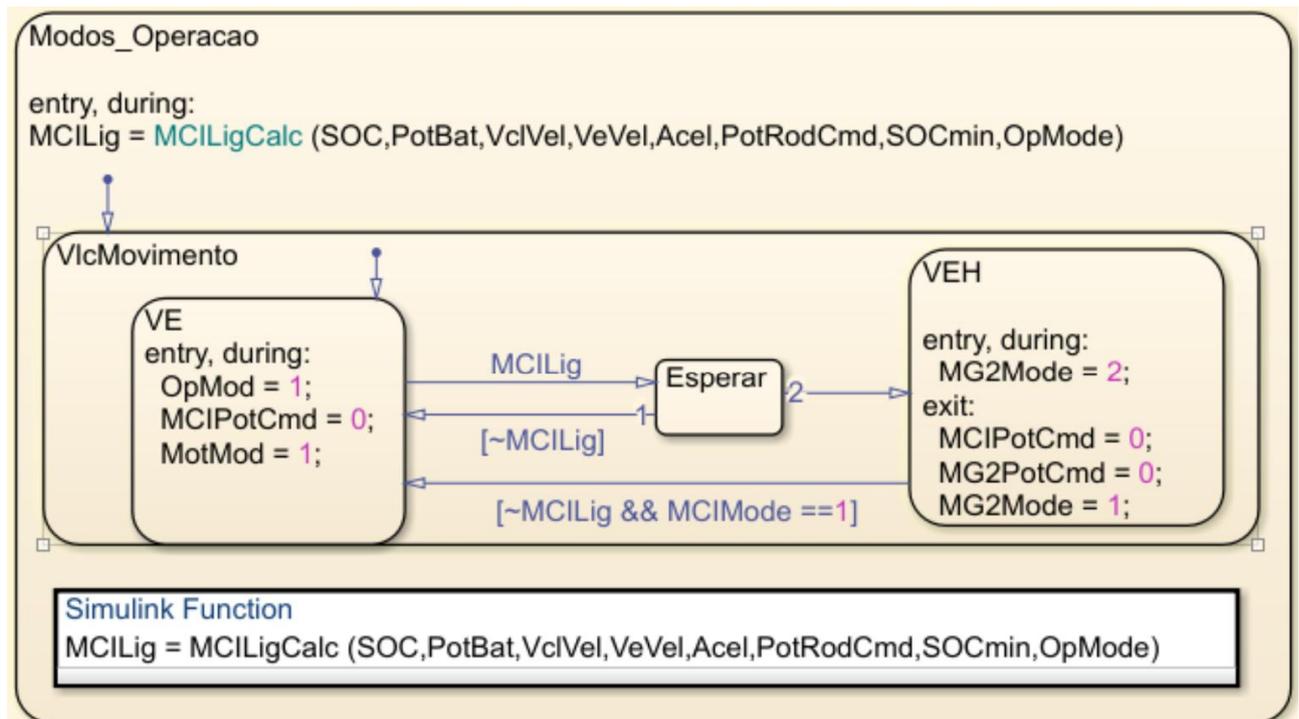
Fonte: Autor

Figura 5.29 – Implementação do MCU



Fonte: Autor

Figura 5.30 – Controle de operações preliminar



Fonte: Autor

versão o sistema ainda não tenha capacidade verificar todas as condições modeladas.

O modelo da planta é adicionado ao controlador da mesma forma que o modelo de controle foi adicionado à planta: por intermédio um bloco presente na biblioteca do Simulink. No entanto, as entradas e saídas são configuradas automaticamente, por meio de um arquivo gerado durante a compilação do modelo da planta. A velocidade do veículo é simulada pela entrada direta de uma *look-up table*, que fornece um trajeto genérico por enquanto.

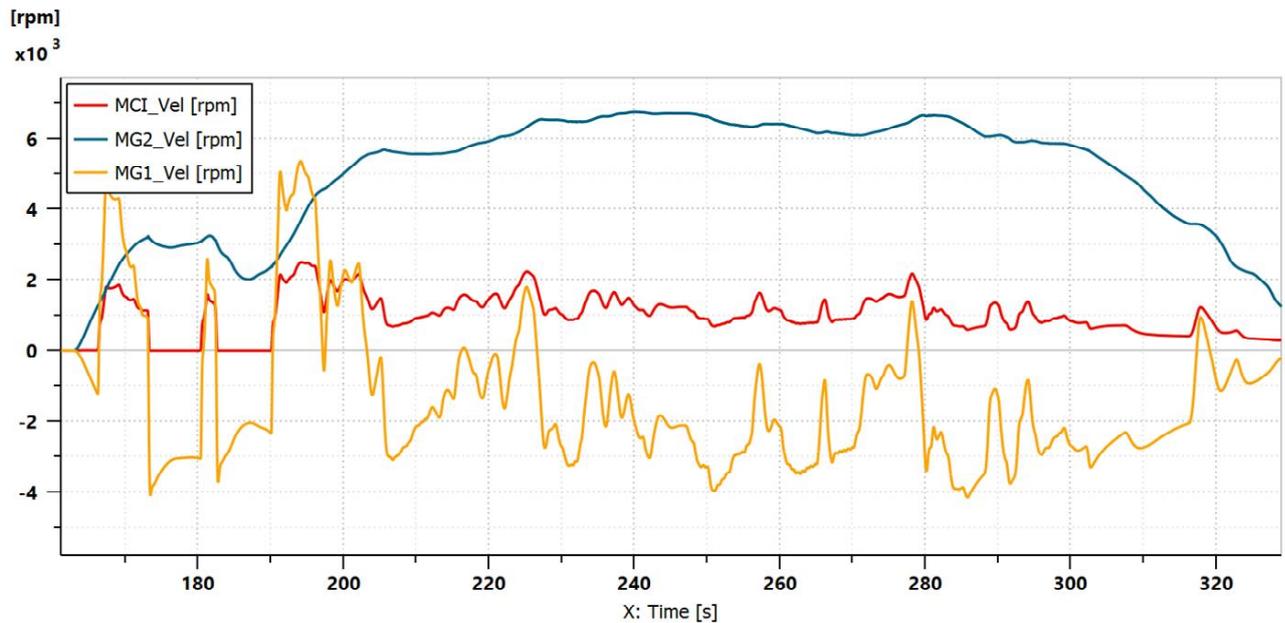
A representação completa da primeira versão do modelo do controlador por completo pode ser visualizada na Figura E.2 contida no Apêndice E.

5.2.2.2.3 Tarefa 2.2.3 - Integrar modelos (Iteração 1)

A integração dos modelos já se inicia durante a elaboração dos mesmos, no momento da adição dos respectivos blocos de representação. No entanto, para ajustar devidamente o canal de comunicação, é preciso que o passo de simulação seja igual nos dois *softwares*, e os solucionadores de equações (*solvers*) precisam ser compatíveis. Assim, foi setado 0,02s para o passo de simulação, e escolhidos os *solvers Dynamic Regular* no Amesim, e *ode45 (Dormand-Prince)* no Matlab. O Amesim foi selecionado como mestre e coordenou a simulação.

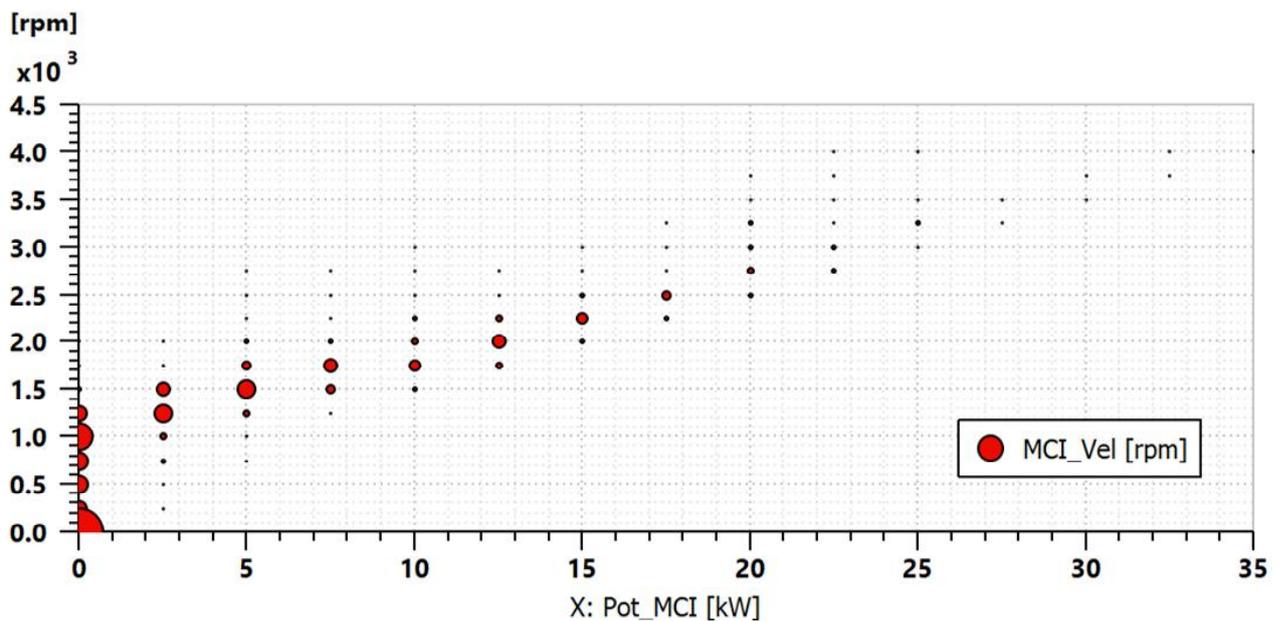
O teste de coerência para esta versão da modelagem corresponde à verificação das rotações no PSD que, como mencionado anteriormente, deve funcionar tal qual uma CVT. Assim sendo, a Figura 5.31 mostra os gráficos de velocidade angular nos três elementos do PSD em um dado intervalo de simulação, onde a rotação na engrenagem solar (MG1)

Figura 5.31 – Rotações referente à operação dos dos atuadores no PSD



Fonte: Autor

Figura 5.32 – Teste da faixa de operação ótima no MCI



Fonte: Autor

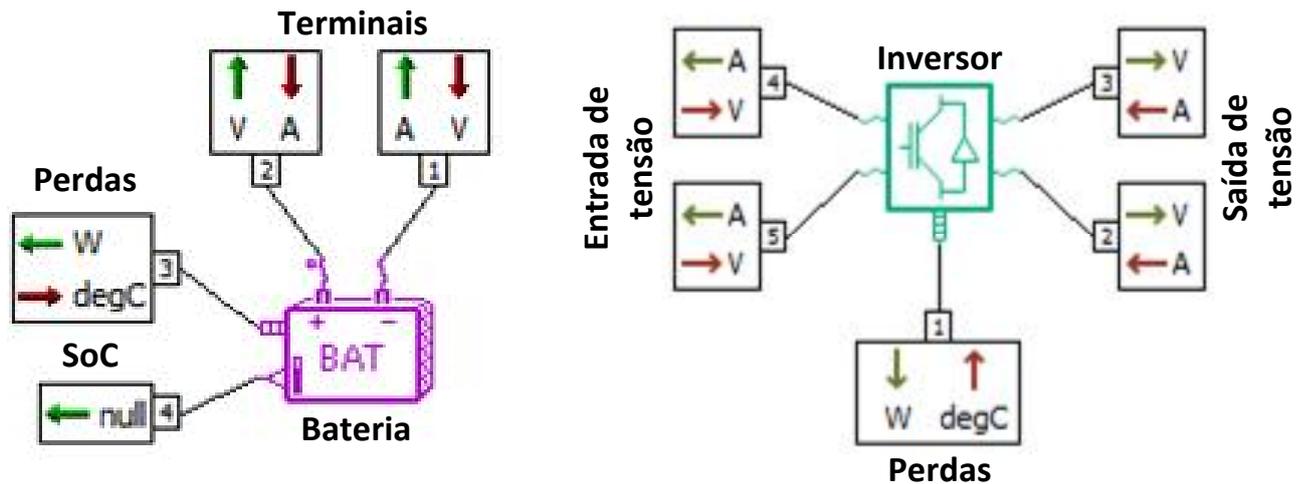
controla a velocidade do MCI (braço planetário), independentemente da rotação na engrenagem anelar, que é a saída para a transmissão final (ver Equação B.8).

Por outro lado, o controlador também se mostrou de acordo com o esperado pois mantém o MCI dentro da faixa ótima de operação, ao passo que segue um traçado predefinido, como pode ser visto na Figura 5.32.

5.2.2.2.4 Tarefa 2.2.1 - Construir Modelo da planta (Iteração 2)

Após a primeira versão, e atestada a coerência dos modelos, se iniciou a segunda (e última) versão, na qual a modelagem do veículo é complementada. Para isso, foram

Figura 5.33 – Detalhes dos modelos de bateria e inversor



Fonte: Autor

adicionados à planta os modelos referentes: à bateria e inversor, ao veículo e ambiente, bem como às entradas e saídas adicionais do bloco de controle.

O modelo da bateria, que substitui a fonte de tensão simples, baseia-se em um circuito R-C, assim os efeitos da variação do *SoC* podem ser contabilizados. Já o inversor funciona como um elevador de tensão para que a saída de 12 volts da bateria se converta em uma tensão próxima⁵ dos 650 volts requeridos por MG1 e MG2. Detalhes quanto a interface destes dois componentes podem ser visualizados na Figura 5.33.

Nas bibliotecas do Amesim existem vários modelos para representação das características do veículo. Para esta modelagem foi escolhido um modelo completo que já conta com interfaces bem específicas pra se acoplar diretamente aos demais componentes, como aos blocos de representação do ambiente, por exemplo. A Figura 5.34 traz as interfaces presentes no modelo do veículo.

Por fim, o bloco do controlador é modificado para contemplar os efeitos de carregamento (*SoC* e potência da bateria) e do veículo (velocidade atual e frenagem). Além disso, uma outra saída de controle, referente à função *start/stop* do MCI é adicionada. O diagrama contendo o modelo de planta finalizado contemplando todas os componentes definidos na modelagem conceitual do VEH pode ser visualizado na Figura E.3 no Apêndice E.

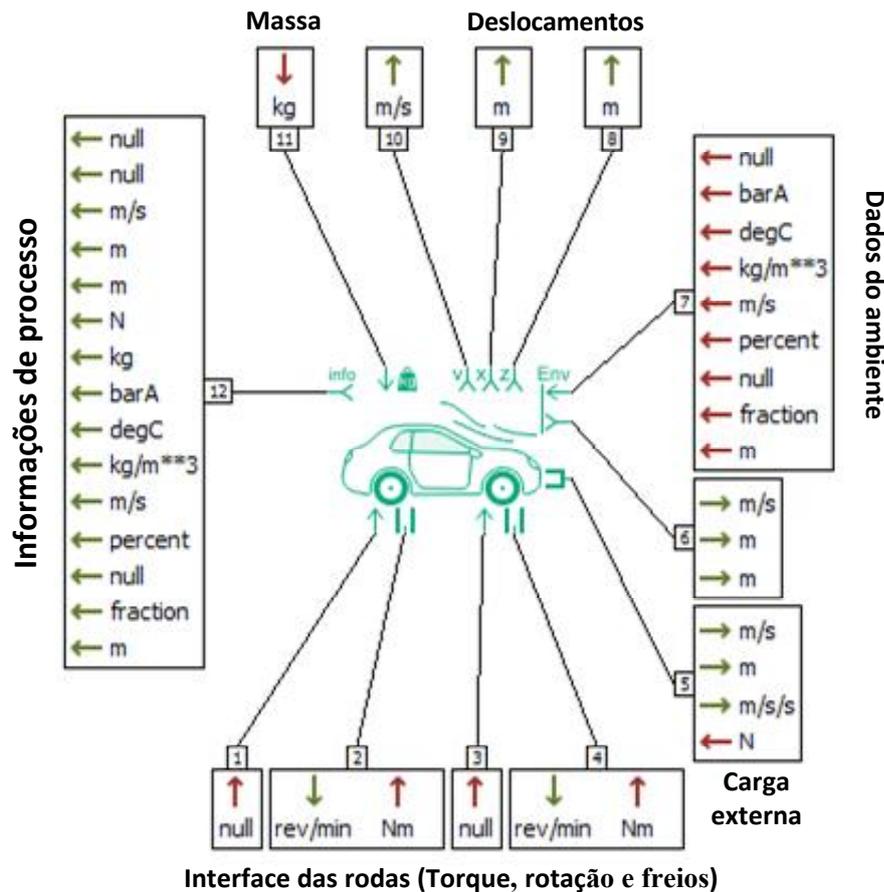
Após finalizada o *sketch* da planta, não houveram mudanças de submodelos. Dessa forma, os parâmetros da bateria, e do veículo foram adicionados para a finalização do modelo no Amesim.

5.2.2.2.5 Tarefa 2.2.2 - Construir Modelo do controlador (Iteração 2)

A segunda iteração de elaboração do controlador consiste em incluir todos os modos de operação estabelecidos no fluxograma de construção do sistema de controle. Para isso, são incluídos os efeitos da variação do *SoC*, e da frenagem regenerativa nas tomadas de decisão sistema. Dessa forma, o controle preliminar construído na primeira iteração

⁵ Existem perdas na forma de calor no decorrer deste processo.

Figura 5.34 – Detalhes do modelo de veículo utilizado na planta



Fonte: Autor

foi complementado adicionando também os modos de operações nos quais o veículo se encontra parado.

A figura 5.35 mostra o controlador completo, onde no início de um trajeto as condições iniciais são do veículo parado sem carregamento da bateria.

Assim, se o sistema verifica um SoC abaixo de um valor crítico (55%), o controle manda um sinal para MG1 acionar o MCI e proporcionar o complemento do SoC, e uma vez restabelecido (60%) é possível desligar o atuador. A Figura 5.36 traz esta função modelada.

