



Daniel Zacarias Freitas

**Análise de Eficiência e Controle de um Sistema Integrado
Roda-Motor Elétrico**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Marco Antonio Meggiolaro

Rio de Janeiro
Abril de 2015



Daniel Zacarias Freitas

**Análise de Eficiência e Controle de um Sistema Integrado
Roda-Motor Elétrico**

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

Prof. Marco Antonio Meggiolaro

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Mauro Speranza Neto

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Sergio Leal Braga

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Alexandre Zuquete Guarato

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 30 de abril de 2015

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

Daniel Zacarias Freitas

Engenheiro de Controle e Automação pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio).

Ficha Catalográfica

Freitas, Daniel Zacarias

Análise de eficiência e controle de um sistema integrado roda-motor elétrico / Daniel Zacarias Freitas ; orientador: Marco Antonio Meggiolaro. – 2015.

137 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2015.

Inclui bibliografia

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Veículo elétrico. 3. Sistema Roda-Motor. 4. Análise de eficiência. 5. Controle de velocidade. 6. Frenagem ABS elétrico. I. Meggiolaro, Marco Antonio. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

Agradecimentos

Ao orientador e amigo, Marco Antonio Meggiolaro, por todo o apoio, incentivo e comprometimento para o desenvolvimento deste e de diversos outros trabalhos.

Ao professor Mauro Speranza Neto pelo apoio no desenvolvimento do trabalho.

Ao professor Sergio Leal Braga pelo apoio com a escolha do tema, disponibilização de equipamentos e do Laboratório de Engenharia Veicular para desenvolvimento deste trabalho.

Ao Fernando Zegarra pela disponibilização dos dados experimentais de sua dissertação e apoio no ensaio experimental no Laboratório de Engenharia Veicular.

Ao Severino Wanderley e a toda equipe do Laboratório de Engenharia Veicular pelo auxílio no experimento.

Aos amigos da equipe RioBotz, alunos da graduação e pós-graduação que frequentam o Laboratório de Robótica da PUC-RIO pelo apoio e incentivo.

Aos amigos Julio Guedes e Alexandre Ormiga e a todos da INSFOR pela compreensão das ausências no trabalho devido à dedicação para esta dissertação.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica da PUC - Rio e seus funcionários, pela colaboração.

A CAPES Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nivel Superior pela ajuda financeira.

À minha família e minha namorada Marcella Guerra pela compreensão e paciência.

Acima de tudo agradeço a Deus.

Resumo

Freitas, Daniel Zacarias; Meggiolaro, Marco Antonio. **Análise de Eficiência e Controle de um Sistema Integrado Roda-Motor Elétrico**. Rio de Janeiro, 2015. 137p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Esta dissertação apresenta o estudo para o desenvolvimento de um *powertrain* elétrico com motorização independente na massa não suspensa do veículo, acoplado diretamente nas rodas “*In Wheel*” ou “*Hub-Motor*”. O desenvolvimento do sistema proposto visa à maximização da eficiência dos veículos elétricos pela minimização das perdas relacionadas a sistemas mecânicos, como na transmissão convencional utilizada em veículos com motorização única. Outro fator motivador para o desenvolvimento do *powertrain* com motorização independente é a aplicação de controles independentes para cada roda, possibilitando desenvolver e aplicar uma gama de controles no veículo, os quais com a motorização única não são possíveis ou possuem desempenho não satisfatório. O trabalho apresenta uma visão geral sobre os veículos elétricos, o estudo do comportamento dinâmico vertical com o aumento da massa não suspensa do veículo, desenvolvimento de um controle de velocidade para o *powertrain* proposto, desenvolvimento de um controle de frenagem ABS elétrico, simulação do sistema em ciclos de direção com o cálculo da eficiência energética do *powertrain*, e um experimento em um dinamômetro de bancada para validação da eficiência energética dos ciclos simulados.

Palavras – Chave

Veículo Elétrico; Sistema Roda-Motor; Análise de Eficiência; Controle de Velocidade; Frenagem ABS Elétrico.

Abstract

Freitas, Daniel Zacarias; Meggiolaro, Marco Antonio (Advisor). **Efficiency Analysis and Control of an Integrated In-Wheel Electric Motor**. Rio de Janeiro, 2015. 137p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This paper presents a study for the development of an electric powertrain with independent engines in the vehicle mass not suspended, directly coupled to the wheels "In Wheel" or "Hub-Motor". The development of the proposed system aims at maximizing the efficiency of electric vehicles by minimizing losses related to mechanical systems, as in conventional transmission used in vehicles with single engine. Another motivating factor for the development of powertrain with independent engines is the application of independent controls for each wheel, allowing for the development and application of a range of controls in the vehicle, which would not be possible or would have unsatisfactory performance if a single engine was used. This work presents an overview of electric vehicles, the study of the dynamic vertical behavior with increasing mass of the suspended vehicle, development of a speed control for the proposed powertrain, development of an electric ABS braking control, system simulation toward cycles to calculate the energy efficiency of the powertrain, and an experiment on a bench dynamometer to validate the energy efficiency of simulated cycles.

Keywords

Electric Vehicle; In-Wheel System; Hub-Motor; Speed Control; ABS Braking Control.

Sumário

1. Introdução.....	15
1.1. Motivação.....	22
2. Revisão Bibliográfica.....	25
2.1. Histórico dos veículos elétricos	25
2.2. Veículos Elétricos Híbridos (VEH)	40
2.3. Veículos Elétricos Híbridos <i>Plug-in</i> (VHEP)	42
2.4. Sistemas <i>In-Wheel</i>	45
2.5. Motores Elétricos	51
2.6. Baterias e Super Capacitores.....	54
2.7. <i>Sistema de Recuperação de Energia Cinética “KERS”</i>	59
3. Estudo do Comportamento Dinâmico Vertical.....	62
3.1. Desenvolvimento do Sistema em CAD	63
3.2. Modelagem Matemática do Sistema Mecânico.....	64
3.3. Simulações em MatLab2012®.....	65
3.4. Análise dos resultados obtidos.....	71
4. Estudo e Desenvolvimento de Controle de Velocidade.....	73
4.1. Características do Sistema	73
4.2. Modelagem	75
4.3. Sistema de Controle.....	78
4.4. Simulações Realizadas.....	80
4.5. Resultados	93
5. Estudo e Desenvolvimento de Controle de Frenagem ABS.....	94
5.1. Sistema de Frenagem ABS.....	94
5.2. Descrição do bloco da “formula mágica”	94
5.3. Sistema de controle.....	97
5.4. Simulações	99
5.5. Resultados	102
6. Simulações do sistema em ciclos de condução.....	102
6.1. Ciclos de condução	103
6.1.1. <i>New York City Cycle – NYCC</i>	103
6.1.2. <i>EPA Highway Fuel Economy Test Driving Schedule</i>	103
6.2. Geração dos dados de carga de entrada para as simulações	104