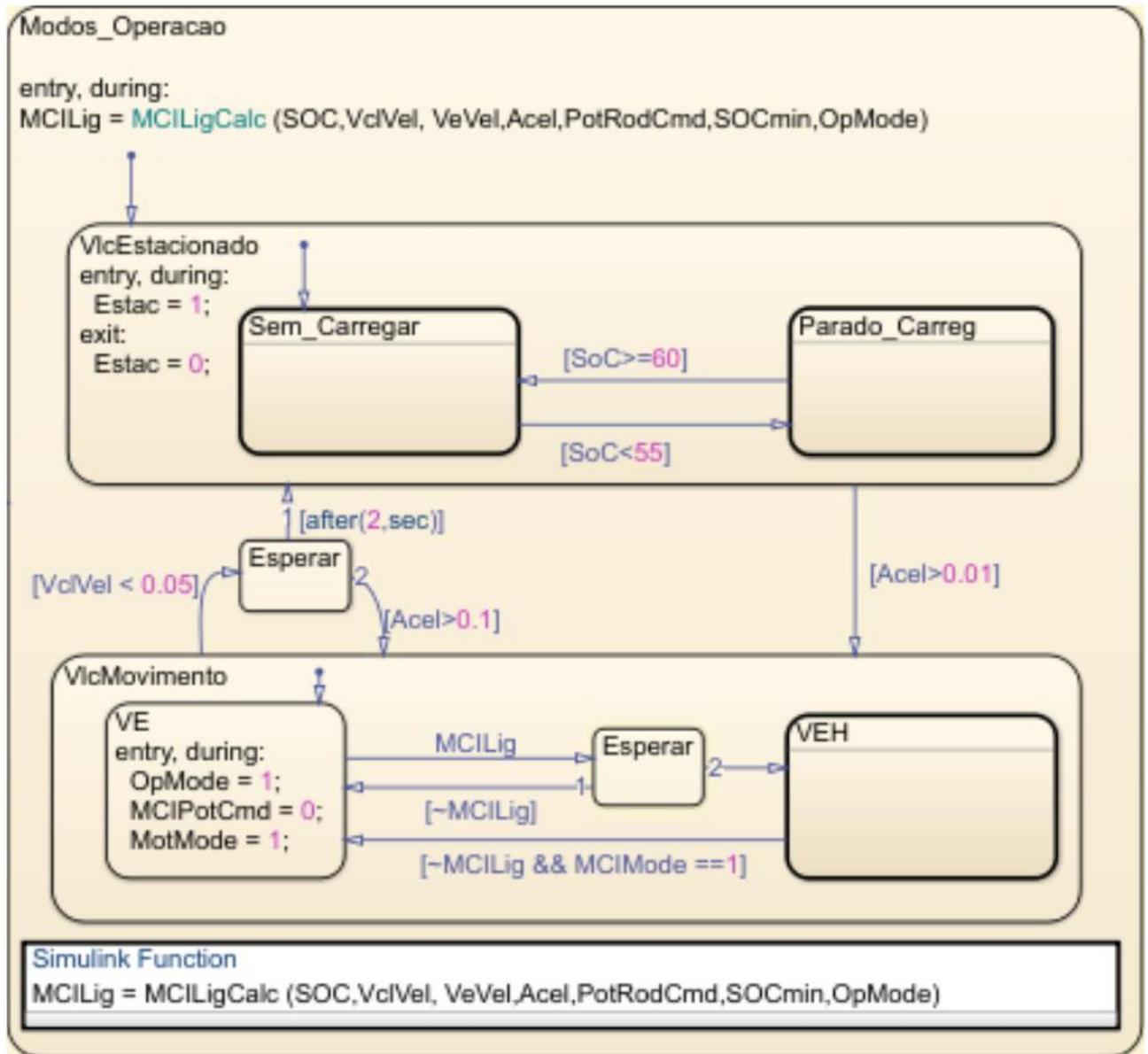
Em condições normais (demanda de potência branda e SoC maior que 55%) o veículo inicia o trajeto no modo VE, como pode ser visto no controlador implementado. Mas caso ocorra alguma das condições previstas para o ligamento do MCI, o modo VEH é acionado.

O modo VEH, como mostra a Figura 5.37, é dividido em dois: com ou sem carregamento da bateria. Um ou o outro é selecionado mediante uma função que avalia se o complemento do SoC é necessário, esta decisão leva em consideração a velocidade das rodas, a demanda de potência e os requisitos de desempenho do condutor.

Caso as condições seja de nível baixo, o controlador opta por carregar a bateria. A Figura 5.38 mostra a máquina de estados e a função encarregada de a divisão de potência entre o MCI e o MG2.

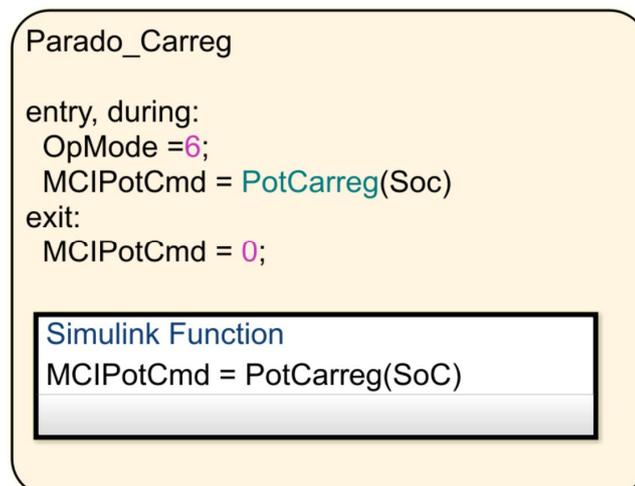
Caso a decisão seja de descarregar a bateria o controlador entra no modo mostrado na Figura 5.39, onde uma função avalia a divisão de energia. Nos dois modos VEH o controlador objetiva sempre manter o MCI na zona de maior eficiência.

Figura 5.35 – Controle dos modos de operação completo



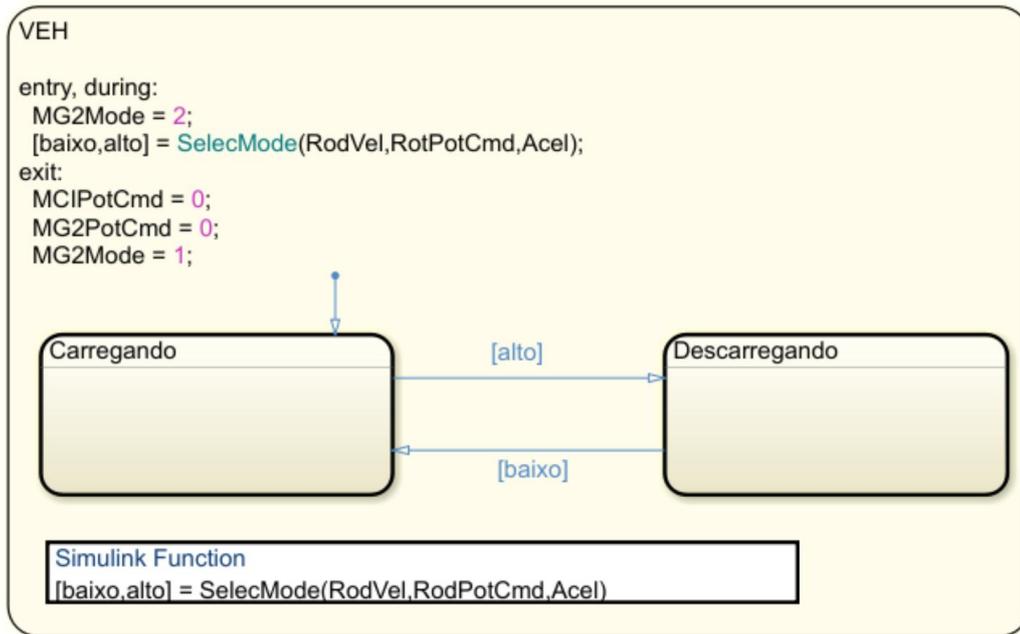
Fonte: Autor

Figura 5.36 – Lógica de controle: modo parado com carregamento



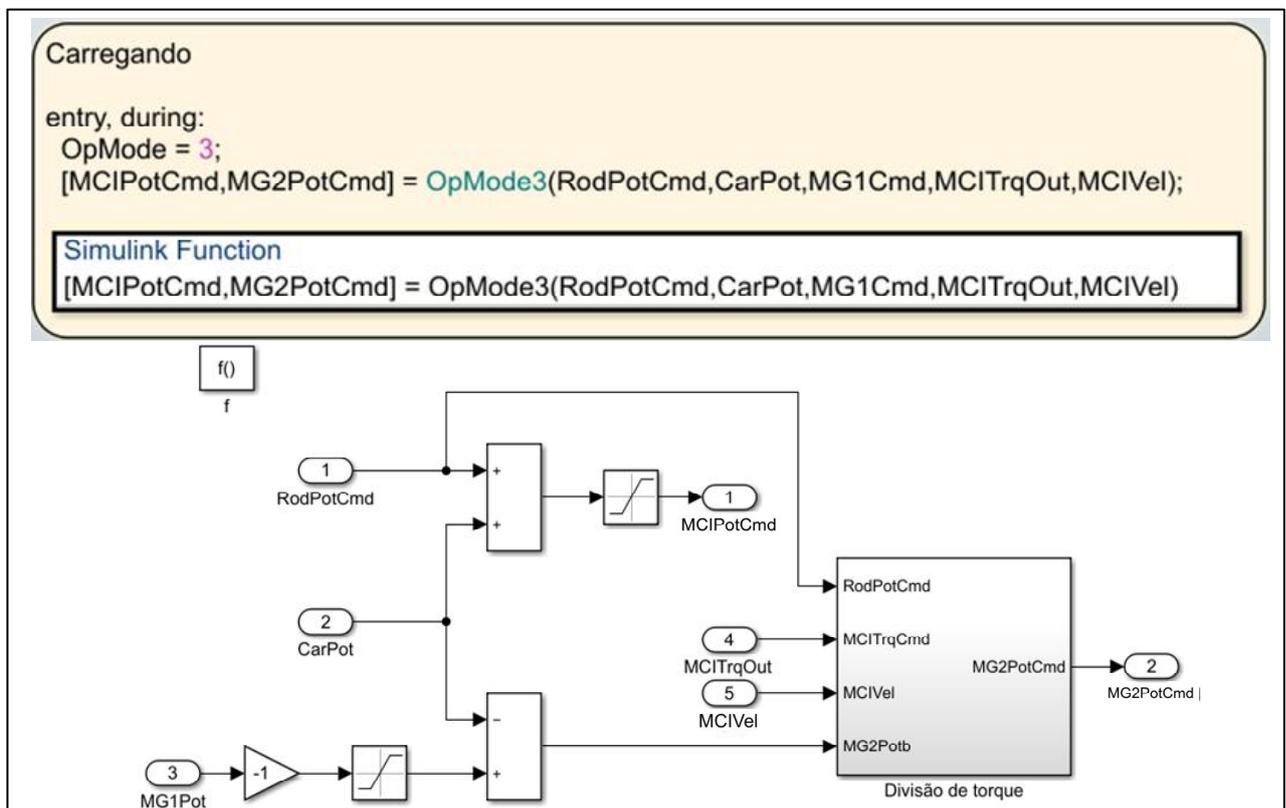
Fonte: Autor

Figura 5.37 – Lógica de controle: modo VEH



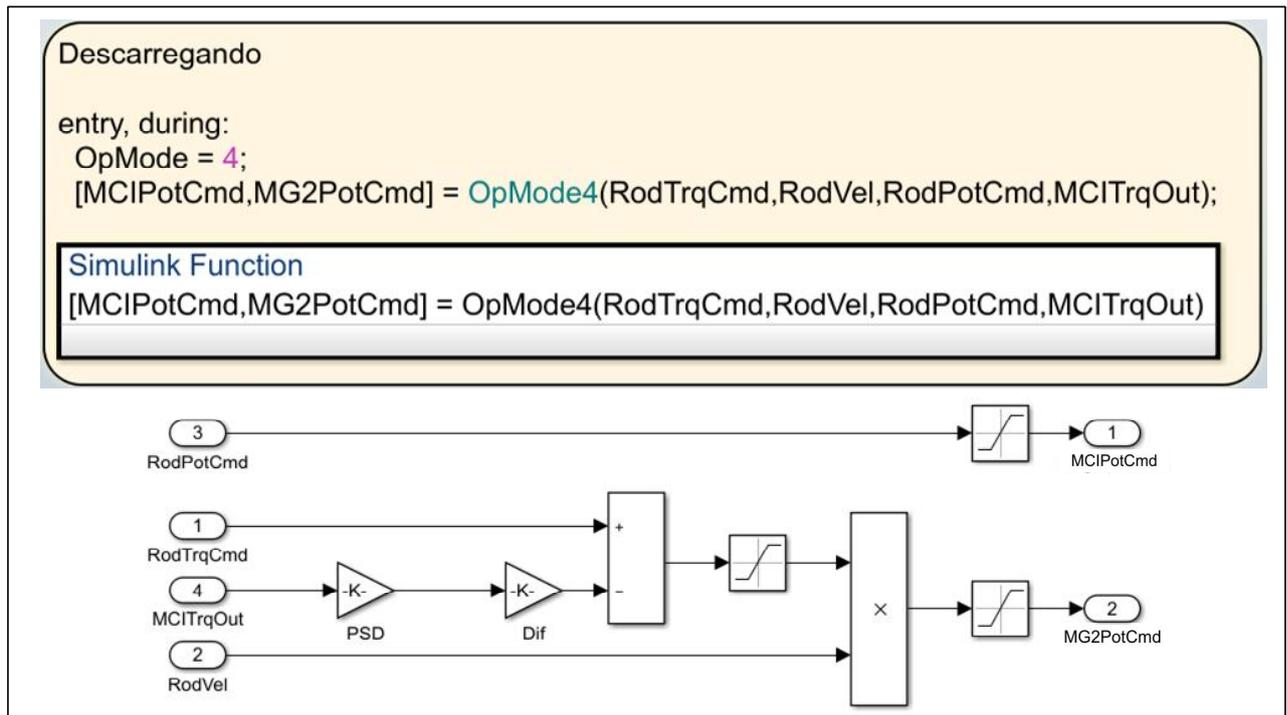
Fonte: Autor

Figura 5.38 – Lógica de controle: modo VEH carregando



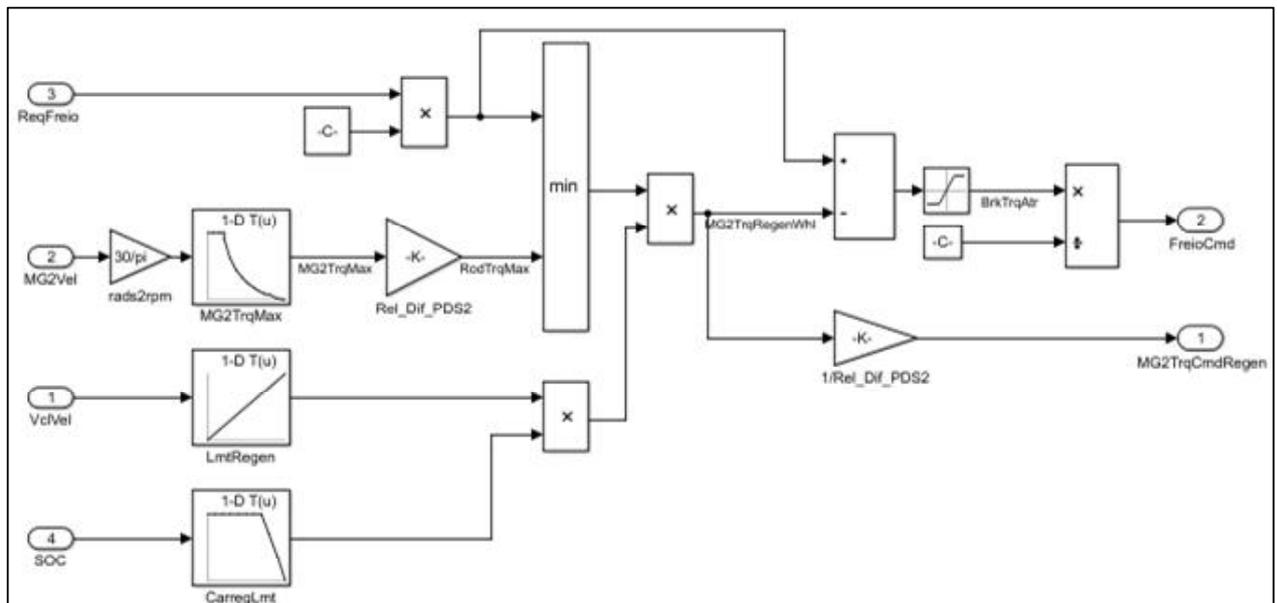
Fonte: Autor

Figura 5.39 – Lógica de controle: modo VEH carregando



Fonte: Autor

Figura 5.40 – Lógica de controle: modo de frenagem regenerativa



Fonte: Autor

O último modo de operação modelado foi o de frenagem regenerativa, que, conforme o fluxograma apresentado, é ativado em qualquer cenário no qual a o veículo precisa desacelerar ao mesmo tempo que tem capacidade de absorver energia na bateria (SoC < 100%). A Figura 5.40 traz a função que foi modelada com base na capacidade e necessidade do MG2 de absorver o torque de frenagem no eixo tracionado (dianteiro) do VEH. Dessa forma, a função implementada avalia e decide quanto de energia vai ser regenerada e quanto vai ser dissipada na forma de calor nas pastilhas de freio.

Depois, passou-se para os blocos referentes ao condutor e ciclo de condução. O

primeiro é considerado um bloco “híbrido”, podendo ser alocado tanto na planta, quanto no controle. Para modelar o condutor, foi utilizado um modelo já presente na biblioteca do Matlab/Simulink, que se trata de um controlador do tipo proporcional/integral/derivativo (PID), que a partir da velocidade atual do veículo e outra de referência, toma decisões de aceleração ou desaceleração, e as envia ao controle de supervisão. A velocidade de referência corresponde ao perfil condução, que é representado também por um bloco pré-configurado da biblioteca do *software*.

A segunda versão do modelo de controle, onde são adicionadas saídas e entradas do controlador de supervisão e da planta, pode ser visualizada na figura E.4 no Apêndice E.

5.2.2.2.6 Tarefa 2.2.3 - Integrar modelos (Iteração 2)

A integração da segunda versão corresponde apenas à atualização dos respectivos blocos de representação. E, como predetermina a sistemática o teste da última versão corresponde à atividade de verificação da próxima macrofase.

5.2.3 Macrofase 3 - Verificação e validação

5.2.3.1 Atividade 3.1 - Dividir dados em grupos

Os experimentos disponibilizados por LABORATORY (2018) foram realizados em duas etapas para o ciclo FTP-75: um teste com o MCI frio, e outro com o MCI aquecido. Dessa forma, os dois testes já correspondem à separação pretendida nesta atividade. Onde, o primeiro (a frio) foi utilizado para verificação, e o segundo (a quente) foi utilizado para a validação.

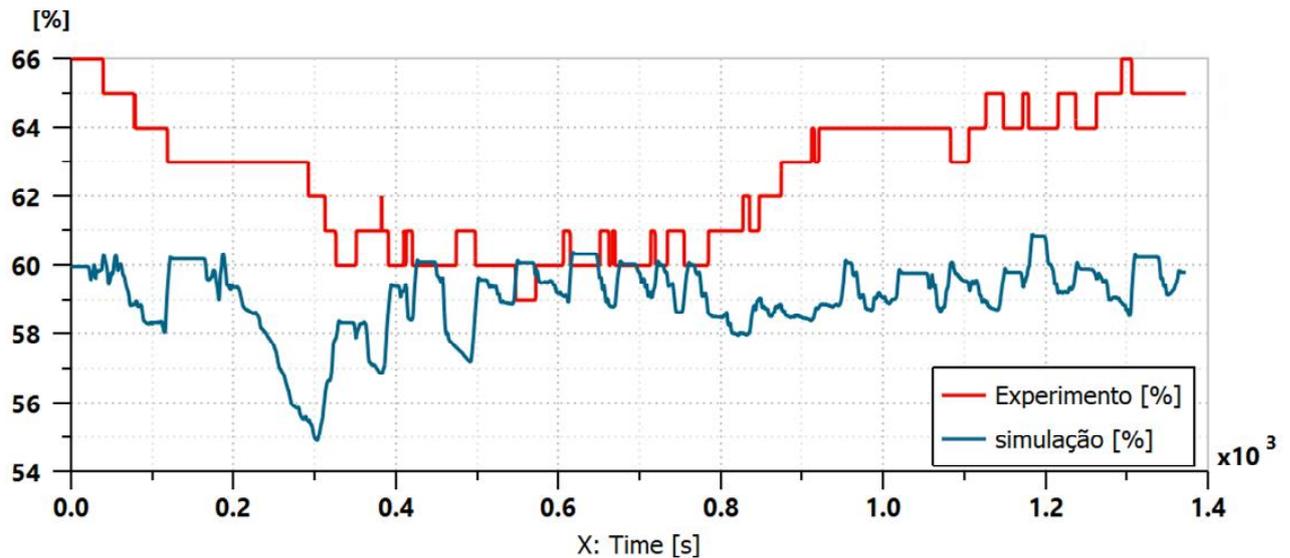
Esta divisão foi conveniente, pois a modelagem assume que a temperatura de operação do MCI é mantida constantemente a 80°C, que é a temperatura de operação adotada no veículo. E, como a função da verificação é a busca por inconsistências lógicas na construção dos modelos, somente os efeitos da temperatura de operação não inviabilizam esta atividade.

5.2.3.2 Atividade 3.2 - Verificar modelo

Um dos dados utilizados para verificar a existência de erros na modelagem foi o SoC. Em uma análise do consumo de combustível é importante que o SoC no início do trajeto seja aproximadamente o mesmo no final, pois uma variação faz necessário um ajuste para se conhecer quanto da energia foi apenas convertida. Dessa forma, uma das tarefas da verificação foi garantir que a lógica utilizada garanta esse comportamento.

A Figura 5.41 mostra a variação do SoC para o modelo e o experimento, onde é possível perceber que, apesar do estado inicial diferente, ambas as curvas tendem a finalizar o trajeto com um SoC semelhante ao que iniciaram. Além disso, ainda verifica-se que durante o trajeto, as duas curvas objetivam a carga de 60%, no entanto as pretensões de SoC final faz com que decisões diferentes sejam tomadas. Assim, essa estratégia foi considerada verificada.

Figura 5.41 – Variação do SoC durante o ciclo de condução



Fonte: Autor

A verificação continuou de forma estruturada analisando todos os modelos e sub-rotinas, o que levou um tempo considerável devido à complexidade do sistema. Durante este processo, foram encontrados erros nos códigos, e nos submodelos da planta, sendo estes prontamente corrigidos a medida que eram identificados. As sucessivas simulações se repetiram até que fossem extinguidos os problemas de construção da modelagem.

5.2.3.3 Atividade 3.3 - Validar modelo

Devido as limitações de tempo, o processo de validação foi realizado com o objetivo de que o modelo computacional replicasse o comportamento do veículo real, no entanto sem exigir uma correspondência exata entre modelo e o experimento. Pois, a natureza multidisciplinar e a grande quantidade de parâmetros torna a calibração uma tarefa complicada e demorada.

Assim, a modelagem é considerada validada se comportamento da mesma estiver com erros abaixo de +/-10% de acordo com o segundo grupo de dados de teste.

Os testes foram realizados utilizando as mesmas configurações de simulação ajustadas durante a primeira iteração.

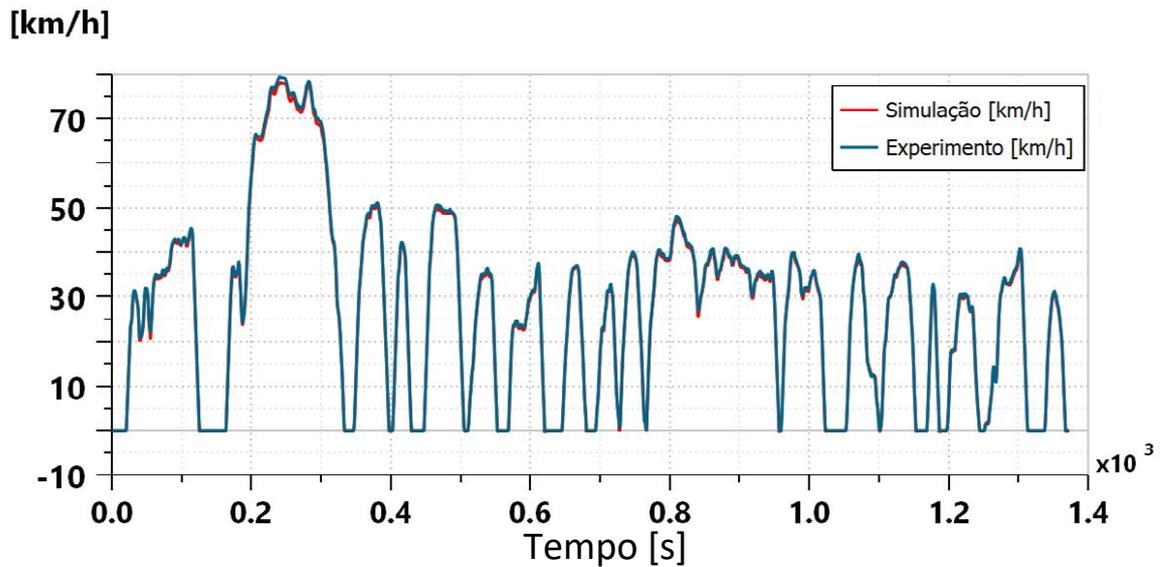
Antes de iniciar validação foi preciso garantir que a demanda de torque oriunda do condutor estivesse correta, pois um erro de entrada se propagaria por todos o sistema. Por isso, o bloco do condutor precisa garantir que o traçado do ciclo seja seguido pelo veículo.

Várias simulações foram rodadas até que fosse possível calibrar os ganhos do PID. O gráfico que atesta a validade do modelo é mostrado na Figura 5.42, onde o erro medido ficou em torno +/- 3,5%.

Os dados contemplados na validação foram: a rotação do MCI, a potência da bateria, e o consumo de combustível.

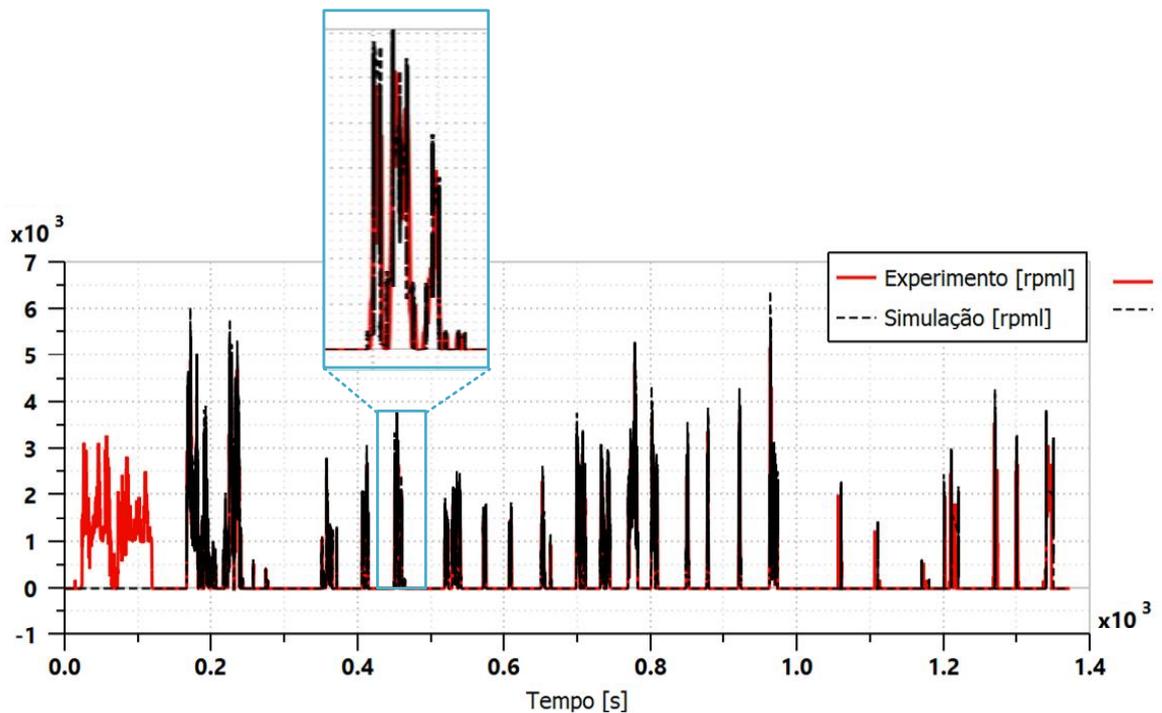
A Figura 5.43 mostra os resultados de simulação para a velocidade de rotação do MCI, na qual podem ser observados desvios de até 400 rpm entre os valores simulados e os medidos. No entanto é possível observar que o modelo representa bem o comportamento

Figura 5.42 – Validação do Condutor (NBR 6601 x simulação)



Fonte: Autor

Figura 5.43 – Rotação do MCI



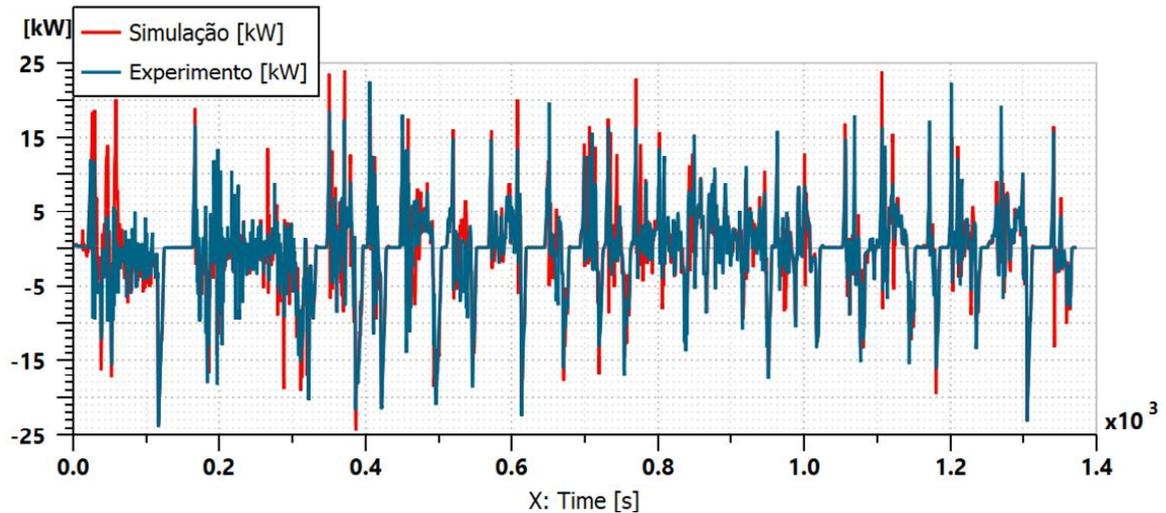
Fonte: Autor

do atuador. Além disso, nos primeiros 180 segundos a estratégia do veículo experimentado liga o MCI para aquecer o catalizador (TWC, do inglês *Tree Way Catalytic Converter*) e minimizar as emissões. No entanto, na modelagem o MCI permanece desligado, pois os efeitos de aquecimento do TWC não são considerados. Na faixa de operação considerada, o erro permaneceu menor abaixo de +/- 7,5 %.

A Figura 5.44 mostra a variação da potência da bateria em kW, onde é possível notar que os valores da simulação tem boa correlação, com erros abaixo 0,2 kW. Este dado está diretamente ligado à distribuição de torque no PSD, assim, é possível inferir que o arranjo de atuadores foi ajustado corretamente.

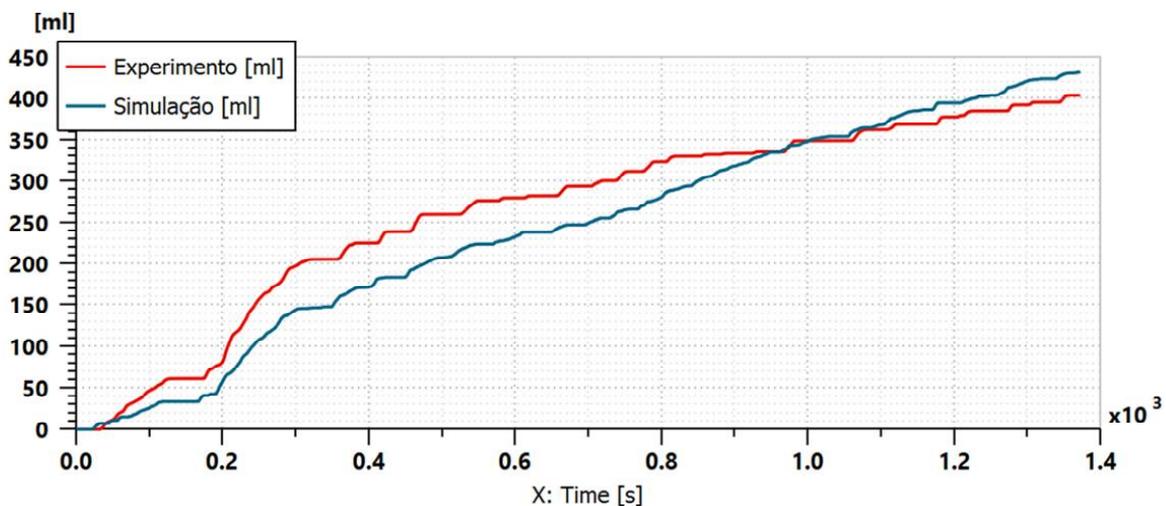
Por fim, o consumo de combustível na simulação e no experimento são mostradas na

Figura 5.44 – Variação de potência da bateria (simulação x experimento)



Fonte: Autor

Figura 5.45 – Consumo de combustível (simulação x experimento)



Fonte: Autor

Figura 5.45, onde os consumos totais medidos são respectivamente de 429,5 ml e 410,4 ml, representando um erro de aproximadamente 4,5%. O que evidencia boa correlação entre experimento e modelo.

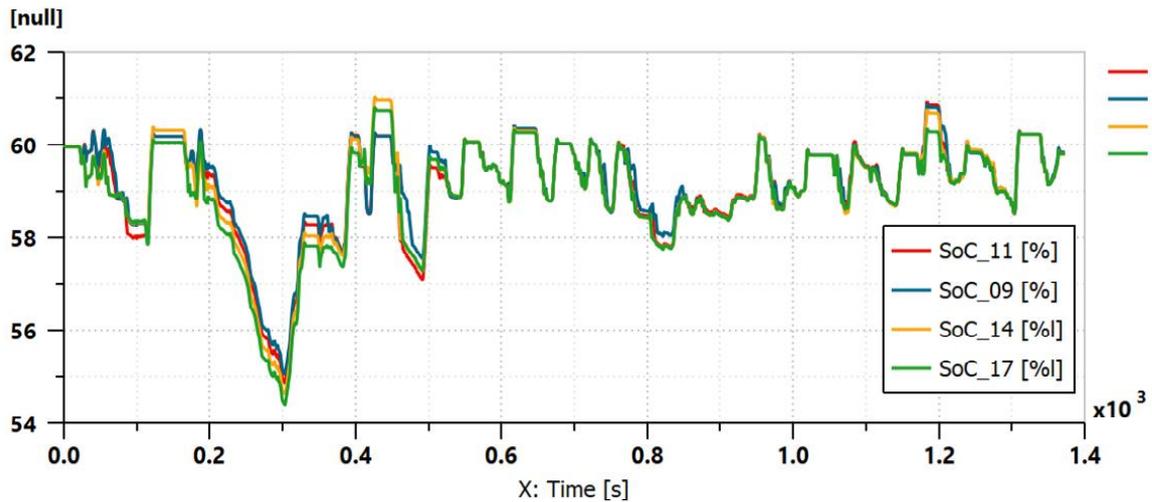
Diante da análise dos gráficos apresentados pode se atestar que o modelo representa com relativa precisão o comportamento do veículo, o que garante o atendimento dos requisitos de modelagem referentes ao comportamento do sistema. Dessa forma, os modelos desenvolvidos podem ser utilizado para prever o consumo de combustível e o desempenho do veículo estudado, portanto está apto a avaliar o sistema de controle.

5.2.3.4 Uso da Modelagem

Uma vez validados, os modelos podem ser utilizados para teste e otimização de parâmetros. Assim, para demonstrar o uso da modelagem, foi realizada uma análise de sensibilidade para analisar os efeitos de uma mudança na estratégia de controle referente à potência requerida nas rodas, que como foi visto, influencia os modos de operação.

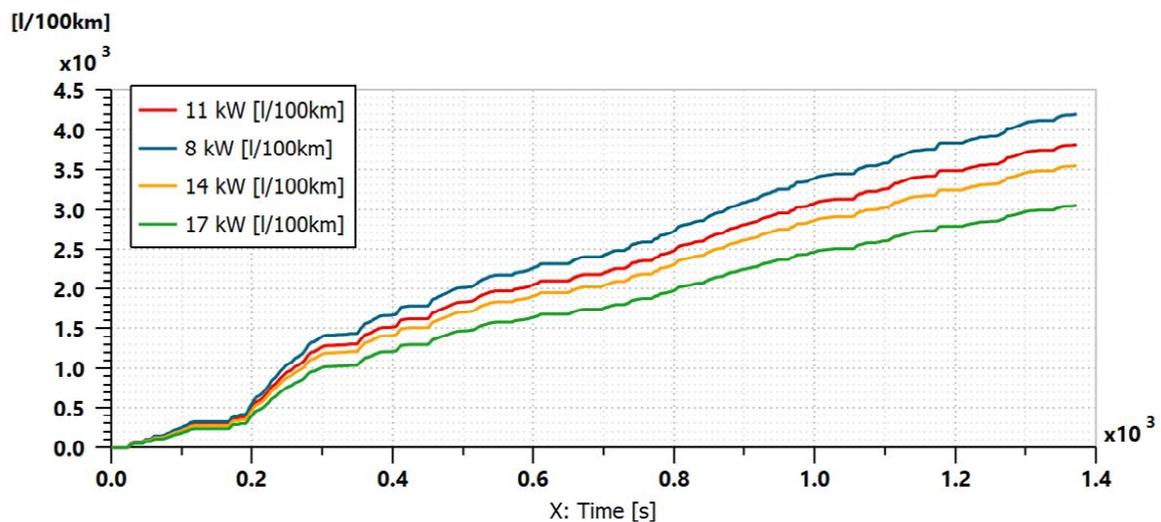
No THS-III, o valor limite para mudar do modo VE para o VEH (acionar MCI) é de

Figura 5.46 – Efeitos da potência mínima requerida no SoC da bateria



Fonte: Autor

Figura 5.47 – Efeitos da potência mínima requerida no consumo de combustível



Fonte: Autor

aproximadamente 11 kW (BURRESS et al., 2011), ou seja, a partir deste valor o MCI é solicitado para ajudar a propelir o veículo. Portanto, foram escolhidos parâmetros vizinhos para avaliar o impacto dessa variável no consumo de combustível. Os valores testados foram 8 kW, 14 kW e 17 kW.

Para efetuar o teste, foi preciso garantir que os valores iniciais e finais do SoC fossem semelhantes para cada caso, do contrário as comparações de consumo ficariam prejudicadas. A Figura 5.46 mostra a variação do SoC para cada valor de potência requerida, onde nota-se que os valores finais e iniciais ainda se encontram próximos de limites aceitáveis. Pode-se verificar também que quanto maior o limite de potência requerida, mais a bateria é utilizada.