6.3. Resultados das simulações do sistema nos ciclos de condução	107
7. Experimento em bancada de testes.....	111
7.1 Descrições dos componentes.....	111
7.2 Descrição dos softwares.....	114
7.2.1 Software em <i>LabView</i> ® para controle do experimento	114
7.2.2 Super Drive G2 WEG.....	117
7.2.3 AXE 39 ControllerPRO	118
7.3 Descrição do experimento.....	119
7.4 Resultados	123
8. Conclusões.....	130
Referências Bibliográficas.....	132

Lista de Figuras

Figura 1-1 Comparativo, consumo energético pelo setor de transporte no mundo [2]	16
Figura 1-2 Gráfico de elaboração própria segundo dados do Denatran [3].....	17
Figura 1-3 Gráfico do preço do petróleo em dólares de janeiro de 1946 a fevereiro de 2015 [5]	18
Figura 1-4 Consumo Energético Médio de um Veículo Leve a Gasolina [6] (Adaptado).....	23
Figura 1-5 Fluxogramas das quatro configurações principais de automóveis abordadas neste trabalho [7]	24
Figura 2-1 Primeiro veículo de Ferdinand Porsche, C.2 Phaeto, também conhecido como P1. [14].....	26
Figura 2-2 Primeiro sistema de motorização elétrica independente diretamente nas rodas do veículo [14]	26
Figura 2-3 Primeiro veículo de passageiros 4x4 do mundo [14].....	27
Figura 2-4 Lohner-Porsche Mixte, o primeiro carro híbrido do mundo [14].	28
Figura 2-5 “ <i>La Jamais Contante</i> ” o primeiro automóvel a quebrar a barreira dos 100km/h [16]	28
Figura 2-6 Toyota Prius [20].....	34
Figura 2-7 Série Histórica das Vendas de VHE no Mercado Norte-Americano (1999-2011) U. S. Department of Energy Administration (2012)	36
Figura 2-8 Chevrolet Volt [22].....	36
Figura 2-9 Nissan Leaf [23]	37
Figura 2-10 Séries Históricas das Vendas do Nissan Leaf e do GM Volt no Mercado Norte- Americano GCBC (2012).....	38
Figura 2-11 Veículo esportivo Tesla Roadster [24]	38
Figura 2-12 Renault Twizy [25]	39
Figura 2-13 Mercedes–Benz SLS AMG Coupé elétrico [26]	39
Figura 2-14 Disposição dos componentes Mercedes–Benz SLS AMG Coupé elétrico [26]	40
Figura 2-15 Curvas de Potência do Motor Elétrico e MCI [29]	42
Figura 2-16 Ciclos de Descarga Típicos, adaptado de [30].....	43
Figura 2-17 <i>Urban Dynamometer Driving Schedule</i> (UDDS) [31]	44
Figura 2-18 <i>Federal Highway Schedule</i> (HWFET) [31]	45
Figura 2-19 Michelin Active Wheel Drive [36].....	46
Figura 2-20 Siemens eCorner VDO [37]	47
Figura 2-21 Bridgestone com a Dynamic-Damping In-Wheel Motor Drive System [38]	48
Figura 2-22 Mitsubishi Motors com o sistema MIEV [39]	49
Figura 2-23 Protean com o sistema <i>in-wheel motor technology</i> [40].....	49
Figura 2-24 Modelos que utilizam o sistema da Protean [40].....	51

Figura 2-25 O primeiro dínamo de Werner Siemens [43].....	52
Figura 2-26 Motor DC de ímã permanente com escovas [44].....	53
Figura 2-27 Motor DC Série LEM 200-127 [45].....	53
Figura 2-28 Motor elétrico DC brushless [47].....	54
Figura 2-29 Densidade Energética e Densidade de Potência de Diferentes Tipos de Bateria [18]	56
Figura 2-30 A – Motor elétrico, B – Unidade eletrônica de controle, C – Conjunto de baterias [49].	60
Figura 3-1 Duas vistas da Configuração 1 proposta	63
Figura 3-2 Esquemático da Configuração 1 proposta	63
Figura 3-3 Duas vistas da Configuração 2 proposta	64
Figura 3-4 Esquemático da Configuração 2 proposta	64
Figura 3-5 Diagrama do sistema mecânico modelado para a dinâmica vertical [55].....	65
Figura 3-6 Tabela de parâmetros para modelo de $\frac{1}{4}$ de veículo [55].....	66
Figura 3-7 Gráfico da simulação 1 em MatLab2012® (<i>mmotoredutor</i> = <i>25kg</i>).....	67
Figura 3-8 Gráfico da simulação 2 em MatLab2012®(<i>mmotoredutor</i> = <i>0kg</i>).....	67
Figura 3-9 Gráfico da simulação 3 em MatLab2012®(<i>mmotoredutor</i> = <i>150kg</i>).....	68
Figura 3-10 Diagrama de Bode da simulação 1 em MatLab2012® (<i>mmotoredutor</i> = <i>25kg</i>)	68
Figura 3-11 Diagrama de Bode da simulação 1 em MatLab2012® (<i>mmotoredutor</i> = <i>0kg</i>)	69
Figura 3-12 Diagrama de Bode da simulação 1 em MatLab2012® (<i>mmotoredutor</i> = <i>150kg</i>)	69
Figura 3-13 Resposta em frequência do <i>jerk</i> para <i>mmotoredutor</i> = <i>25kg</i>	70
Figura 3-14 Resposta em frequência do <i>jerk</i> para <i>mmotoredutor</i> = <i>0kg</i>	70
Figura 3-15 Resposta em frequência do <i>jerk</i> para <i>mmotoredutor</i> = <i>150kg</i>	71
Figura 4-1 Motor <i>LEM 200 – 127</i> [45].....	74
Figura 4-2 Gráfico de Características do <i>Motor LEM 200 – 127</i> [45] Adaptado.....	74
Figura 4-3 Circuito representando um motor DC genérico [56].....	75
Figura 4-4 Configuração dos parâmetros modelo genérico de motor DC.	76
Figura 4-5 Configuração dos parâmetros do modelo genérico de motor DC.....	77
Figura 4-6 Modelo no <i>simulink</i> ® da Equação Diferencial da Dinâmica Rotacional da Roda.....	77
Figura 4-7 Diagrama de controle do sistema	79
Figura 4-8 Configuração da alimentação do sistema	80
Figura 4-9 Diagrama da Simulação 1	81
Figura 4-10 Gráfico RPM X Tempo (s) Simulação 1	82
Figura 4-11 Gráfico Corrente X Tempo (s) Simulação 1	82