A variação do consumo de combustível é mostrada na Figura 5.47, onde observa-se que o consumo de combustível melhora ao passo que o limite de potência aumenta. No entanto, à medida que os valores aumentam o MCI se distancia da sua faixa ótima de operação, o que pode resultar no aumento de emissões, ou do próprio consumo em outras condições de operação.

5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo descreveu o uso da sistemática proposta à modelagem orientada a controle de VEHs para predição do consumo de combustível, desde a análise de requisitos até a validação e utilização dos modelos. Além disso, foi apresentado no início uma descrição geral do Toyota Prius THS-III.

Por meio da aplicação da sistemática foi possível tratar um problema complexo, de forma relativamente rápida e estruturada, permitindo ao final a obtenção de modelos computacionais validados capazes de avaliar e testar estratégias de operação.

Os modelos foram utilizados para estudar o impacto da potência mínima requerida nas rodas para qual o MCI é acionado. A partir da análise do comportamento do veículo, foi possível entender como o consumo de combustível e o SoC da bateria são afetados, demonstrando a aplicabilidade da sistemática.

Foi possível notar que a manutenção do SoC é algo crítico em um VEH do tipo estudado, pois o descarregamento da bateria inviabilizaria o seu funcionamento. Assim, manter o veículo dentro de uma faixa segura de SoC é a principal tarefa do controle de supervisão, se sobrepondo à decisão de manter o veículo na faixa de operação ótima do MCI.

É importante ressaltar que leitura do consumo também pode ser usada para regular a razão de torque e manutenção do SoC. No entanto, essa função não foi contemplada, pois considera-se que sempre existe combustível suficiente para completar o ciclo.

6 CONCLUSÃO

Esta Dissertação apresentou uma contribuição à modelagem orientada para controle de operação em VEHs, estruturando assim o processo de criação dos modelos desde a análise de requisitos até validação e uso dos mesmos.

As motivações para abordar este tema são evidenciadas nos capítulos iniciais deste trabalho, onde são apresentados as questões ambientais, energéticas e políticas envolvidas na busca por tecnologias alternativas para os veículos automotores. Nesse cenário, os VEHs são colocados como a tecnologia mais viável e promissora atualmente frente aos seus concorrentes, os VEs e VECCs, que ainda são muito caros ou pouco desenvolvidos. Isto se deve principalmente às necessidades de se alcançar baixos níveis de emissões a curto e médio prazo.

No Capítulo 2, são introduzidos os principais conceitos acerca do tema central desta pesquisa: veículos elétricos híbridos e modelos de simulação. Sobre os VEHs, além de um breve histórico, foram estudados as classificações (quanto ao nível de hibridização e à configuração do trem de força), e seus desafios de desenvolvimento. A respeito do segundo tema, foram discutidos aprofundadamente a modelagem de sistemas e sua aplicação em VEHs.

O Capítulo 3 se destinou a apresentação das principais técnicas e ferramentas utilizadas na modelagem e controle dos veículos em estudo. Com isso, a proposta de sistemática é apresentada no capítulo seguinte, evidenciando os passos para a obtenção dos modelos de planta e controle devidamente verificados e validados.

No Capítulo 4, a proposta sistemática foi testada por meio de um estudo de caso no qual o modelo de um VEH com as características do Toyota Prius foi desenvolvido e validado frente a resultados experimentais.

Inicialmente, como determina a sistemática, o processo partiu da análise dos requisitos de modelagem, onde estes foram elencados e classificados em normativos, não funcionais e funcionais. Estes últimos foram organizados por ordem de prioridade utilizando o diagrama de Mudge. Os requisitos elencados e ordenados deram origem à folha de requisitos, que foi utilizada para auxiliar nas tomadas de decisão durante o processo, bem como para validação dos modelos.

Um modelo conceitual do veículo em estudo foi esboçado, onde foi evidenciado o fluxo energético no sistema, e as variáveis utilizadas no controle supervisorio. Em seguida, os dados referentes ao comportamento dos atuadores, bateria e controle foram coletados para então passar à etapa construção do modelo computacional.

Os modelos foram construídos de forma iterativa, onde a primeira versão contemplou o arranjo dos atuadores no PSD, e a segunda complementou a modelagem incluindo os efeitos da manutenção do SoC e da frenagem regenerativa. As ferramentas de modelagem utilizadas foram o Amesim (para a planta) e Matlab/simulink (para o controlador).

Os modelos foram verificados e validados recorrendo a comparação direta com os dados experimentais. Onde, apesar dos resultados da simulação evidenciarem boa correlação com sistema físico, atestou-se que ainda existe margem para, por meio de uma calibração

mais minuciosa, melhorar a correspondência com os dados de teste. As limitações referentes aos requisitos de tempo de desenvolvimento inviabilizaram maiores ajustes neste trabalho. No entanto, correspondência verificada foi suficiente para validar o comportamento dos modelos.

A aplicabilidade do processo foi verificada mediante um teste de parâmetro, onde foi avaliado os efeitos da potência mínima requerida nas rodas para qual o MCI é acionado. Como resultado, constatou-se que, a medida que parâmetro é acrescido, há uma leve diminuição no consumo de combustível, no entanto o MCI tende a funcionar fora da sua faixa de operação ótima.

Por fim, a sistemática proposta mostrou-se eficaz como ferramenta de auxílio na construção de modelos computacionais que permitam o desenvolvimento e o teste de estratégias de controle em VEHs.

6.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Apesar dos bons resultados alcançados neste trabalho, o assunto em questão permite várias outras abordagens. Dessa forma, são propostos como recomendação de trabalhos futuros os seguintes itens:

- Utilizar um modelo de MCI que contemple os efeitos de combustão para avaliar o impacto real das estratégia de controle também nas emissões, e comparar com as próximas previsões estabelecidas nas legislações.
- Otimizar a estratégia de controle heurístico utilizada no veículo estudado por meio de uma técnica de controle ótimo, como programação dinâmica ou algoritmos genéticos, e avaliar sua implementação em um veículo real.
- Tornar a sistemática proposta mais abrangente para a utilização das técnicas de verificação e validação do tipo *software-in-the-loop* e *hardware-in-the-loop*.

REFERÊNCIAS

- ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). *Veículos rodoviários automotores leves: Determinação de hidrocarbonetos, monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio, dióxido de carbono e material particulado no gás de escapamento*. Rio de Janeiro, 2012.
- BACK, N. et al. *Projeto Integrado de Produto: Planejamento, Concepção e Modelagem*. [S.l.]: Manole, 2008. ISBN 978-85-204-2208-3.
- BALCI, O. Verification validation and accreditation of simulation models. In: *Proceedings of the 29th Conference on Winter Simulation*. [S.l.]: IEEE Computer Society, 1997. (WSC '97), p. 135–141. ISBN 0-7803-4278-X.
- BALCI, O. Verification, validation, and testing. In: _____. *Handbook of Simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practices*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1998. (A Wiley-Interscience publication), p. 335–396. ISBN 0-471-13403-1.
- BANKS, J. Principles of simulation. In: _____. *Handbook of Simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practices*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1998. (A Wiley-Interscience publication), p. 3–30. ISBN 0-471-13403-1.
- BANKS, J. et al. *Discrete-Event System Simulation*. 5. ed. [S.l.]: Pearson, 2013. ISBN 1292024372,9781292024370.
- BASTIAN, J. et al. Master for co-simulation using fmi. In: *Proceedings of the 8th International Modelica Conference*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 115–120. ISBN 978-91-7393-096-3. ISSN 1650-3740.
- BAUMANN, B. M. et al. Mechatronic design and control of hybrid electric vehicles. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, v. 5, n. 1, p. 58–72, March 2000. ISSN 1083-4435.
- BERGGREN, C.; MAGNUSSON, T. Reducing automotive emissions: The potentials of combustion engine technologies and the power of policy. *Energy Policy*, v. 41, p. 636 – 643, 2012. ISSN 0301-4215. Modeling Transport (Energy) Demand and Policies. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421511009025>>.
- BEZERRA, E. *Princípios de Análise e Projeto de Sistemas com UML*. 3. ed. [S.l.]: Elsevier Brasil, 2015. 416 p. ISBN 8535226273, 9788535226270.
- BNDES (BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL). *Panoramas Setoriais: Mudanças Climáticas*. [S.l.], 2016. Disponível em: <www.bndes.gov.br/bibliotecadigital>.
- BURRESS, T. A. et al. Evaluation of the 2010 toyota prius hybrid synergy drive system. U.S. Department of Energy, Oak Ridge National Laboratory, 03 2011.
- CARSON, J. S. Introduction to modeling and simulation. In: *Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference*. [S.l.: s.n.], 2004. v. 1, p. 16.
- CASSANDRAS, C. G.; LAFORTUNE, S. *Introduction to Discrete Event Systems*. 2. ed. [S.l.]: Springer, 2010. 772 p. ISBN 9781441941190,1441941193.
- CHAN, C. C. The state of the art of electric and hybrid vehicles. *Proceedings of the IEEE*, v. 90, n. 2, p. 247–275, 2002. ISSN 0018-9219.

- CHAN, C. C. The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicles. *Proceedings of the IEEE*, v. 95, n. 4, p. 704–718, April 2007. ISSN 0018-9219.
- CHEHRESAZ, M. *Modeling and Design Optimization of Plug-In Hybrid Electric Vehicle Powertrains*. Dissertação (Master of Applied Science in Systems Design Engineering) — University of Waterloo (UW), Waterloo, Ontario, Canada, 2013.
- CLAESKENS, G.; HJORT, N. L. *Model Selection and Model Averaging*. 1. ed. [S.I.]: Cambridge University Press, 2008. (Cambridge Series in Statistical and Probabilistic Mathematics). ISBN 0521852250,9780521852258,9780511424106.
- DEBERT, M.; YHAMAILLARD, G.; KETFI-HERIFELLICAUD, G. A. Predictive energy management for hybrid electric vehicles - prediction horizon and battery capacity sensitivity. *IFAC Proceedings Volumes*, v. 43, n. 7, p. 270 – 275, 2010. ISSN 1474-6670. 6th IFAC Symposium on Advances in Automotive Control.
- DELPRAT, S. et al. Control of a parallel hybrid powertrain: optimal control. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 53, n. 3, p. 872–881, May 2004. ISSN 0018-9545.
- DENIS, N. et al. Power split strategy optimization of a plug-in parallel hybrid electric vehicle. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 67, n. 1, p. 315–326, Jan 2018. ISSN 0018-9545.
- DIAMOND, D. The impact of government incentives for hybrid-electric vehicles: Evidence from us states. *Energy Policy*, v. 37, n. 3, p. 972 – 983, 2009. ISSN 0301-4215.
- EEA (EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY). *Monitoring CO₂ emissions from new passenger cars and vans in 2016*. [S.I.], 2017. Disponível em: <<https://www.eea.europa.eu/publications/co2-emissions-new-cars-and-vans-2016>>.
- EHSANI, M. et al. *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles*. [S.I.]: CRC Press, 2018.
- EHSANI, M.; GAO, Y.; MILLER, J. M. Hybrid electric vehicles: Architecture and motor drives. *Proceedings of the IEEE*, v. 95, n. 4, p. 719–728, April 2007. ISSN 0018-9219.
- EMSHOFF, J. R.; SISSON, R. L. *Design and Use of Computer Simulation Models*. 1. ed. [S.I.]: Macmillan, 1970. 302 p. ISBN 1114248495, 978-1114248496.
- EUROPEAN COMMISSION. *Reducing CO₂ emissions from passenger cars*. [S.I.], 2016. Disponível em: <https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050_en>.
- EUROPEAN COMMISSION. *CO₂ standards for new cars and vans*. [S.I.], 2018. Disponível em: <<http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2018/614689>>.
- GAO, D. W.; MI, C.; EMADI, A. Modeling and simulation of electric and hybrid vehicles. *Proceedings of the IEEE*, v. 95, n. 4, p. 729–745, 2007. ISSN 0018-9219.
- GAVIRA, M. d. O. *Simulação Computacional como uma Ferramenta de Aquisição de Conhecimento*. Dissertação (Mestre em Engenharia de Produção) — Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC-USP), São Carlos - SP, 2003.
- GILLESPIE, T. *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. [S.I.]: Society of Automotive Engineers (SAE), 1992. (Premiere Series Bks). ISBN 9781560911999.
- GOMES, C. et al. Co-simulation: A survey. *ACM Computing Surveys*, v. 51, 05 2018.

- GURUSUBRAMANIAN, B. S. *A Comprehensive Process for Automotive Model-Based Control*. Dissertação (Master of Applied Science in Mechanical Engineering) — Ohio State University (OSU), 2013.
- GUZZELLA, L.; SCIARRETTA, A. *Vehicle Propulsion Systems: Introduction to Modeling and Optimization*. [S.l.]: Springer, 2013.
- HEYWOOD, J. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. 1. ed. [S.l.]: McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 1988. ISBN 007028637X,9780070286375.
- IEA (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY). *Key world energy statistics*. [S.l.], 2017.
- JOHNSON, V. H.; WIPKE, K. B.; RAUSEN, D. J. Hev control strategy for real-time optimization of fuel economy and emissions. In: *SAE Technical Paper*. [S.l.]: SAE International, 2000.
- KIM, N.; ROUSSEAU, A.; RASK, E. Autonomie model validation with test data for 2010 toyota prius. SAE International, n. 4, 4 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.4271/2012-01-1040>>.
- LABORATORY, A. N. *Downloadable Dynamometer Database*. 2018. Disponível em: <<https://www.anl.gov/topic/downloadable-dynamometer-database>>. Acesso em: 03.12.2018.
- LANGARI, R.; WON, J.-S. Intelligent energy management agent for a parallel hybrid vehicle-part i: system architecture and design of the driving situation identification process. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 54, n. 3, p. 925–934, May 2005. ISSN 0018-9545.
- LAW, A. M. *Simulation Modeling and Analysis*. 5. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 2015. ISBN 978-0-07-340132-4.
- LEE, H.-D.; SUL, S.-K. Fuzzy-logic-based torque control strategy for parallel-type hybrid electric vehicle. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 45, n. 4, p. 625–632, Aug 1998. ISSN 0278-0046.
- LI, Y.; CHEN, B. Development of integrated rule-based control and equivalent consumption minimization strategy for hev energy management. In: *2016 12th IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications (MESA)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–6.
- LIN, C.-C. et al. Driving pattern recognition for control of hybrid electric trucks. *Vehicle System Dynamics - VEH SYST DYN*, v. 42, p. 41–58, 12 2004.
- LIN, C.-C. et al. Power management strategy for a parallel hybrid electric truck. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, v. 11, n. 6, p. 839–849, Nov 2003. ISSN 1063-6536.
- LIU, W. *Hybrid electric vehicle system modeling and control*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2017.
- LOBAO, E. d. C.; PORTO, A. J. V. Evolução das técnicas de simulação. *Production*, Scielo, v. 9, p. 13 – 21, 06 1999. ISSN 0103-6513.
- LORENZ, P. Models and modeling. In: _____. *Simulation and Animation*. Boca Raton, Florida: CRC Press LLC, 2004. cap. 1. ISBN 0-8493-1586-7.
- MATHWORKS. *Matlab/Simulink Description*. 2017. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/products/simulink.html>>. Acesso em: 26.12.2018.
- MATHWORKS. *Hybrid-Electric Vehicle Model in Simulink*. 2018. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/28441-hybrid-electric-vehicle-model-in-simulink>>. Acesso em: 26.12.2018.

- MATHWORKS. *Explore the Hybrid Electric Vehicle Input Power-Split Reference Application*. 2019. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/help/autoblks/ug/explore-the-hybrid-electric-vehicle-input-power-split-reference-application.html>>. Acesso em: 01.12.2019.
- MENNER, W. A. Introduction to modeling and simulation. *Johns Hopkins APL Technical Digest*, v. 16, n. 1, p. 6–17, 1995.
- MILLER, J. M. *Propulsion Systems for Hybrid Vehicles*. [S.l.]: The Institution of Engineering and Technology, 2010.
- MONTAZERI-GH, M.; POURSAMAD, A.; GHALICHI, B. Application of genetic algorithm for optimization of control strategy in parallel hybrid electric vehicles. *Journal of the Franklin Institute*, v. 343, n. 4, p. 420 – 435, 2006. ISSN 0016-0032. Modeling, Simulation and Applied Optimization.
- MUSARDO, C. et al. A-ecms: An adaptive algorithm for hybrid electric vehicle energy management. *European Journal of Control*, v. 11, n. 4, p. 509 – 524, 2005. ISSN 0947-3580.
- NAYLOR, T. et al. *Computer Simulation Techniques*. [S.l.]: Wiley, 1966.
- NICKEL, E. M. et al. Modelo multicritério para Referência na Fase de Projeto Informacional do Processo de Desenvolvimento de Produtos. *Gestão & Produção*, Scielo, v. 17, p. 707 – 720, 12 2010. ISSN 0104-530X.
- OICA. *Economic Contributions of Automotive Sector*. 2015. Disponível em: <<http://www.oica.net/category/economic-contributions/>>. Acesso em: 02.12.2018.
- OICA. *Vehicles in Use (2005-2017)*. 2017. Disponível em: <<http://www.oica.net/category/vehicles-in-use/>>. Acesso em: 02.12.2018.
- ONORI, S.; SERRAO, L.; RIZZONI, G. *Hybrid Electric Vehicles: Energy Management Strategies*. [S.l.]: Springer, 2016.
- PACE, D. K. Verification, validation, and accreditation of simulation models. In: _____. *Applied System Simulation: Methodologies and Applications*. [S.l.]: Springer US, 2003. p. 487–506. ISBN 978-1-4419-9218-5.
- PAGANELLI, G. et al. Equivalent consumption minimization strategy for parallel hybrid power-trains. In: *Vehicular Technology Conference. IEEE 55th Vehicular Technology Conference. VTC Spring 2002 (Cat. No.02CH37367)*. [S.l.: s.n.], 2002. v. 4, p. 2076–2081 vol.4.
- PAHL, G. et al. *Engineering design: a systematic approach*. 3rd. ed. [S.l.]: Springer Verlag, 2007.
- PHILLIPS, A. M.; JANKOVIC, M.; BAILEY, K. E. Vehicle system controller design for a hybrid electric vehicle. In: *Proceedings of the 2000. IEEE International Conference on Control Applications. Conference Proceedings (Cat. No.00CH37162)*. [S.l.: s.n.], 2000. p. 297–302.
- PICCOLO, A. et al. Optimisation of energy flow management in hybrid electric vehicles via genetic algorithms. In: *2001 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Proceedings (Cat. No.01TH8556)*. [S.l.: s.n.], 2001. v. 1, p. 434–439 vol.1.
- PISU, P.; KOPRUBASI, K.; RIZZONI, G. Energy management and drivability control problems for hybrid electric vehicles. In: *Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control*. [S.l.: s.n.], 2005. p. 1824–1830. ISSN 0191-2216.

- PISU, P. et al. A lmi-based supervisory robust control for hybrid vehicles. In: *Proceedings of the 2003 American Control Conference, 2003*. [S.l.: s.n.], 2003. v. 6, p. 4681–4686 vol.6. ISSN 0743-1619.
- PRITSKER, A. Principles of simulation and modeling. In: _____. *Handbook of Simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practices*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1998. (A Wiley-Interscience publication), p. 31–51. ISBN 0-471-13403-1.
- RAJAGOPALAN, A.; RIZZONI, G.; GUEZENNEC, Y. Development of fuzzy logic and neural network control and advanced emissions modeling for parallel hybrid vehicles. 01 2001.
- RASK, E. et al. Model year 2010 (gen 3) toyota prius level-1 testing report. U.S. Department of Energy, Argonne National Laboratory, 09 2010.
- RICARDO SOFTWARE. *IGNITE User Manual*. 2017.1. ed. [S.l.], Dec 2017.
- SALMASI, F. R. Designing control strategies for hybrid electric vehicles. In: *Tutorial Presentation EuroPes*. Benalmadena, Spain: [s.n.], 2005.
- SALMASI, F. R. Control strategies for hybrid electric vehicles: Evolution, classification, comparison, and future trends. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 56, n. 5, p. 2393–2404, Sept 2007. ISSN 0018-9545.
- SCHMIDT, J.; TAYLOR, R. E. *Simulation and Analysis of Industrial Systems*. 1. ed. [S.l.]: Richard D. Irwin, 1970.
- SCIARRETTA, A.; GUZZELLA, L. Fuel-optimal control of rendezvous maneuvers for passenger cars. *Automatisierungstechnik*, v. 53, p. 244–250, 01 2005.
- SERRAO, L.; ONORI, S.; RIZZONI, G. Ecms as a realization of pontryagin’s minimum principle for hev control. In: *2009 American Control Conference*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 3964–3969. ISSN 0743-1619.
- SHABBIR, W.; ARANA, C.; EVANGELOU, S. A. Series hybrid electric vehicle supervisory control based on off-line efficiency optimization. In: *2012 IEEE International Electric Vehicle Conference*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 1–5.
- SIEMENS PLM SOFTWARE. *Simcenter Amesim 17: Reference guide*. 1. ed. [S.l.], 2017.
- SILVA, H. V. d. R. C. *Representações computacionais auxiliares ao entendimento de conceitos de programação*. Tese (Doutor em Engenharia de Elétrica) — Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas - SP, 1991.
- SPERLING, D.; GORDON, D. *Two Billion Cars: Driving Toward Sustainability*. Oxford University Press, 2009. Disponível em: <<https://EconPapers.repec.org/RePEc:oxp:obooks:9780195376647>>.
- SUNDSTROM, O.; GUZZELLA, L. A generic dynamic programming matlab function. In: *2009 IEEE Control Applications, (CCA) Intelligent Control, (ISIC)*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 1625–1630. ISSN 1085-1992.
- TATE, E.; BOYD, S. P. Finding ultimate limits of performance for hybrid electric vehicles. *SAE Paper*, 2000.
- TOMIYAMA, T. et al. Metamodel: A key to intelligent cad systems. *Research in Engineering Design*, v. 1, n. 1, p. 19–34, Mar 1989. ISSN 1435-6066.

- TOYOTA. *The Prius Story*. 2015. Disponível em: <<https://www.toyota-europe.com/world-of-toyota/articles-news-events/the-prius-story>>. Acesso em: 03.02.2019.
- TOYOTA MOTOR. *Toyota Prius ZVW30: Hybrid vehicle dismantling manual*. [S.l.], 2009.
- ULRICH, K. T.; EPPINGER, S. D. *Product Design and Development*. [S.l.]: McGraw-Hill Higher Education, 2003.
- UNEP (UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME). *The Emissions Gap Report 2017*. 17th. ed. Nairobi, 2017.
- WAKEFIELD, E. *History of the Electric Automobile: Battery-only Powered Cars*. [S.l.]: Society of Automotive Engineers (SAE), 1994. ISBN 1-56091-299-5.
- WAKEFIELD, E. *History of the Electric Automobile: Hybrid Electric Vehicles*. [S.l.]: Society of Automotive Engineers (SAE), 1998. ISBN 0-7680-0125-0.
- WIPKE, K. B.; CUDDY, M. R.; BURCH, S. D. Advisor 2.1: a user-friendly advanced powertrain simulation using a combined backward/forward approach. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 48, n. 6, p. 1751–1761, Nov 1999. ISSN 0018-9545.
- YANG, J.; BAUMAN, J.; BEYDOUN, A. Requirement analysis and development using matlab models. *SAE Int. J. Passeng. Cars Electron. Electr. Syst.*, SAE International, v. 2, p. 430–437, 4 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.4271/2009-01-1548>>.
- ZENG, X.; WANG, J. *Analysis and Design of the Power-Split Device for Hybrid Systems*. 1. ed. [S.l.]: Springer Singapore, 2018. ISBN 978-981-10-4270-6, 978-981-10-4272-0.
- ZHAO, J. Research and application of over-expansion cycle (atkinson and miller) engines - a review. *Applied Energy*, v. 185, p. 300 – 319, 2017. ISSN 0306-2619. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261916315069>>.

APÊNDICE A – FERRAMENTAS DE MODELAGEM VEICULAR

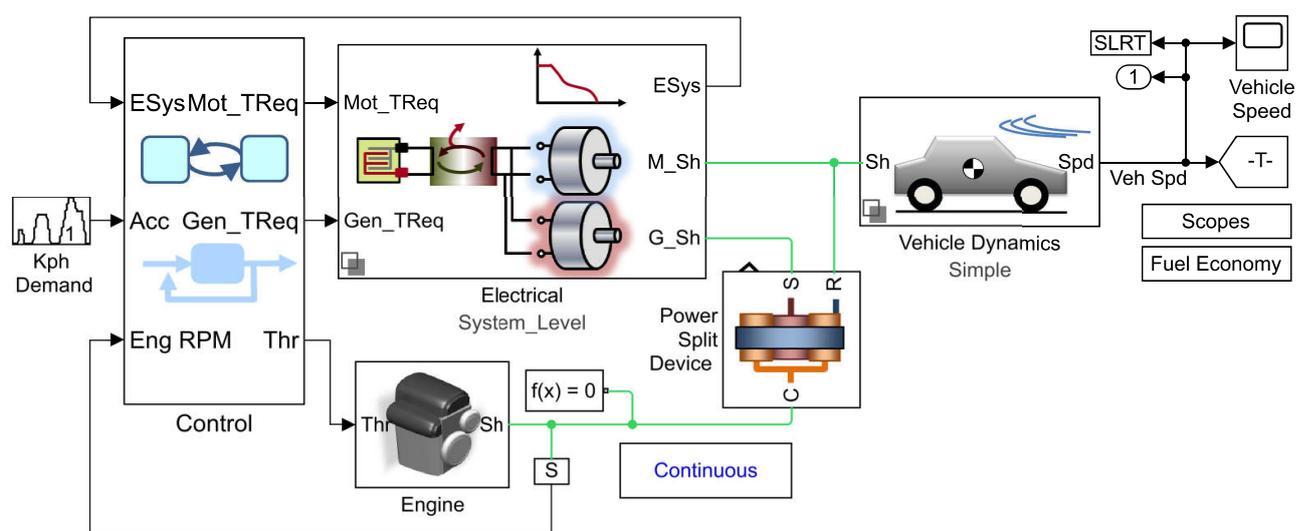
A.1 MATLAB/SIMULINK

Desenvolvido pela *MathWorks*, o *Matrix Laboratory* (MatLab) é um software que integra as capacidades de cálculos algébricos, visualização gráfica e programação em um único ambiente. Este possui vários pacotes ou módulos que agrupam funções de diferentes aplicações, dentre eles o Simulink, uma ferramenta de diagramação gráfica por blocos para modelagem, simulação e análise de sistemas dinâmicos (YANG; BAUMAN; BEYDOUN, 2009).

O Matlab juntamente com o Simulink compõem uma poderosa ferramenta que tem sido amplamente utilizada principalmente em aplicações de teoria de controle e processamento digital de sinais para projeto e simulação multi-domínio (MATHWORKS, 2017).

Na indústria automotiva, especificamente o Matlab/Simulink, tem sido utilizado na construção de modelos precisos de planta e controle dos mais variados tipos de veículos. Por exemplo, a Figura A.1 traz o modelo de um de VEH série/paralelo construído no Matlab/Simulink.

Figura A.1 – Modelo de um VEH série/paralelo no Matlab/simulink



Fonte: Adaptado de Mathworks (2018)

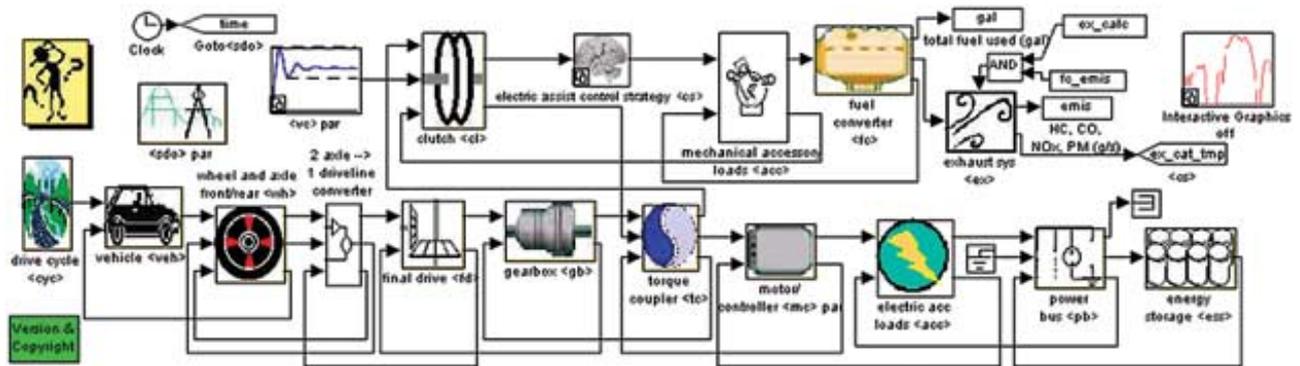
Devido a capacidade de programação e por ser um software largamente utilizado em todo o mundo, o Matlab/Simulink é também utilizado como plataforma para o desenvolvimento de simuladores automotivos dedicados, como o Advisor e o Autonomie que serão explicados a seguir.

A.2 ADVISOR

O Advisor (*Advanced Vehicle Simulator*) é uma ferramenta de modelagem e simulação do tipo *backward* desenvolvida pelo *U.S. National Renewable Energy Laboratory* (NREL) para análise de desempenho, economia de combustível e emissões em veículos convencionais, elétricos e híbridos.

Este simulador se utiliza da plataforma Matlab/Simulink para construção dos seus modelos na forma de diagramas de blocos associados à *scripts* (arquivos .m). Os usuário podem utilizar os modelos contidos em um biblioteca e altera-los conforme as necessidades da modelagem (GAO; MI; EMADI, 2007). A Figura A.2 mostra o exemplo de um VEH em paralelo modelado no Advisor.

Figura A.2 – Modelo de um VEH no Advisor



Fonte: Adaptado de Gao, Mi e Emadi (2007)

A.3 AUTONOMIE

O Autonomie é uma plataforma de simulação do tipo *forward* desenvolvida pelo *Argonne National Laboratory* (ANL) em colaboração com a General Motors, sendo uma atualização do descontinuado *Argonne National Laboratory* (PSAT) (GAO; MI; EMADI, 2007).

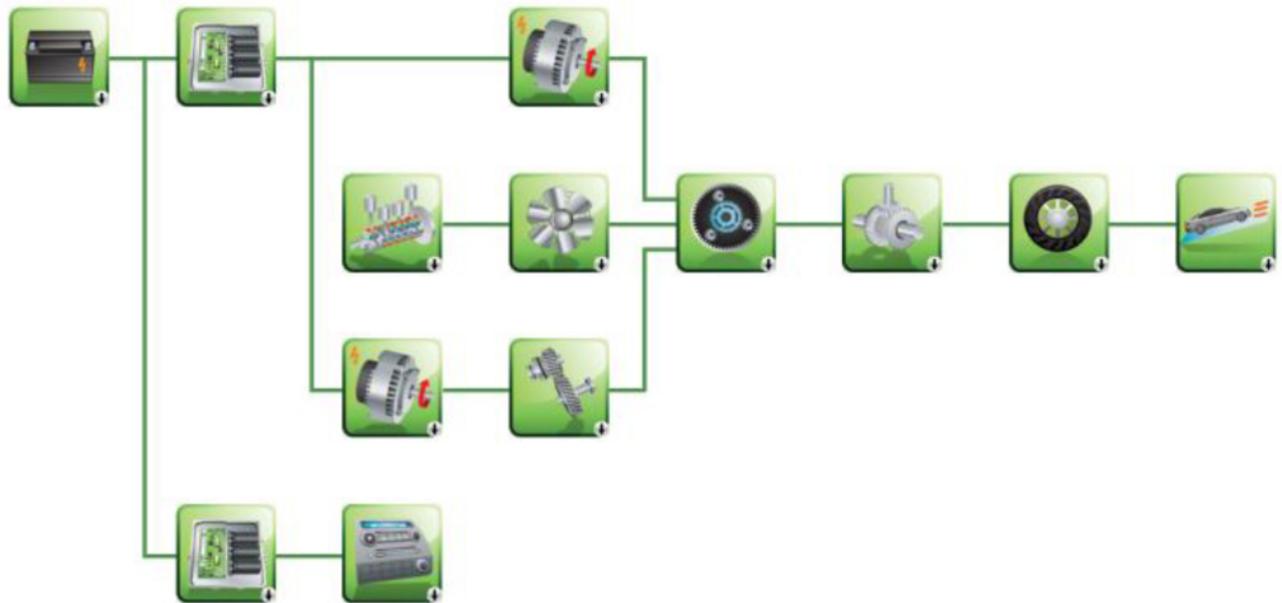
Esta ferramenta de projeto, simulação e análise de sistema de controle automotivo é desenvolvida em ambiente MATLAB/Simulink, e sua aplicação abrange o consumo de energia, análise de desempenho em todo o processo de desenvolvimento de veículos. O Autonomie ainda conta com uma vasta biblioteca que possui centenas de modelos de veículos que foram testados pelo ANL, que vão desde veículos convencionais até os elétricos puros. A figura A.3 traz a ilustração de um VEH modelado no autonomie.

A.4 RICARDO IGNITE

O IGNITE faz parte de um pacote de ferramentas chamada Ricardo Suite comercializadas pela Ricardo Softwares. Esta é uma plataforma de modelagem e simulação dinâmica (*forward*) de sistemas automotivos que fornece ao usuário meios para uma análise eficiente das interações entre os componentes do sistema, onde pode-se estudar o comportamento do veículo e tirar conclusões a cerca da seu desempenho, economia de combustível e emissões de poluentes .

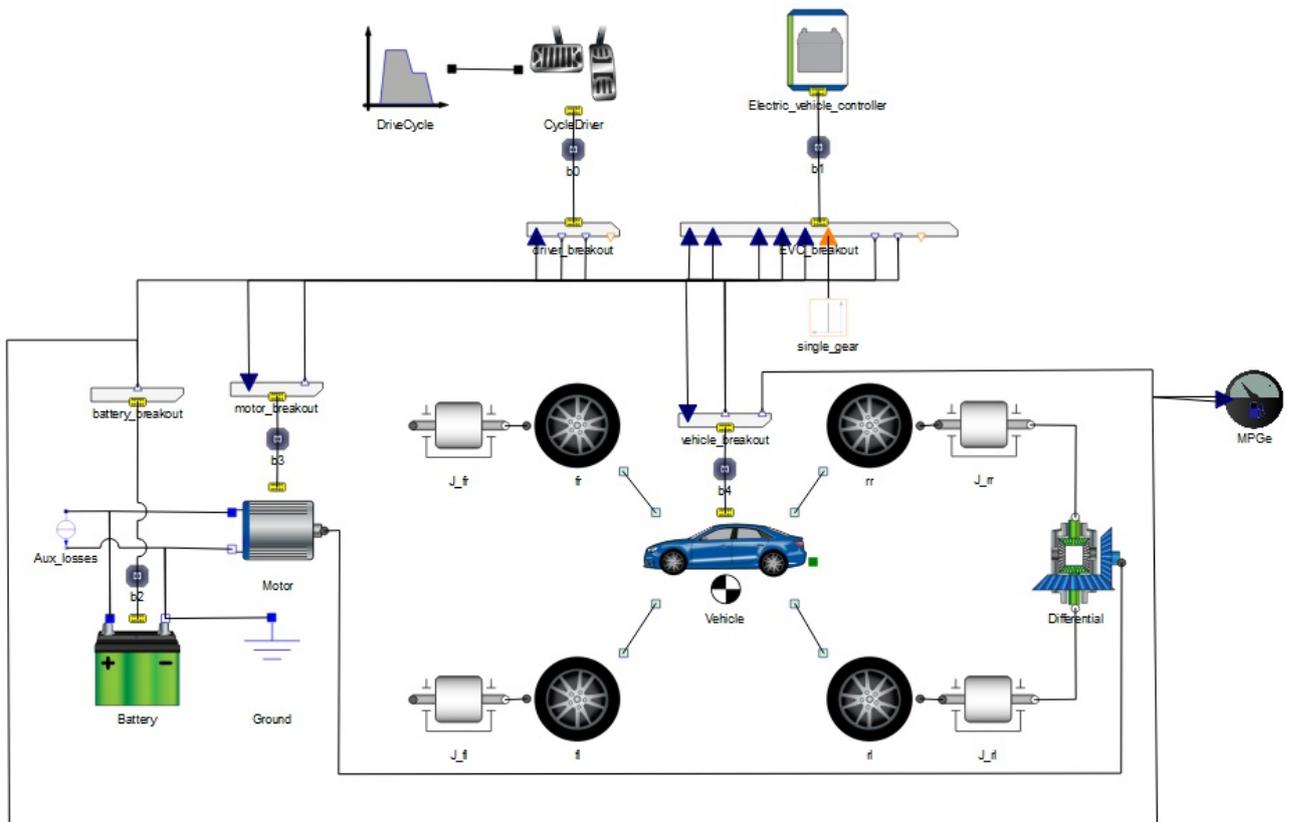
O IGNITE possui uma extensa biblioteca de componentes que permite a criação de modelos precisos, além de permitir co-simulação com outros softwares tal como Matlab/Simulink (RICARDO SOFTWARE, 2017). A Figura A.4 traz o exemplo do modelo de VEB no IGNITE.