Figura 4-12 Fórmulas de Ziegler e Nichols para ajuste pelo método do período crítico.....	83
Figura 4-13 Configuração do controlador da Simulação 2	83
Figura 4-14 Diagrama da Simulação 2.....	84
Figura 4-15 Configuração do controlador para Simulação 3	85
Figura 4-16 Diagrama da Simulação 3.....	86
Figura 4-18 Diagrama da Simulação 4.....	88
Figura 4-22 Diagrama da Simulação 5.....	91
Figura 4-23 Gráfico Rpm X Tempo (s) da Simulação 5.....	92
Figure 4-24 Gráfico Corrente X Tempo (s) da Simulação 5	92
Figura 5-1 Sentido de rotação e forças atuantes referentes à “formula mágica”	95
Figura 5-2 Bloco do <i>Simulink</i> ® referente à “formula mágica” [60].....	96
Figura 5-3 Bloco do <i>Simulink</i> ® que representa a chave utilizada para atuar no sistema.....	97
Figura 5-4 Controle de frenagem	97
Figura 5-5 Representação do sistema completo simulado.....	98
Figura 5-6 Gráfico variável k x Tempo - Simulação 1	99
Figura 5-7 Gráfico de Frenagem - Velocidade (km/h) x Tempo (s).	100
Figura 5-8 Gráfico de Frenagem - Velocidade (km/h) x Tempo (s).	101
Figura 5-9 Atuação do ABS Elétrico.....	101
Figura 6-1 Ciclo de condução <i>New York City Cycle Driving Schedule - EPA NYCC</i> [62]	103
Figura 6-2 Ciclo de condução <i>EPA Highway Fuel Economy Test Driving Schedule</i> [62]	104
Figura 6-3 Diagrama de blocos da simulação em <i>Simulink</i> ®.....	108
Figura 6-4 Gráfico Potência x Tempo ciclo EPA	109
Figura 6-5 Gráfico Potência x Tempo ciclo NYCC	110
Figura 7-1 Baterias NiCd 24 V 3600 mAh	111
Figura 7-2 Chave de contato MS-2	111
Figura 7-3 Controlador de velocidade AXE 7245	112
Figura 7-4 NI USB-6008.....	112
Figura 7-5 Motor LEM 200 -127	113
Figura 7-6 Motor WEG trifásico	113
Figura 7-7 Inversor de frequência WEG CFW-11.....	114
Figura 7-8 Tela principal do software em <i>LabView</i> ® para o experimento	115
Figura 7-9 Diagrama de blocos do software em <i>LabView</i> ® para o experimento.....	116
Figura 7-10 Tela do software Super Drive G2	117
Figura 7-11 Tela de configuração de parâmetros para o motor do software AXE 39 ControllerPRO.....	118
Figura 7-12 Tela de configuração de parâmetros de sinal de entrada do software AXE 39 ControllerPRO	118

Figura 7-13 Tela de configuração do <i>datalog</i> do software AXE 39 ControllerPRO	119
Figura 7-14 Diagrama de montagem da bancada de testes	120
Figura 7-15 Bancada de testes do experimento	121
Figura 7-16 Outra vista da bancada do experimento	122
Figura 7-17 Experimento 1 gráfico de Potência Fornecida (kW) x Tempo (s)	124
Figura 7-18 Experimento 1 gráfico de Potência Consumida (kW) x Tempo (s)	124
Figura 7-19 Experimento 2 gráfico de Potência Fornecida (kW) x Tempo (s)	125
Figura 7-20 Experimento 2 gráfico de Potência Consumida (kW) x Tempo (s)	125
Figura 7-21 Experimento 3 gráfico de Potência Fornecida (kW) x Tempo (s)	126
Figura 7-22 Experimento 3 gráfico de Potência Consumida (kW) x Tempo (s)	126
Figura 7-23 Experimento 4 gráfico de Potência Fornecida (kW) x Tempo (s)	127
Figura 7-24 Experimento 4 gráfico de Potência Consumida (kW) x Tempo (s)	127
Figura 7-25 Experimento 5 gráfico de Potência Fornecida (kW) x Tempo (s)	128
Figura 7-26 Experimento 5 gráfico de Potência Consumida (kW) x Tempo (s)	128
Figura 7-27 Experimento 6 gráfico de Potência Fornecida (kW) x Tempo (s)	129
Figura 7-28 Experimento 6 gráfico de Potência Consumida (kW) x Tempo (s)	129

Lista de Símbolos e Abreviações

B - Perda no eixo (coeficiente de atrito viscoso).

c_1 - Amortecedor acoplado à massa não suspensa do veículo

c_2 - Amortecedor acoplado à massa suspensa do veículo

GB^2 - Redução ao quadrado.

i - Corrente do motor

J - Inércia angular da roda

k_1 - Mola acoplada à massa não suspensa do veículo

k_2 - Mola acoplada à massa suspensa do veículo

K_t - Constante de torque do motor.

K_v - Constante de velocidade do motor

m_1 - Massa não suspensa do veículo

m_2 - Massa suspensa do veículo

MCI - Motor de combustão interna

PHEV - Veículos elétricos híbridos ligados na tomada

Powertrain - Grupo de componentes que geram energia para o sistema, incluindo, motor, transmissão, eixo de transmissão, diferencial, rodas e pneus.

R - Resistência elétrica do motor

T - Torque do motor

T_E - Torque externo no motor

V - Tensão no motor

v_b - Tensão no enrolamento do motor

VC - Veículos convencionais

VE - Veículos elétricos

VEH - Veículos elétricos híbridos

ZEV - *zero-emmissionvehicle*

$\dot{\omega}$ -Aceleração angular

ω - Velocidade angular

1. Introdução

Nos últimos anos, o crescimento da indústria de fabricação e desenvolvimento de veículos ocorreu de maneira exponencial, não só na área automotiva, mas também na área naval, aeronáutica e nas indústrias de extração e produção de bens e serviços. Este grande crescimento não foi acompanhado por políticas que presam pela sustentabilidade e a não agressão ao meio ambiente, que geraram sérios problemas que põem em risco o crescimento e desenvolvimento sustentável da humanidade.

Atualmente, no Brasil, segundo o Balanço Energético Nacional de 2014 [1], o setor de transporte (Ferroviário, Rodoviário, Marítimo e Aéreo) consumiu 32% de toda a energia consumida no país, tendo um aumento de 5,2% em relação a 2012. Outro dado que chama a atenção no relatório é que, do total de energia consumida pelo setor de transporte, 82,1% são de derivados de petróleo e gás natural, 14,3% de etanol, 2,3% de biodiesel e apenas 1,3% de outras fontes alternativas.

O predomínio do consumo energético de petróleo e derivados pelo setor de transporte não é uma exclusividade do Brasil; em todo o mundo, segundo a IEA - *Energy Efficiency Indicators: Fundamentals on Statistics 2014* [2], o consumo total de energia pelo setor de transporte é de 27% de toda a energia consumida pelo planeta, e o consumo das fontes mundiais pelo setor é de 62% dos derivados de petróleo, 2% do gás natural, 5% dos biocombustíveis e apenas 2% da energia elétrica.