Figura A.3 – Modelo de um VEH no Autonomie



Fonte: Adaptado de Kim, Rousseau e Rask (2012)

Figura A.4 – Modelo de um VEB no IGNITE



Fonte: Adaptado de Ricardo Software (2017)

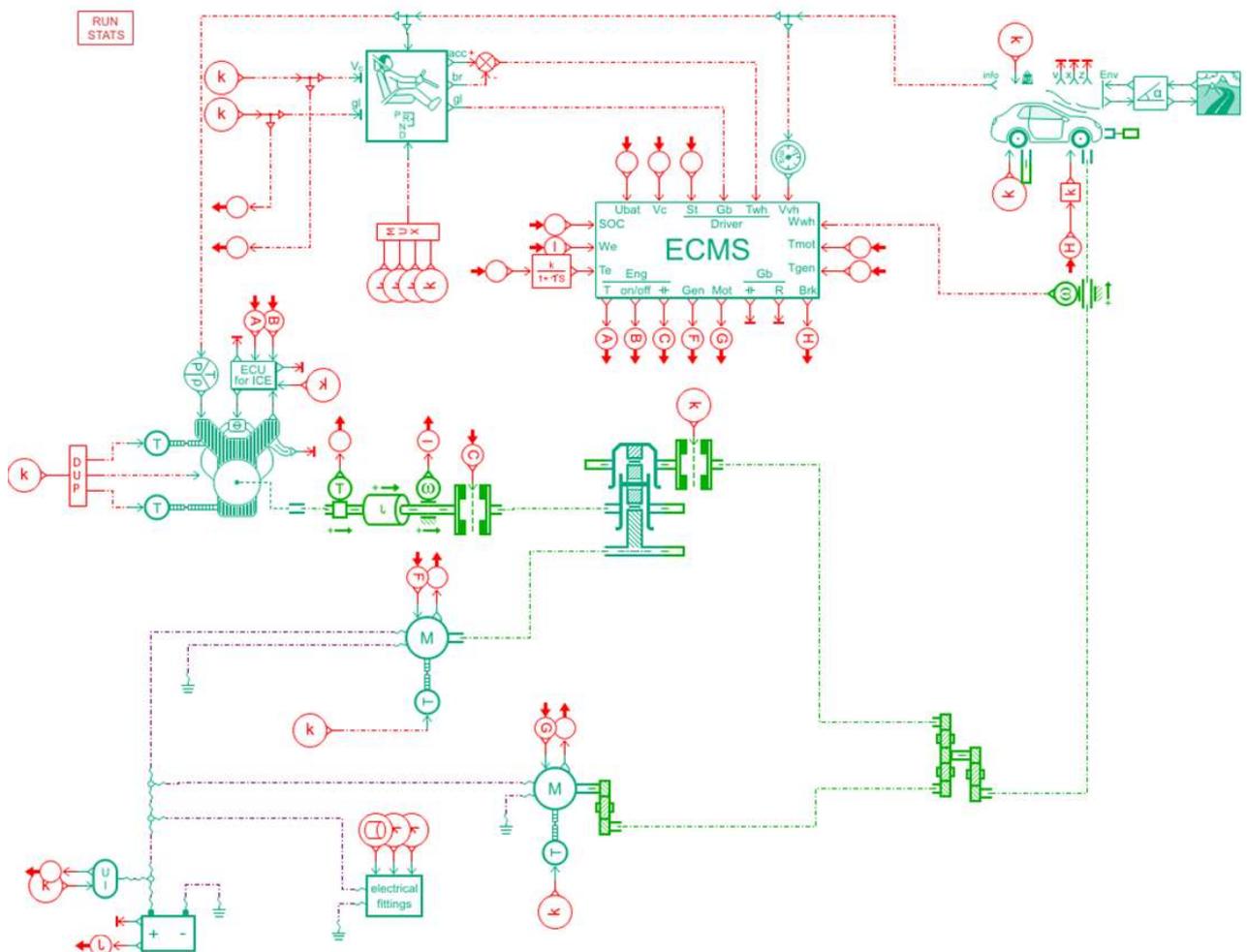
A.5 SIMCENTER AMESIM

Diferentemente dos softwares apresentados até aqui, que utilizam um fluxo de sinal como método de interação entre os componentes, o Simcenter Amesim utiliza para este mesmo fim "grafos de ligação"(do inglês *Bond Graphs*) (SIEMENS PLM SOFTWARE, 2017).

Neste método a interação entre os componentes acontece via fluxo de potência, onde um sistema físico é representado por elementos passivos básicos capazes de intercambiar potência: resistências (R), capacitâncias (C) e inércias (I). Embora esses termos sugiram uma aplicação direta em sistemas elétricos, eles são usados em quaisquer outros domínios (GAO; MI; EMADI, 2007).

Assim como o Matlab/Simulink, esta ferramenta é utilizada em vários domínios da engenharia, possuindo um conjunto de bibliotecas abrangente de componentes que permite ao usuário construir modelos complexos e realizar simulações de forma eficiente, alcançando rapidamente o objetivo final de modelagem: analisar e otimizar o projeto (ZENG; WANG, 2018). A figura A.5 mostra um VHE do tipo série/paralelo modelado no ambiente simcenter Amesim.

Figura A.5 – Modelo de um VEH série/paralelo no Simcenter Amesim



Fonte: Autor

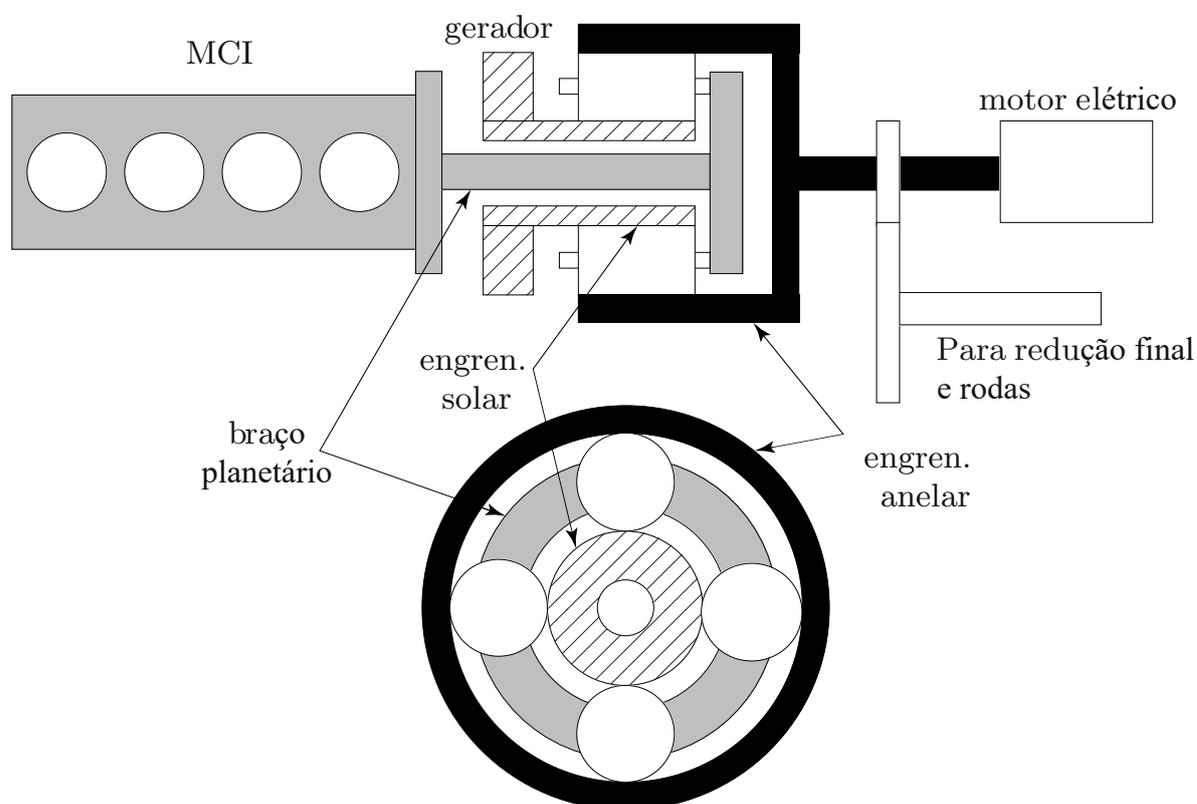
APÊNDICE B – ANÁLISE QUASE-ESTÁTICA E DINÂMICA DE UM CONJUNTO PLANETÁRIO

Como foi ressaltado no Capítulo 3, os componentes do trem de força podem ser modelados de forma quase-estática ou dinâmica. Dessa forma, para exemplificar as duas abordagens, é apresentado a seguir uma análise para um conjunto planetário a partir das perspectivas quase-estática e dinâmica segundo Guzzella e Sciarretta (2013) e Onori, Serrao e Rizzoni (2016) .

B.1 DISPOSITIVO DE DIVISÃO DE ENERGIA

Um conjunto planetário é formado por três elementos rotativos, as engrenagens anelar, solar e um braço planetário no qual estão conectadas as engrenagens satélites. Em VEHs, este componente é frequentemente utilizado como um dispositivo de divisão de energia (PSD, do inglês *Power Split Device*), com a função de controlar potência que é entregue às rodas, distribuindo-a adequadamente entre os caminhos mecânico e elétrico. A Figura B.1 representa uma o trem de força de um VEH complexo utilizando um PSD como divisor de energia. Neste arranjo típico o MCI é conectado ao braço planetário, enquanto o motor elétrico de tração e o gerador são conectados às engrenagens solar e anelar, respectivamente.

Figura B.1 – Configuração típica de um PSD em um VEH



De acordo com Guzzella e Sciarretta (2013), um conjunto planetário pode ser considerado como um engrenamento comum com o braço planetário intermediando os dois elementos dos extremos. Dessa forma, a razão de transmissão (z) no componente, e sua correlação com as velocidades relativas das engrenagens são, respectivamente, descritas conforme as equações B.1 e B.2:

$$z = \frac{n_s}{n_a} \tag{B.1}$$

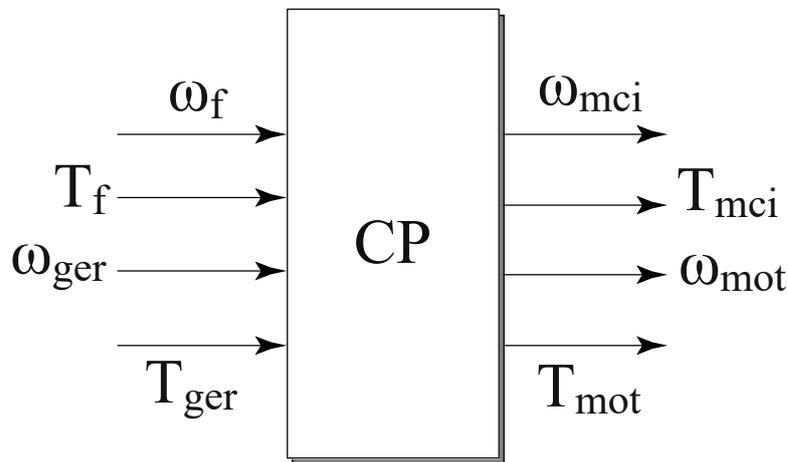
$$\frac{\omega_a - \omega_p}{\omega_s - \omega_p} = -z \tag{B.2}$$

onde, ω representa a rotação e n o numero de dentes das engrenagens, e os subscritos a, p e s correspondem às engrenagens anelar, satélite (braço planetário) e solar, respectivamente.

B.2 MODELAGEM QUASE-ESTÁTICA PARA UM PSD

A representação da causalidade quase-estática em um conjunto planetário atuando como PSD pode ser visualizada na Figura B.2. As entradas correspondem aos torques e às rotações dos eixos do gerador (ω_{ger} e T_{ger}), e da redução final (ω_{rf} e T_{rf}). As saídas correspondem aos torques e rotações dos eixos que ligam o componente aos atuadores que fornecem potência para deslocamento do veículo, o MCI (ω_{mci} e T_{mci}), e motor elétrico (ω_{mot} e T_{mot}).

Figura B.2 – Representação da causalidade para a modelagem quase-estática de um conjunto planetário



Fonte: Adaptado de Guzzella e Sciarretta (2013)

Na configuração apresentada na Figura B.1, ω_a, ω_p e ω_s corresponde às rotações do motor elétrico, MCI e gerador, nesta ordem. Assim, a Equação B.2 pode ser rescrita da seguinte forma:

$$\omega_{mci} = \frac{z\omega_{ger} + \omega_{rf}}{1 + z} \tag{B.3}$$

Nesta configuração, nota-se também que:

$$\omega_{mot} = \omega_{rf} \quad (B.4)$$

O balanço de potência aplicado às interfaces do modelo quase-estático pode ser expressado conforme a equação B.5.

$$T_{rf}\omega_{rf} + T_{ger}\omega_{ger} = T_{mci}\omega_{mci} + T_{mot}\omega_{mot} \quad (B.5)$$

Combinado as Equações B.3 e B.4 obtém-se:

$$T_{mot} = T_{rf} - \frac{T_{ger}}{z} \quad (B.6)$$

$$T_{mci} = \frac{1+z}{z}T_{ger} \quad (B.7)$$

que completam as equações necessárias para a modelagem quase-estática para um PSD.

Assumindo que a rotação de saída (ω_{rf}) pode ser substituída pela sua correlação com a velocidade do veículo (v), o raio das rodas tracionadas (R_{rd}) e a relação de transmissão final (r_f), a Equação B.3 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\omega_{mci} = \frac{z}{1+z}\omega_{ger} + \frac{r_f}{1+z}\frac{v}{R_{rd}} \quad (B.8)$$

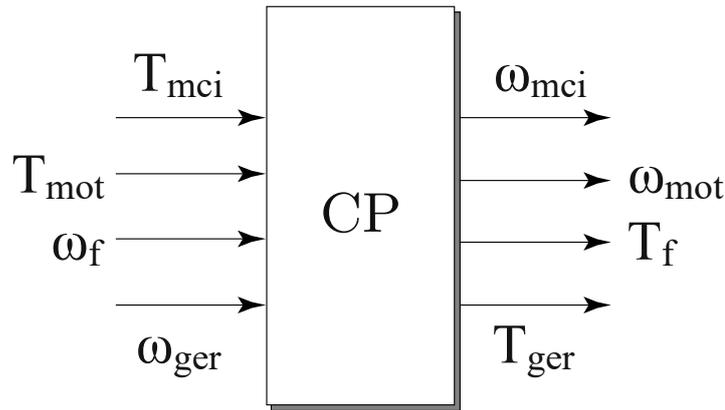
A partir da Equação B.8 pode-se chegar a conclusão de que a rotação do MCI pode assumir qualquer valor¹ independentemente da velocidade do veículo, isto variando apenas a rotação no gerador. Esta peculiaridade faz com que a aplicação de um conjunto planetário, utilizando este tipo de arranjo, seja também conhecida como transmissão continuamente variável controlada eletronicamente (E-CVT, do inglês *Electrically Continuously Variable Transmission*) apontando sua similaridade com a tecnologia CVT utilizada em veículos convencionais. De fato, ambas realizam um transmissão sem um relação fixa, diferenciando-se apenas pela forma como alcançam este efeito (ONORI; SERRAO; RIZZONI, 2016).

B.3 MODELAGEM DINÂMICA DE UM CONJUNTO PLANETÁRIO

A representação da modelagem dinâmica para uma PSD é mostrada na Figura B.3, esta representa a causalidade física de um PSD. As variáveis de entrada são os torques nos atuadores que fornecem potência para deslocamento do veículo, T_{mci} e T_{mot} , e as rotações correspondentes nos eixos de carregamento, (ω_{rf} e ω_{ger}). As variáveis de saídas são às rotações dos atuadores de potência, ω_{mci} e ω_{mot} , e os torques nos eixos de carregamento, T_{ger} e T_{rf} .

¹ Dentro da faixa de operação admissível do MCI.

Figura B.3 – Representação da causalidade para a modelagem dinâmica de um conjunto planetário



Fonte: Adaptado de Guzzella e Sciarretta (2013)

As Equações B.3 a B.4 ainda são válidas para um modelo dinâmico de um PSD. Mas devido as mudanças nas interfaces, e à inclusão dos efeitos da inércia rotacional das engrenagens, as equações B.6 e B.7 são substituídas por equações mais abrangentes:

$$T_{rf} = T_{mot} + \frac{1}{1+z}T_{mci} - \dot{\omega}_{ger}\left(\frac{z\Theta_p}{(1+z)^2} - \dot{\omega}_{rf}\left(\frac{\Theta_p}{(1+z)^2}\right) + \Theta_a\right) \quad (B.9)$$

$$T_{ger} = \frac{z}{1+z}T_{mci} - \dot{\omega}_{ger}\left(\frac{z^2\Theta_p}{(1+z)^2} + \Theta_s\right) - \dot{\omega}_{rf}\frac{z\Theta_p}{(1+z)^2} \quad (B.10)$$

onde, Θ representa o momento de inércia das engrenagens de acordo com o subscrito. No entanto os efeitos da inércia rotacional nestes componentes é frequentemente negligenciado em modelos dinâmicos, devido estes efeitos serem muito pequenos quando comparados às inércias dos eixos e máquinas motrizes conectadas ao PSD.

As Equações B.9 e B.10 representam o modelo dinâmico para um conjunto planetário utilizado como PSD em um VEH, tal como aprestando na Figura B.1.

APÊNDICE C – MODOS DE OPERAÇÃO DO TOYOTA PRIUS

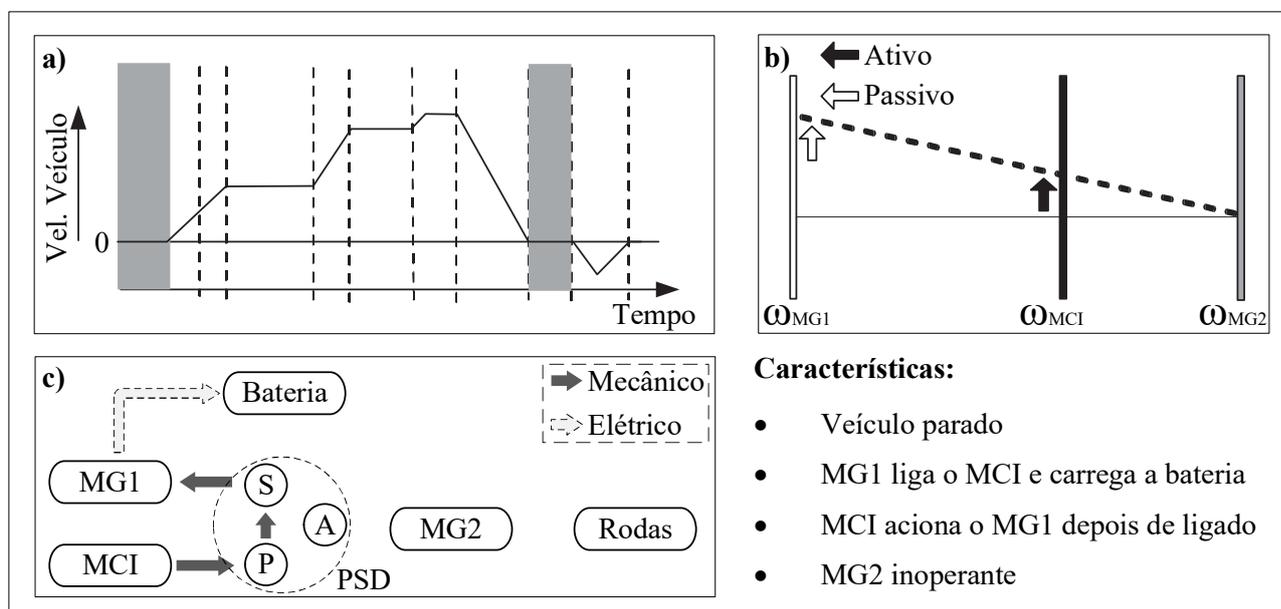
O Toyota Prius é um VEH do tipo complexo que utiliza um PSD (do inglês *Power Split Device*) como dispositivo acoplador. Dessa forma, este veículo possui uma grande versatilidade de funcionamento dos atuadores que compõem o seu trem de força conhecido como THS (do inglês *Toyota Hybrid System*). Esta característica permitiu ao Prius dispor de vários modos de operação que são detalhados a seguir de acordo com o conteúdo disponibilizado em Toyota Motor (2009), Ehsani et al. (2018) e Onori, Serrao e Rizzoni (2016).

C.1 MODO ESTACIONÁRIO

Se o veículo estiver parado (Figura C.1a) e a bateria totalmente carregada, o MCI bem como os demais atuadores permanecem desligados, e neste caso não existe fluxo de energia no trem de força. Porém, caso o SoC da bateria esteja abaixo de um nível considerado seguro pelo controlador, o MCI é ligado pelo MG1, e o MG2 permanece inoperante. A partir de então, como mostra a Figura C.1b, o MCI passa a acionar o MG1, que nesse momento funciona como gerador elétrico permitindo o recarregamento da bateria.

O fluxo de energia no sistema durante este modo de operação pode ser visualizado na Figura C.1c.

Figura C.1 – Modo de operação estacionário com carregamento da bateria



Fonte: Adaptado de Ehsani et al. (2018), Toyota Motor (2009) e Onori, Serrao e Rizzoni (2016)

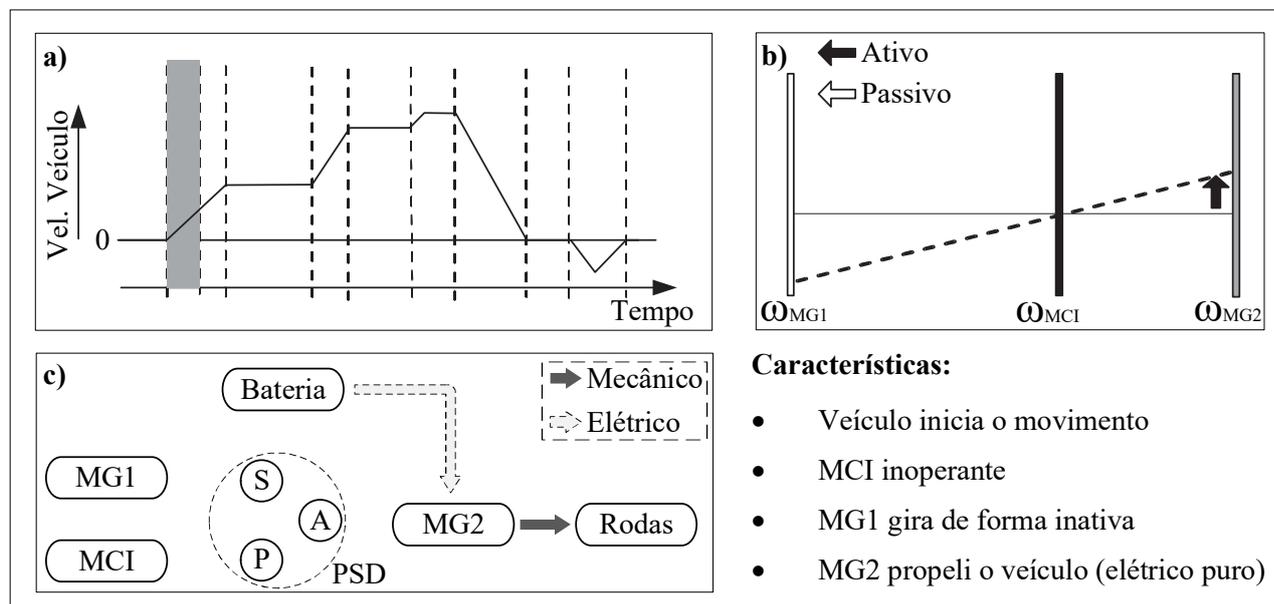
C.2 MODO DE PARTIDA

No início de um trajeto normal (Figura C.2a) geralmente as cargas são leves e a demanda de aceleração é baixa. Assim, como mostra a Figura C.2b, apenas o MG2 propeli o veículo, o que configura uma propulsão puramente elétrica, consequentemente O MCI

permanece parado, e o MG1 gira no sentido inverso de forma inativa, somente para permitir que a engrenagem anelar do PSD possa girar para frente.

O fluxo de energia no sistema pode ser visualizado na Figura C.2c.

Figura C.2 – Modo de operação no início do movimento - partida



Fonte: Adaptado de Ehsani et al. (2018), Toyota Motor (2009) e Onori, Serrao e Rizzoni (2016)

C.3 MODO NORMAL

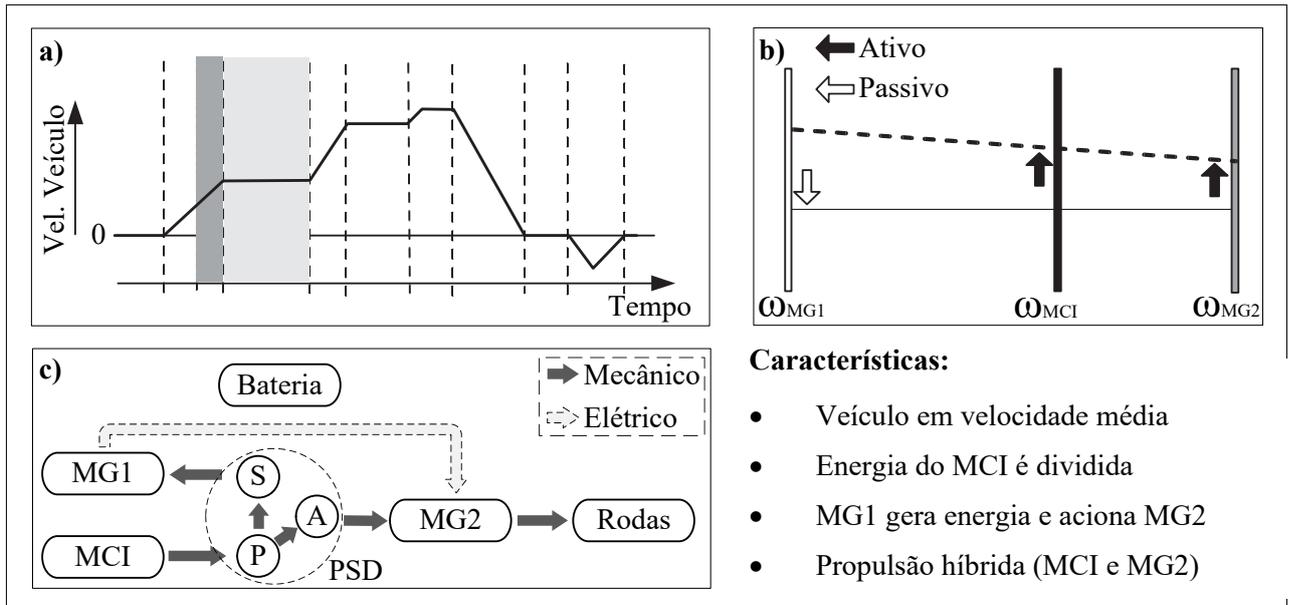
Como pode ser visualizado na Figura C.3a, este modo de condução pode se dar em duas situações: acelerações leves acima de 25km/h (área sombreada mais escura), ou em baixas velocidades cruzeiro (área sombreada mais clara). No entanto, nos dois modos o fluxo de energia no trem de força é o mesmo, como mostra a Figura C.3c, onde, por meio do PSD o MCI fornece energia para as rodas e para o MG1, que por sua vez funciona como gerador. O MG2 auxilia na propulsão utilizando a energia gerada pelo MG1, ou seja, neste momento o SoC da bateria não se altera.

Nas duas situações possíveis para o acionamento deste modo de operação, o controlador, visando maximizar a eficiência do sistema, procura manter o MCI sob as mesmas condições de funcionamento, isto pode ser observado na Figura C.3b, em que o sistema passa do primeiro modo (linha pontilhada - onde o MCI tem uma maior rotação), para o segundo modo (linha contínua - onde o MG2 tem uma maior rotação) alterando somente a velocidade do MG1.

C.4 MODO EM ACELERAÇÃO TOTAL

Em condições que exijam altas acelerações (Figura C.4a) é necessário usar toda a capacidade energética do sistema. Assim, como mostra a Figura C.4c o MCI fornece potência para as rodas e para o MG1, e o MG2 utiliza tanto a energia da bateria como a gerada pelo MG1 para adicionar potência extra às rodas, e assim suprir as solicitações do

Figura C.3 – Modo de operação em condição normal

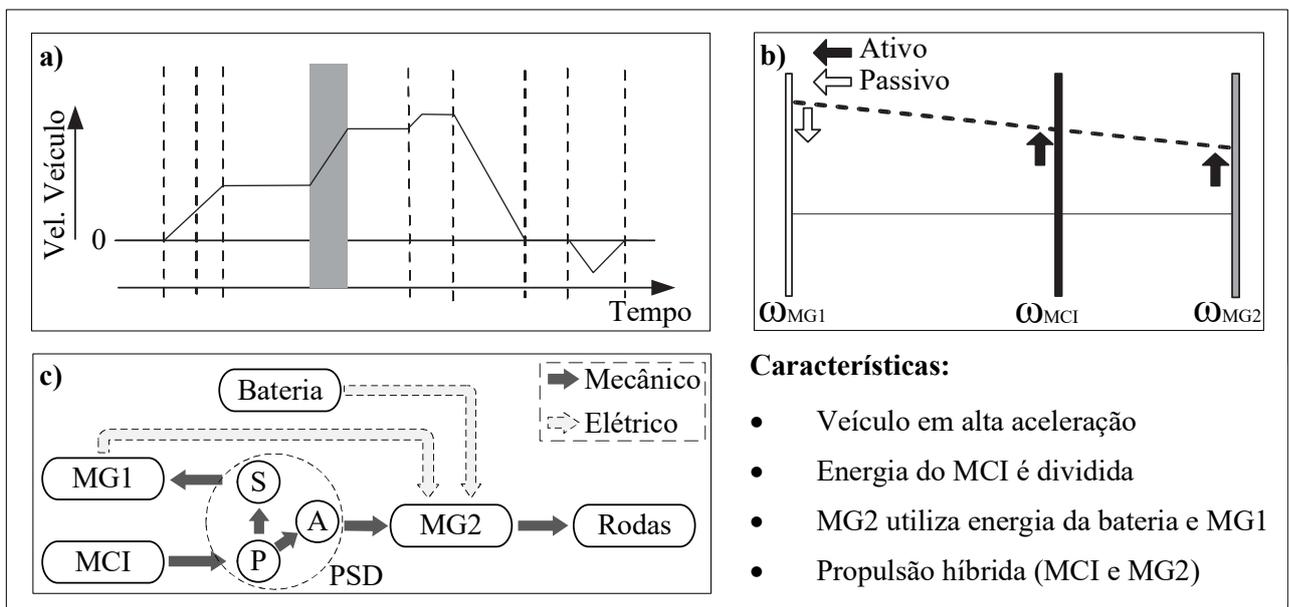


Fonte: Adaptado de Ehsani et al. (2018), Toyota Motor (2009) e Onori, Serrao e Rizzoni (2016)

condutor. Nesse momento o SoC da bateria cai, e o sistema procura manter o MCI próximo da sua faixa de operação ótima.

O funcionamento dos atuadores durante este modo de operação pode ser visualizado na Figura C.4b.

Figura C.4 – Modo de operação em alta aceleração

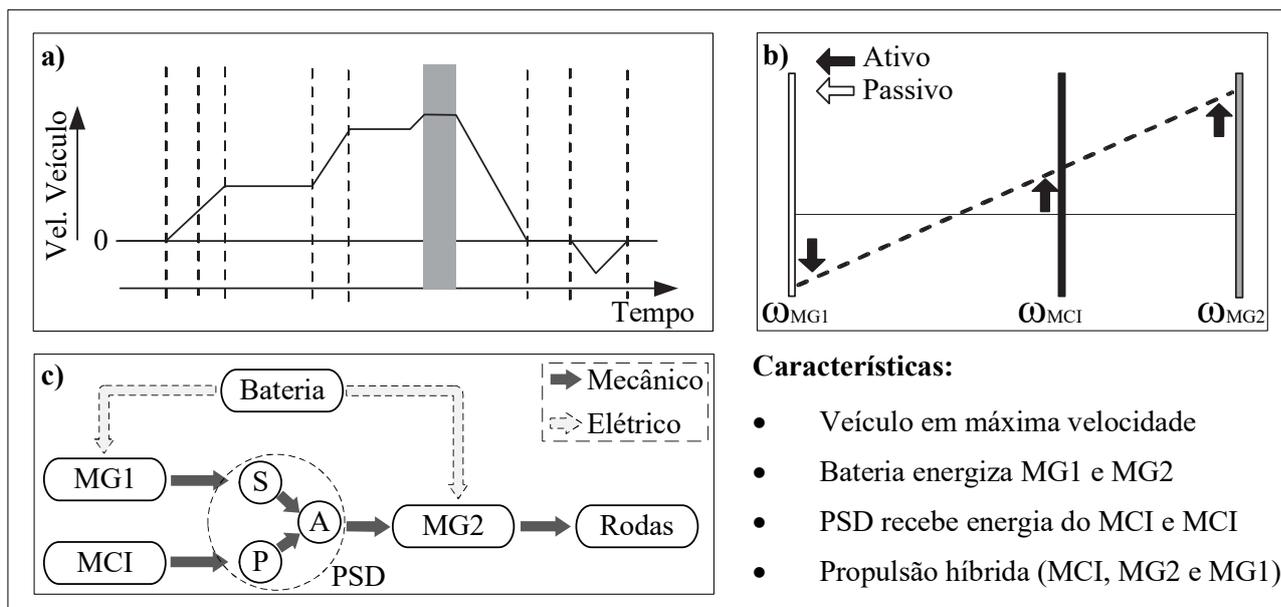


Fonte: Adaptado de Ehsani et al. (2018), Toyota Motor (2009) e Onori, Serrao e Rizzoni (2016)

C.5 MODO EM VELOCIDADE MODERADA

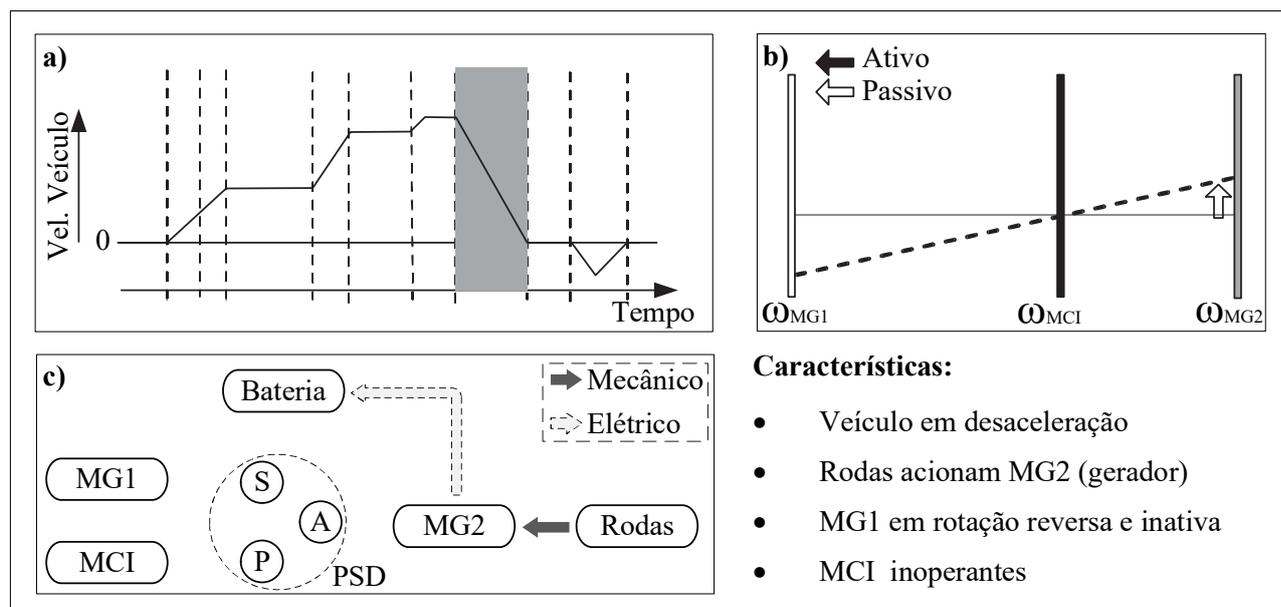
Este tipo de situação (Figura C.5a) corresponde velocidades moderadas e constantes. Como pode ser visualizado na Figura C.5b, a rotação no MG1 é nula, dessa forma o MCI en-

Figura C.6 – Modo de operação em velocidade máxima



Fonte: Adaptado de Ehsani et al. (2018), Toyota Motor (2009) e Onori, Serrao e Rizzoni (2016)

Figura C.7 – Modo de operação em desaceleração ou frenagem

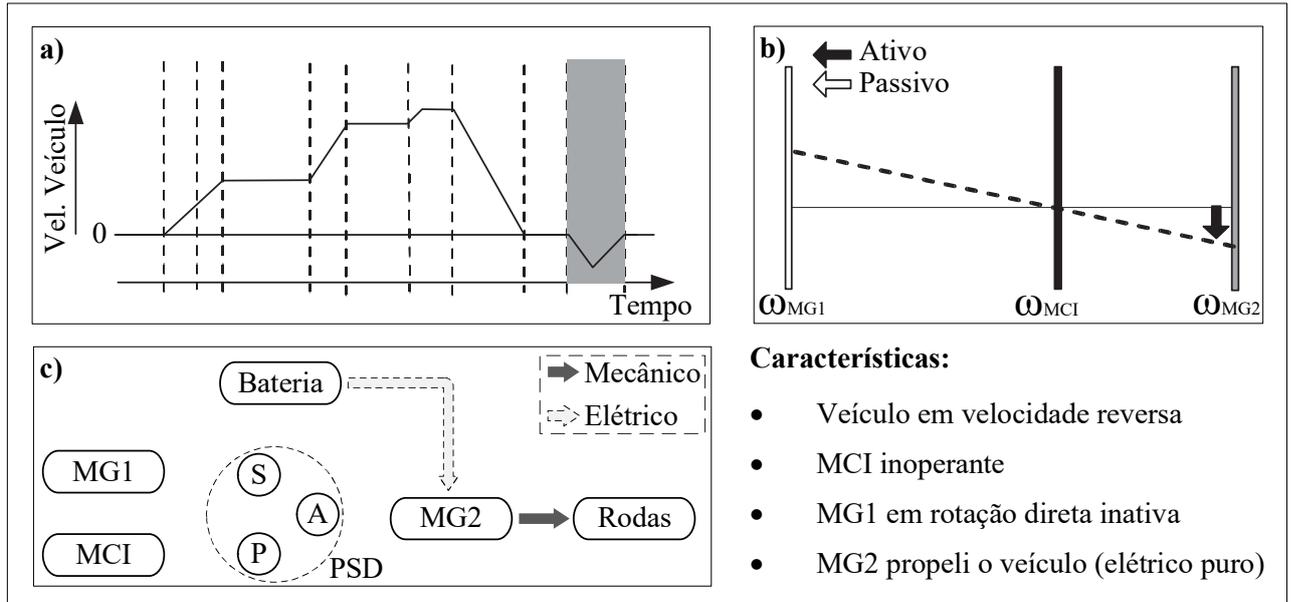


Fonte: Adaptado de Ehsani et al. (2018), Toyota Motor (2009) e Onori, Serrao e Rizzoni (2016)

C.8 MODO REVERSO

Quando o veículo se move no sentido reverso (Figura C.8a), o MG2 também gira na direção contrária impulsionando o veículo, ou seja, o mesmo funciona como motor elétrico utilizando apenas energia da bateria. Como pode ser visto na Figura C.8b, o MG1 rotaciona para frente porém de modo inativo, e o MCI permanece inoperante. Como pode ser visualizado na Figura C.8c, o fluxo energético se assemelha ao modo de operação de partida.