Neste estudo realizado pela IEA [2] faz-se uma comparação da matriz energética do setor de transporte no mundo, apresentado na Figura 1-1, comparando o consumo em 1973 e 2011. Analisando a Figura 1-1, a matriz energética do setor praticamente não se alterou em relação ao consumo de derivados de petróleo. Há também a extinção do uso de carvão, a redução da utilização do gás natural, a inserção do uso de biocombustíveis, e alteração do uso de energia elétrica no setor de transporte.

Esta comparação realizada mostra o quanto o setor de transporte mundial é dependente do petróleo e que, ao longo dos últimos anos, pouco foi feito para que este quadro se modificasse e para que novas alternativas fossem implementadas.

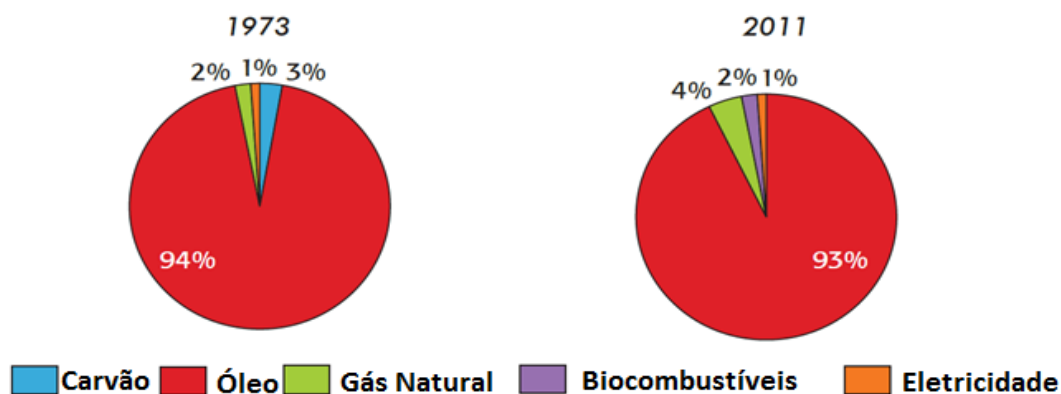


Figura 1-1 Comparativo, consumo energético pelo setor de transporte no mundo [2]

Para melhor entendimento do desenvolvimento na área automotiva, pôde-se fazer uma revisão do índice de crescimento da quantidade de veículos nas estradas. Em 1950, havia 70 milhões de veículos pequenos, ônibus e caminhões circulando em todo o mundo. Em março de 2008 já circulavam um bilhão de veículos no mundo.

O Brasil terminou o ano de 2012 com uma frota total de 76.137.125 veículos automotores. Em 2002 havia aproximadamente 35,5 milhões de veículos. Houve, portanto, um incremento da ordem 40,6 milhões, ocorrendo, assim, um crescimento superior a 114,3% entre esses anos. Vale lembrar que o crescimento populacional no Brasil, entre os dois últimos Censos demográficos (2000 e 2010), foi de 11,8%.

Segundo o Denatran [3], em 2014 o país atingiu a marca de 86.700.490 de veículos em circulação, um número que teve um crescimento vertiginoso nos últimos anos como se pode observar na Figura 1-2. Tal crescimento deve-se a políticas públicas de incentivos para a produção e aquisição de veículos, e também do aumento do poder aquisitivo da população nas regiões metropolitanas. Entretanto, o aumento da frota de veículos automotores em todo o mundo gera uma série de problemas que serão apresentados a seguir.

Com o avanço da indústria e com o aumento de veículos em circulação em todo o mundo durante todos os últimos anos, houve um crescimento considerável na quantidade de poluentes emitidos na atmosfera. Os veículos convencionais, com combustíveis derivados do petróleo, são responsáveis por um alto percentual das emissões de poluentes. Nos Estados Unidos pode-se observar que os veículos convencionais são responsáveis por 77% das emissões de monóxido de carbono (CO), 56% das emissões de óxidos de nitrogênio (NOX), 47% das emissões de hidrocarbonetos, e de 28% das emissões de material particulado [4].

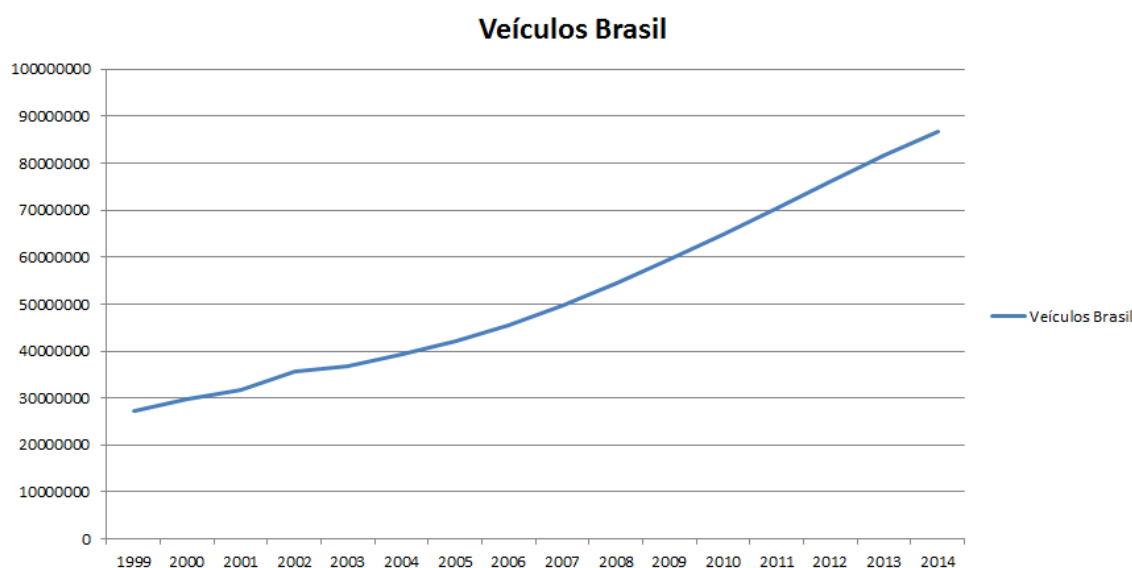


Figura 1-2 Gráfico de elaboração própria segundo dados do Denatran [3]

O consumo de petróleo no mundo ao longo dos anos tem apresentado uma trajetória predominantemente crescente, e os grandes países consumidores têm sido cada vez mais dependentes de fontes externas. Os preços praticados no mercado internacional, por sua vez, se caracterizam pela forte volatilidade, com momentos de alta provocados por acontecimentos históricos. A Figura 1-3 a seguir mostra a série histórica do preço em dólares de janeiro de 1946 a fevereiro de 2015 do barril de petróleo.