Figura C.8 – Modo de operação reverso



Fonte: Adaptado de Ehsani et al. (2018), Toyota Motor (2009) e Onori, Serrao e Rizzoni (2016)

APÊNDICE D – PRIORIZAÇÃO DOS REQUISITOS FUNCIONAIS

Figura D.1 – Priorização dos requisitos usando diagrama de Mudge

DIAGRAMA MUDGE						
Requisitos dos usuários						
	2	3	4	5	6	%
1	1A	1C	1A	1A	1C	42,50
2	2	3A	2C	2B	6B	10,00
3		3	3B	3A	3C	22,50
4			4	4C	6C	2,50
5				5	6A	0,00
6					6	22,50
					Total	40
						100,00

Requisitos funcionais	
1	Mimetizar comportamento original do VEH
2	Permitir plotagem rápida
3	Permitir o teste de diferentes estratégias de controle
4	Permitir modificações rápidas de parâmetros
5	Permitir visualização dos gráficos em tempo real
6	Permitir a geração de relatório da modelagem

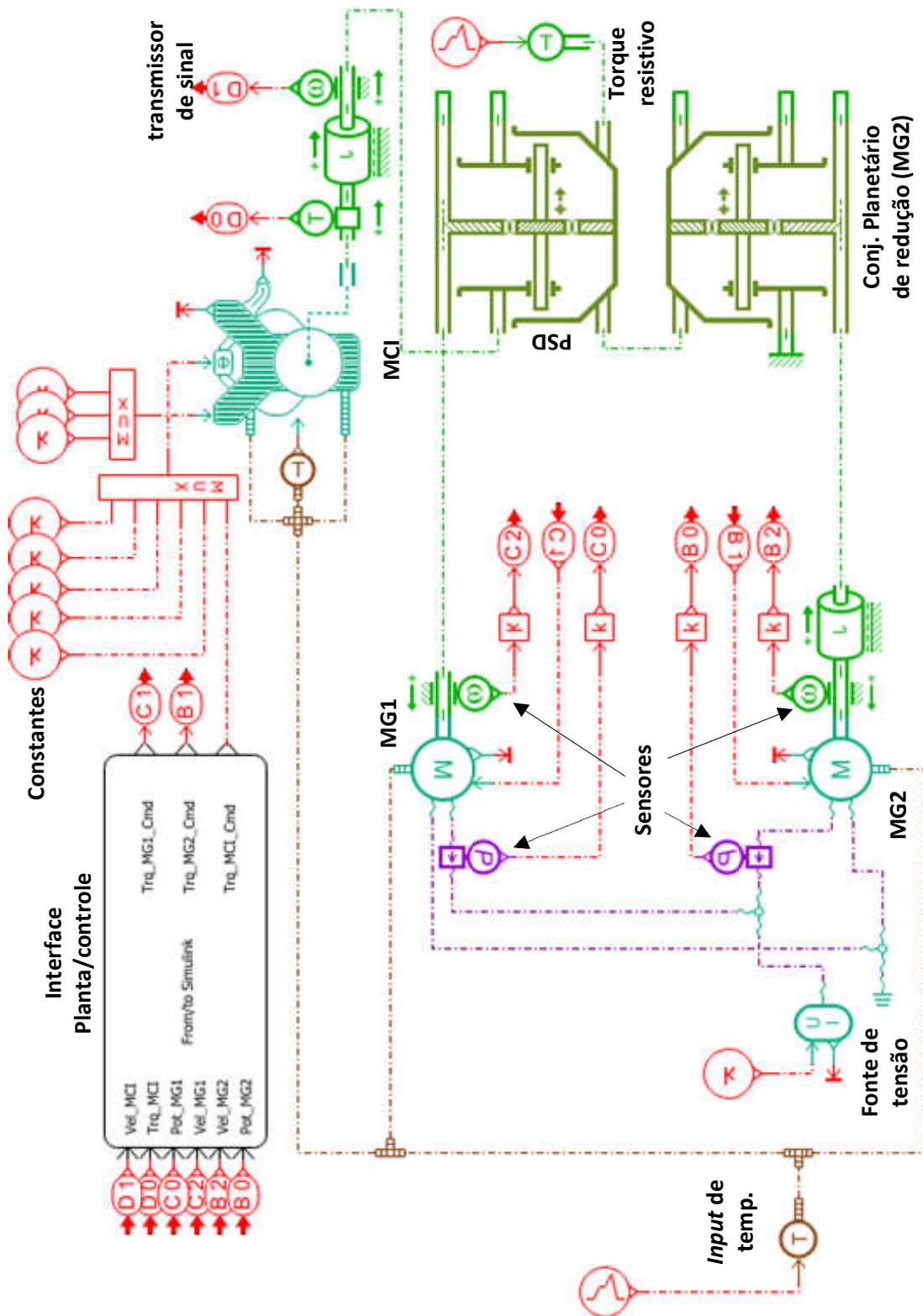
Requisitos funcionais priorizados		GI (%)	CLASS
1	Mimetizar comportamento original do VEH	42,50	Obrg
3	Permitir o teste de diferentes estratégias de controle	22,50	Obrg
6	Permitir a geração de relatório da modelagem	22,50	Obrg
2	Permitir plotagem rápida	10,00	Obrg
4	Permitir modificações rápidas de parâmetros	2,50	Desj
5	Permitir visualização dos gráficos em tempo real	0,00	Desj

Grau de Importância (GI)	
A	Muito importante
B	Mediamente importante
C	Pouco importante

Fonte: Autor

APÊNDICE E – MODELOS COMPUTACIONAIS DE PLANTA E CONTROLE

Figura E.1 – Primeira versão do modelo de planta



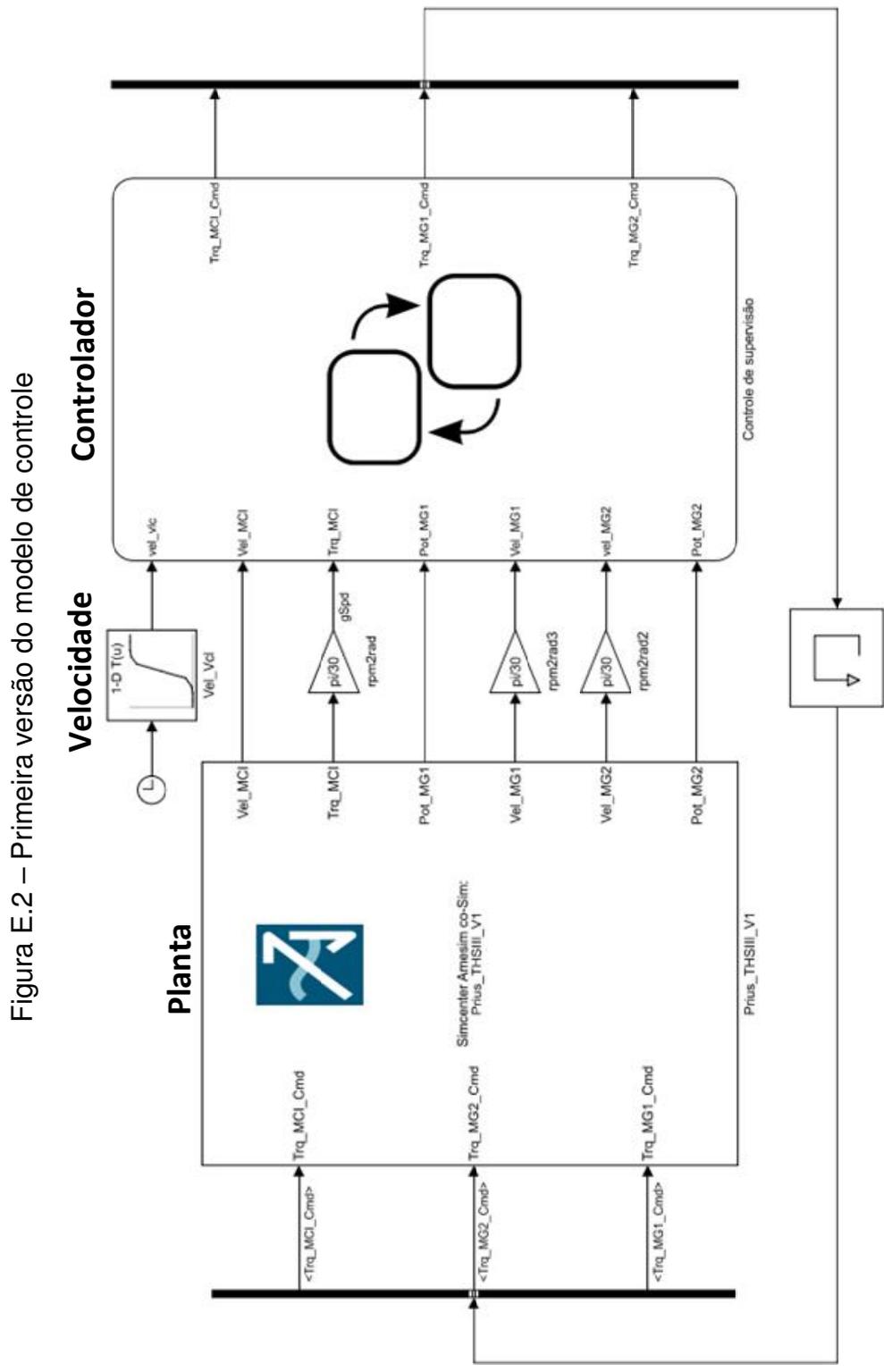
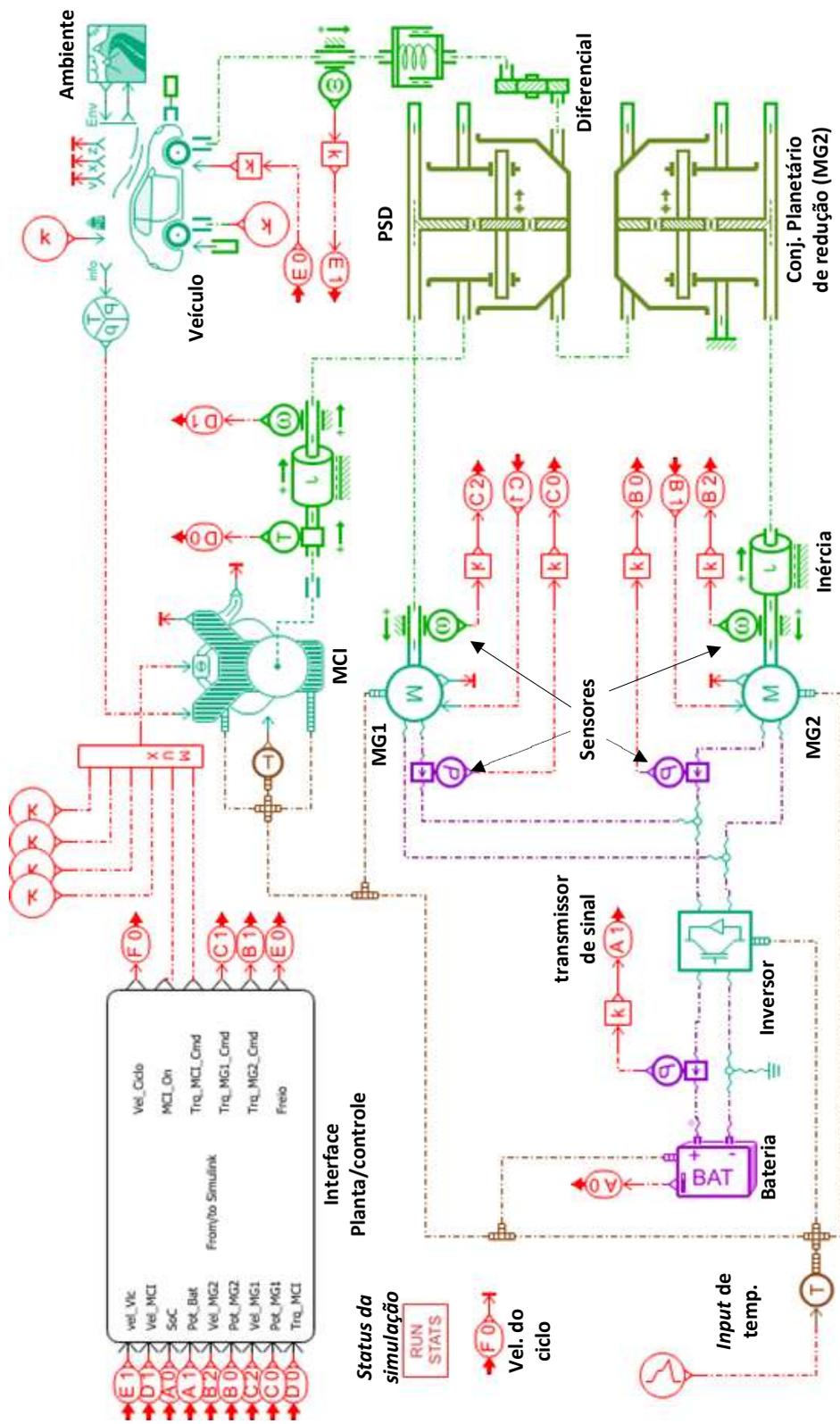


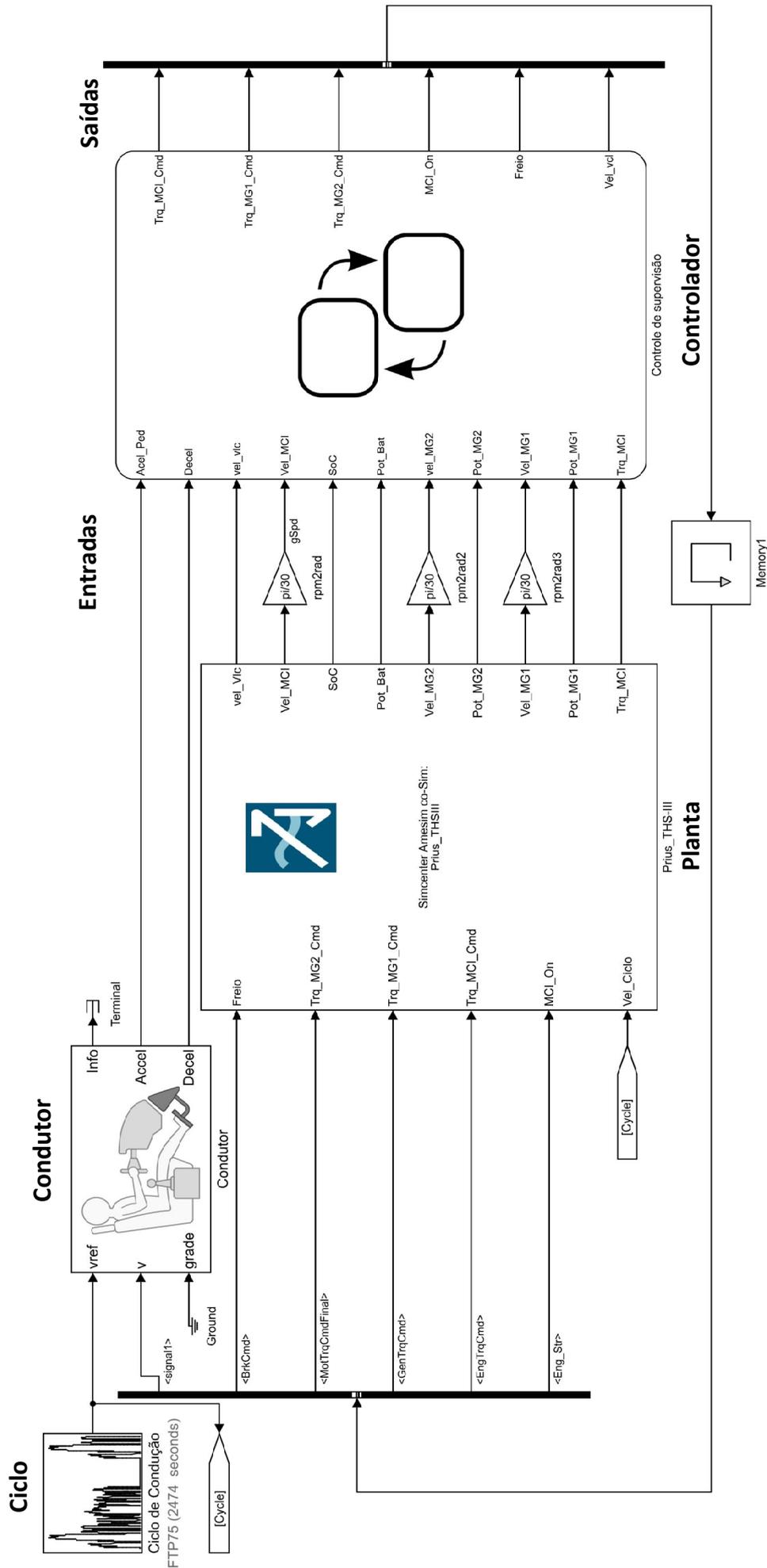
Figura E.2 – Primeira versão do modelo de controle

Figura E.3 – Segunda versão do modelo da planta



Fonte: Autor

Figura E.4 – Segunda versão do modelo de controle



Fonte: Autor

ANEXO A – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS - THS III

Tabela A.1 – Especificações técnicas do Toyota Prius terceira geração

Veículo	
Tipo	Veículo elétrico híbrido (VEH)
Altura total / largura / comprimento	1.491 mm / 1.745 mm / 4.460 mm
Distância entre eixos	2.700 mm
Bitola (frontal / traseira)	1.524 mm / 1.519 mm
Peso seco	1.380 kg
MCI Atkinson a gasolina	
Tipo	Cárter duplo (DOHC) 4 cil. 16 válv. VVT-i
Cilindrada	1,8 litros (1798 cc)
Diâmetro x furo	80,5 x 88,4
Taxa de compressão	13,0 : 1
Potência máx.	73kW @ 5.200 rpm
Troque máx.	142 Nm @ 4.000 rpm
Motor elétrico (MG2)	
Tipo	Ímã permanente síncrono - corrente alternada (CA)
Potência máx.	60 kW
Torque máx.	207 Nm
Tensão	200 - 650 Vca
Gerador (MG1)	
Tipo	Ímã permanente síncrono - corrente alternada (CA)
Potência máx.	42 kW
Torque máx.	30 Nm
Tensão	200 - 650 Vca
Bateria	
Tipo	Níquel-hidreto metálico (Ni-MH)
Potência de saída	27 kW
Tensão	201.6 V
Capacidade	6,5 Ah
Transmissão	
Tipo	Transmissão continuamente variável eletrônica (E-CVT)
Conjunto planetário (S / P / A)	30 / 23 / 78
2º conj. planetário (S / P / A)	28 / 18 / 52
Engrenagem contadora	1,02
Redução no diferencial	3,20
Redução final	3,268
Estimativa de consumo	
Ciclo urbano	21,7 km/l
Ciclo rodoviário	20,4 km/l
Ciclo combinado	19,6 km/l

Fonte: Adaptado de Toyota Motor (2009)