Chamam a atenção, na Figura 1-3, a alta volatilidade do preço do petróleo e a forte influência que acontecimentos globais têm sobre seu preço no mercado internacional.

Após a segunda guerra mundial o valor do barril de petróleo se mantém com certa estabilidade até 1970, quando houve o embargo do petróleo árabe, causando uma forte alta: em dezembro de 1970, o barril estava cotado a 21 dólares, chegando a 57 dólares em 1977. Em meados de 1980, outro fator histórico que fez disparar o



valor petróleo foi o início da guerra Irã-Iraque. Outros diversos fatores históricos influenciaram a cotação do petróleo, pode-se citar alguns como: Invasão do Kuwait pelo Iraque, Guerra do Golfo, crise asiática de 1999, atentado aos EUA de 11 de setembro de 2002, guerra no Iraque, crise de países Europeus.

Figura 1-3 Gráfico do preço do petróleo em dólares de janeiro de 1946 a fevereiro de 2015 [5]

Nos últimos anos houve uma tendência de alta devido ao rápido aumento da demanda e o baixo estoque de produção da OPEP, porém desde julho de 2014 a cotação opera em forte queda. Esta queda se deve a alguns fatores como: baixa atividade econômica mundial, controle de refinarias por grupos extremistas (sendo o principal o Estado Islâmico), alta oferta pelos países da OPEP, diminuição de importação de petróleo dos EUA após se tornar o maior produtor de petróleo do mundo.

Ou seja, o petróleo nos dias atuais trata-se de um produto com demanda altamente inelástica no curto prazo, e que sofre forte influência de fatores geopolíticos, econômicos e conjunturais.

A dependência das grandes potências mundiais em relação ao petróleo importado e as consequências geopolíticas desta dependência são fatos largamente discutidos na literatura, e têm recebido especial atenção nos últimos anos graças às consequências ambientais do seu consumo elevado e aos gastos militares devidos à manutenção da segurança de fornecimento, fato agravado pela instabilidade política dos principais produtores.

Nos países em desenvolvimento, a energia consumida no setor de transportes tem apresentado forte tendência de crescimento nos últimos anos, e a expectativa é de que esta tendência se repita caso não ocorram mudanças radicais no padrão de consumo de energia. Os meios de transportes são essenciais para o desenvolvimento econômico, pois expandem as fronteiras de comércio e de trabalho, reduzem o isolamento de áreas rurais e permitem o aumento da qualidade de vida das pessoas que precisam se deslocar para trabalhar ou obter lazer.

Nos países desenvolvidos, como EUA, Japão e alguns países da Europa, a dependência do petróleo importado é uma fonte de insegurança, e tem sido motivo dos altos gastos com defesa, voltados para garantir a logística de suprimento de petróleo.

Atualmente, na busca pela segurança energética, diversos países, desenvolvidos ou em desenvolvimento, buscam soluções para a questão da dependência do petróleo importado. Algumas soluções são pelo lado da oferta, tais como o desenvolvimento de fontes domésticas, convencionais ou não, como o gás de xisto, biocombustíveis e energia nuclear. Outras, pelo lado da demanda, tais como eficiência do consumo e o uso sustentável da energia.

Dentre as alternativas disponíveis, talvez a mais intrigante e desafiadora seja a eletrificação do transporte individual, dada a quebra do paradigma do automóvel convencional, profundamente enraizado na cultura do homem moderno.

O crescimento econômico, ao mesmo tempo, demanda e gera a necessidade de transporte individual e coletivo, seja para fins econômicos ou de lazer. O aumento do número de automóveis no Brasil irá certamente demandar uma quantidade crescente de energia nos próximos anos, o que torna o uso da eletricidade no setor de transportes uma interessante alternativa aos combustíveis utilizados atualmente, tanto sob o ponto de vista estratégico quanto ambiental.

Hoje, graças aos avanços tecnológicos e às inovações nos processos produtivos, as indústrias estão fazendo uso de sistemas elétricos e híbridos em muitas aplicações com o objetivo de ter um maior aproveitamento dos recursos energéticos disponíveis e diminuir significativamente as emissões de poluentes ao meio ambiente.

As emissões lançadas pelos automóveis híbridos estão diretamente relacionadas com as fontes de energia utilizadas para carregar sua bateria. No caso do Brasil, em que cerca de 90% da energia elétrica consumida é gerada a partir da hidroeletricidade, as emissões se restringem aos momentos em que o motor de combustão interna for acionado.

Na área veicular existe muito interesse no desenvolvimento de veículos que utilizem de maneira mais eficiente o recurso energético e sejam menos poluentes. Nos últimos anos o desenvolvimento de veículos elétricos (VE), veículos elétricos híbridos (VEH) e veículos elétricos híbridos ligados na tomada (Plug-In, PHEV) tiveram um crescimento considerável, devido às preocupações com o meio ambiente e a utilização mais eficiente da energia. Durante as últimas décadas, realizaram-se por todo o mundo alguns programas de investigação e projetos de demonstração com o objetivo de avaliar os VE e os VEH, com a finalidade de poder introduzir este tipo de tecnologia num mercado onde imperam os veículos convencionais (VC).

Uma das principais barreiras à disseminação dos automóveis híbridos e elétricos, no estágio atual de desenvolvimento da tecnologia, é o custo de aquisição. Nos EUA, um automóvel híbrido custa em média 20% mais do que o seu correspondente à gasolina. A experiência mostra que poucos consumidores querem ser os primeiros a adotar novas tecnologias, especialmente quando estão envolvidos dispêndios muito altos de capital.

Outra barreira se origina do fato que os híbridos e elétricos dependem de incentivos governamentais para serem economicamente atrativos ao consumidor final. Em lugares com Alemanha, Califórnia (EUA), Dinamarca, Índia, Israel e China, estão em curso políticas de incentivo à fabricação e aquisição de veículos elétricos puros. Pelo lado ambiental, políticas como essas reforçariam o uso de energia elétrica, que no Brasil é gerada quase que totalmente a partir de fontes renováveis, e reduziria o uso do motor de combustão, uma importante fonte emissora de gases de efeito estufa. Um fator primordial, um dos motivadores deste trabalho, é a eficiência energética, já que o motor elétrico tem eficiência da ordem de 90%, contra 30% a 35% de eficiência do motor de combustão do ciclo Otto.

Motores a combustão interna possuem uma eficiência normalmente de 30%, mas conhece-se mediante estudos que se consegue uma eficiência máxima de 35% trabalhando a uma determinada rotação (RPM). Para um percurso qualquer, onde a velocidade é variável, o motor do veículo trabalha a diferentes RPM, tendo assim uma menor eficiência energética em relação à sua eficiência máxima. Entretanto, a utilização de motores a combustão interna em veículos elétricos pode ser vantajoso visto que este pode ser utilizado na recarga das baterias, aumentando a autonomia do veículo, sistema esse utilizado nos veículos híbridos.

Quando a função do motor a combustão interna é a de gerar energia elétrica para o carregamento das baterias, o mesmo trabalha a uma RPM constante e de máxima eficiência. Quando a função do motor é a de ajudar na propulsão do veículo, ele trabalha a uma RPM variável, caso específico em veículos híbridos série, termo que será abordado a seguir. Em outras condições, quem é responsável pela propulsão do veículo é o motor elétrico. Então, a combinação de um sistema térmico a máxima eficiência com um sistema elétrico permite ter uma alta eficiência no uso do recurso energético.

Visando a maximização da eficiência energética, este trabalho tem como intuito minimizar as perdas relacionadas a componentes mecânicos em veículos elétricos. O sistema desenvolvido poderá ser utilizado tanto em veículos puramente elétricos (VE), veículos elétricos híbridos (VEH) e veículos elétricos híbridos ligados na tomada (Plug-In, PHEV).

O sistema de motorização independente acoplado diretamente nas rodas maximiza a eficiência do veículo, além de possibilitar a inclusão de uma gama de controles que somente são possíveis quando a motorização do veículo é independente.

1.1. Motivação

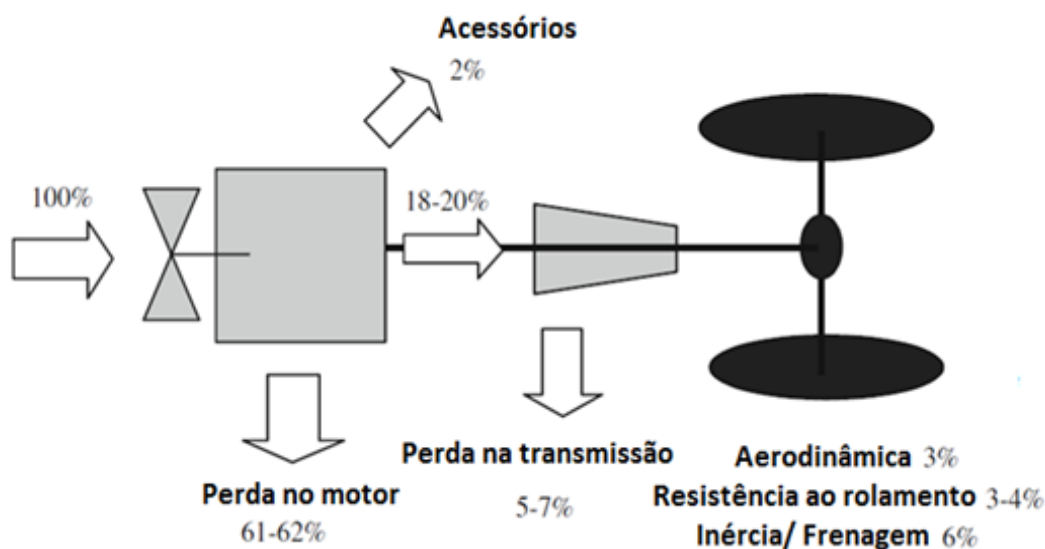
Com o aquecimento global, aumento de poluição, falta de espaço e esgotamento das reservas de matérias-primas, o setor automotivo precisa aumentar a eficiência de seus produtos, reduzir o uso de materiais e oferecer soluções mais amigáveis do ponto de vista energético e ecológico. Objetiva-se então reduzir ou eliminar o uso de combustíveis fósseis não renováveis, que não permitem a compensação ambiental.

As empresas e centros de pesquisas ligados ao setor de transporte estão desenvolvendo novas tecnologias que possam suprir esta nova demanda, entretanto mudanças revolucionárias na forma de desenvolver novos veículos são inevitáveis. A utilização de novos materiais para redução de peso do chassi, e formatos com otimização aerodinâmica, são algumas das inovações que fazem parte dessa nova forma de concepção dos veículos, porém a mudança mais radical e com maior desafio está no desenvolvimento de um novo *powertrain* (grupo de componentes que geram energia para o sistema, incluindo, motor, transmissão, eixo de transmissão, diferencial, rodas e pneus), com maior eficiência, minimização de perdas e que permita uma maior compensação ambiental.

A principal motivação do desenvolvimento do sistema de motorização independente nas rodas é a minimização de perdas de eficiência relacionados a componentes mecânicos como, por exemplo, o sistema de acoplamento e transmissão do motor às rodas do veículo.

Automóveis convencionais convertem a energia dos combustíveis líquidos em energia mecânica, por meio de um motor de combustão interna. Do ponto de vista energético, o automóvel convencional é extremamente ineficiente, variando entre 1% a 30% da energia química do combustível é utilizada para movimentar o veículo [6].

Nos automóveis convencionais, mais de 60% da energia do combustível é perdida no motor de combustão interna. No motor, parte da energia é dissipada devido ao atrito das partes móveis, perdas aerodinâmicas que ocorrem no bombeamento do ar pelo motor, e na forma de calor. Na Figura 1-4 é mostrado como é perdida a eficiência energética em um veículo de combustão interna.



**Figura 1-4 Consumo Energético Médio de um Veículo Leve a Gasolina [6]
(Adaptado)**

Outras fontes de ineficiência energética são: o eixo de transmissão e caixa de marchas; acessórios que consomem energia gerada pelo motor, tais como ar condicionado, por exemplo; a aerodinâmica da carroceria; os rolamentos e o atrito dos pneus com o solo; a inércia a ser vencida para colocar o veículo em movimento; e a energia, na forma de calor, dissipada pelo atrito durante a frenagem de um veículo em movimento [6]. Ou seja, a forma que utilizamos a energia para movimentar um veículo convencional de combustão interna é altamente ineficiente. Com todos os problemas relacionados a gastos energéticos e a poluição que enfrentamos atualmente, torna-se inviável continuar produzindo veículos com estas configurações. A busca pela maximização da eficiência energética torna-se algo primordial para a evolução dos meios de transporte.

Não serão abordadas neste trabalho: perdas como inércia a ser vencida para colocar o veículo em movimento e a energia, na forma de calor, dissipada pelo

atrito durante a frenagem de um veículo em movimento; perdas nos rolamentos dos pneus; e perdas em acessórios que consomem energia gerada pelo motor, tais como ar condicionado. O foco principal deste trabalho encontra-se nas perdas relacionadas ao motor de combustão interna, componentes mecânicos de acoplamento e transmissão do veículo. Na Figura 1-5 encontram-se as principais configurações nas quais este trabalho foca na maximização da eficiência energética.

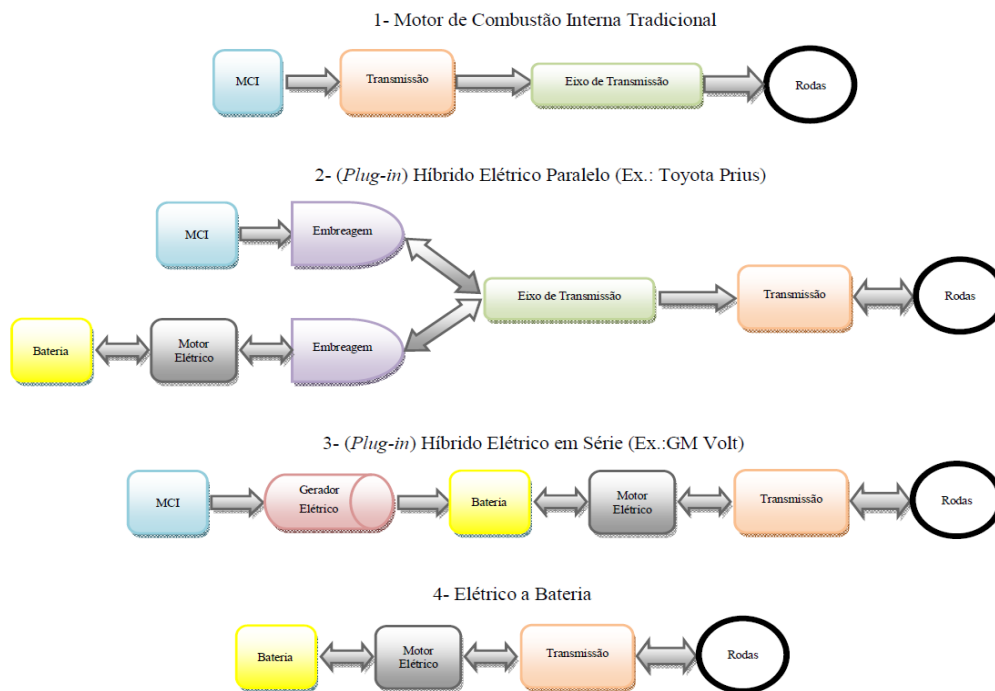


Figura 1-5 Fluxogramas das quatro configurações principais de automóveis abordadas neste trabalho [7]

Em todas as configurações de veículos mostradas na Figura 1-5 pode-se notar que existe um grande número de componentes mecânicos com perdas de eficiência energética. Baseando-se nessas configurações, este trabalho estuda uma nova configuração de *powertrain* com o mínimo de componentes mecânicos com perdas de eficiência, maximizando assim a eficiência energética do veículo.

2. Revisão Bibliográfica

Neste capítulo será apresentado o histórico do desenvolvimento dos veículos elétricos desde os seus primórdios aos dias atuais. Também será apresentado o funcionamento dos modelos de veículos elétricos, assim como seus principais componentes.

2.1. Histórico dos veículos elétricos

A história dos veículos elétricos está intimamente relacionada à história dos veículos a combustão interna convencionais que conhecemos hoje. Não há registro exato do inventor ou em que ano surgiu o primeiro modelo de carro elétrico; os registros mostram que em 1828, o húngaro Ányos Jedlik [8] inventou um modelo de carro em pequena escala alimentado por um motor elétrico que ele projetou. Entre 1832 e 1839 (o ano exato é incerto), Robert Anderson da Escócia [9] inventou um carro elétrico-motorizado. Em 1835, outro carro elétrico de pequena escala foi projetado pelo Professor Stratingh de Groningen, na Holanda, e construído por seu assistente Christopher Becker [10].

O desenvolvimento dos veículos elétricos estava em ascensão, porém a maior barreira eram as baterias utilizadas que não eram recarregáveis. Em 1859, o belga Gaston Planté realizou a demonstração da primeira bateria utilizando chumbo e ácido [11]. Este equipamento veio a ser utilizado por diversos veículos elétricos que foram desenvolvidos a partir do início da década de 1880 na França, EUA e Reino Unido.

Em 29 de janeiro de 1886, Karl Benz [12] demonstrou o seu primeiro motor a combustão interna. Neste mesmo ano, registros históricos indicam que um táxi elétrico-motorizado, usando uma bateria com 28 células e um pequeno motor elétrico, foi introduzido na Inglaterra [13]. Porém foi a partir dos anos 1890 que a indústria automobilística começou a se desenvolver mais rapidamente.

Em 1898 Ferdinand Porsche [14] lançou seu primeiro veículo, o *C.2 Phaeto* que também é conhecido como P1. O primeiro protótipo do P1 foi o primeiro veículo com tração dianteira do mundo, sua motorização era composta de um pequeno motor elétrico de 3HP acoplado transversalmente entre as rodas dianteiras, e rodas

traseiras eram as direcionais. Este veículo elétrico ainda estava longe de estar pronto para produção em série, porém foi apresentado ao público. O conceito do veículo foi descartado e outros veículos de teste foram construídos [15].



Figura 2-1 Primeiro veículo de Ferdinand Porsche, C.2 Phaeto, também conhecido como P1. [15]

Para Ferdinand Porsche, o P1 foi apenas o início de sua carreira como designer de veículos. Em novembro de 1899, ele se tornou o designer-chefe do empresário Jacob Lohner, onde ele foi capaz de apresentar a sua próxima grande ideia: o primeiro sistema de motorização elétrica independente acoplada diretamente nas rodas do veículo [15].



Figura 2-2 Primeiro sistema de motorização elétrica independente diretamente nas rodas do veículo [15]

Em 1900, um veículo elétrico impulsionado por motores nas rodas conhecido como o "*Lohner-Porsche*" fez muito sucesso na Exposição Universal de Paris. Nesta exposição, Ferdinand Porsche demonstrou a verdadeira extensão da sua energia inovadora de uma forma ainda mais impressionante: ele apresentou um automóvel esportivo equipado com quatro motores elétricos acoplados diretamente nas rodas, que foi apresentado como o primeiro veículo de passageiros 4x4 do mundo [15].



Figura 2-3 Primeiro veículo de passageiros 4x4 do mundo [15]

A próxima ideia de Ferdinand Porsche foi tão pioneira quanto em 1900: a Porsche combinou o seu sistema de motorização elétrica acoplada diretamente nas rodas alimentado por bateria com um motor a gasolina. Assim, a ideia por trás do carro híbrido série nasceu. Conhecido como o "*Lohner-Porsche Mixte*", este veículo entrou em produção em série em 1902 [15].



Figura 2-4 Lohner-Porsche Mixte, o primeiro carro híbrido do mundo [15].

Na virada do século XX, o automóvel mais popular nos EUA, era o “*Locomobile*”, movido a vapor. Naquela época, o mercado norte americano se dividia principalmente entre os elétricos e os a vapor. Em 1899, foram vendidos 1.575 automóveis elétricos, 1.681 a vapor e 936 a gasolina [16].

O veículo elétrico era então considerado tecnologicamente superior aos demais. Em 1899, um veículo elétrico, o “*La Jamais Contante*”, foi o primeiro automóvel a quebrar a barreira dos 100km/h. Já a indústria do automóvel elétrico possuía uma rede industrial e tecnológica bem desenvolvida e com fácil acesso a fornecedores, pois utilizava componentes parecidos com os dos bondes elétricos, que eram o principal meio de transporte público das grandes cidades.

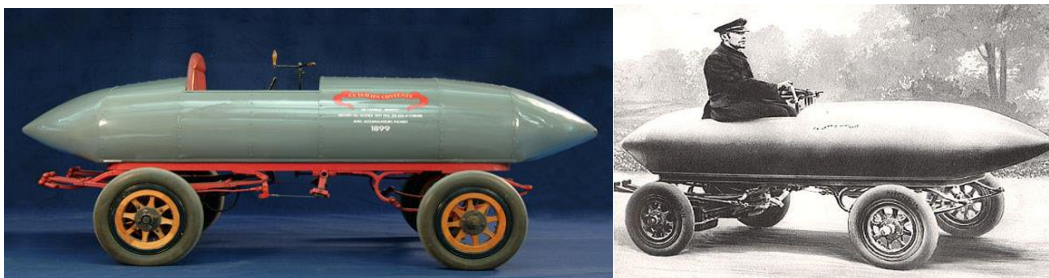


Figura 2-5 “La Jamais Contante” o primeiro automóvel a quebrar a barreira dos 100km/h [17]

Em termos de estratégia comercial, cada indústria tinha visões bastante peculiares: os fabricantes de automóveis a gasolina visavam o consumo de massa, e para eles o preço era um fator chave; os fabricantes de automóveis a vapor eram contra o consumo de massa e se preocupavam em desenvolver produtos de alta performance, sem se importar com o preço e formas de pagamento; e os fabricantes dos automóveis elétricos ou eram monopolistas integrados verticalmente, ou procuravam vender produtos caros a consumidores de alto poder aquisitivo.

Em 1901, Thomas Edison, interessado no potencial dos veículos elétricos, desenvolveu a bateria níquel-ferro, com capacidade de armazenamento 40% maior que a bateria de chumbo, mas com custo de produção muito mais elevado. As baterias níquel-zinco e zinco-ar foram também criadas no final do século XIX. A falta de capacidade de armazenamento das baterias já era considerada o ponto fraco do automóvel elétrico.

Duas tecnologias desenvolvidas naquela época, além das baterias, ajudaram a melhorar a performance dos carros elétricos: a frenagem regenerativa, que consiste em transformar a energia cinética do automóvel em energia elétrica durante a frenagem; e o sistema híbrido a gasolina e eletricidade.

Mais precárias que as estradas das cidades eram as do interior, onde não havia nem infraestrutura elétrica nem gasolina disponível. Poucos se aventuravam pelas estradas naquela época. Contudo, a rede de distribuição de gasolina logo se expandiu, graças à maior performance do motor a combustão interna, em termos de km/litro de combustível, e à facilidade de distribuição de combustíveis líquidos, que eram vendidos em pequenos galões. Além do mais, a manutenção dos primeiros automóveis a gasolina era realizada por profissionais especializados em conserto e manutenção de bicicletas. Por outro lado, eram poucos os mecânicos que compreendiam o funcionamento de motores elétricos e das baterias dos automóveis elétricos e híbridos.

Em 1903, havia cerca de 4.000 automóveis registrados na cidade de Nova York, sendo 53% a vapor, 27% a gasolina e 20% elétricos. Em 1912, quando a frota de carros elétricos de Nova York atingiu o ápice de 30.000 unidades, a frota de automóveis a gasolina naquela cidade já era 30 vezes maior [18]. Entre 1899 e

1909, nos EUA, enquanto as vendas de automóveis a gasolina cresceram mais de 120 vezes, as de elétricos somente dobraram [16].

O declínio dos carros elétricos a partir de então se deveu principalmente aos seguintes fatores [19]:

- i) Nos anos 1920, as rodovias dos EUA já interconectavam diversas cidades, o que demandava veículos capazes de percorrer longas distâncias;
- ii) As descobertas de petróleo no Texas permitiram a redução do preço da gasolina;
- iii) Em 1912, foi criado um dispositivo que eliminou a manivela, até então utilizada para dar a partida nos veículos a gasolina;
- iv) O sistema de produção em série de automóveis, desenvolvido por Henry Ford, permitiu que o preço final dos carros a gasolina ficasse entre USD \$500 e \$1.000, a metade do preço dos elétricos.

As três tecnologias de automóveis apresentavam sérios problemas técnicos. No entanto, os fabricantes dos automóveis a gasolina foram os mais rápidos em solucioná-los: o barulho excessivo; a dificuldade para dar a partida, resolvida com o motor de arranque; o consumo excessivo de água; a baixa autonomia; e a baixa velocidade. Inovações tecnológicas durante a primeira década do século XX permitiram reduzir os vazamentos de água, aumentar a autonomia e permitiram o alcance de velocidades mais altas. Desta forma, a partir de 1902, os automóveis a gasolina passaram a dominar as provas de velocidade.

Os problemas relacionados com os automóveis a vapor eram: a necessidade de aquecimento 20 minutos antes de qualquer viagem, e o imenso consumo de água. O primeiro problema foi solucionado, mas o segundo permaneceu até o desaparecimento deste tipo de automóvel.

Já os elétricos tinham os seguintes problemas: dificuldade em subir ladeiras muito íngremes; baixa autonomia; e baixa velocidade. Todos estes problemas estavam relacionados à falta de capacidade de armazenamento das baterias, e persistiam devido à lentidão com que a tecnologia das baterias se desenvolvia.

O primeiro mercado onde o automóvel a gasolina superou as vendas de seus concorrentes foi o norte-americano, seguido pela França, Grã Bretanha e Alemanha. É importante frisar que, enquanto na Europa os automóveis eram um produto de alto luxo, produzidos em pequena escala, nos EUA eram produzidos em massa e tinham preços acessíveis, sendo, portanto muito mais populares.

Após os anos 1920, o motor de combustão interna (MCI) passou a ser nitidamente a tecnologia dominante. Em 1924, foram produzidos nos EUA 381 veículos elétricos e 3.185.490 a gasolina [16]. Os veículos elétricos passaram a ser produzidos em escala muito pequena, sendo utilizados basicamente para coleta municipal de lixo e serviço de entregas em algumas cidades dos EUA e Reino Unido. Foram observados alguns picos de produção nestes dois países durante a Primeira e a Segunda Guerra Mundiais, quando o racionamento de gasolina e diesel forçou a busca por fontes de energia alternativas ao petróleo. No Japão do pós-guerra, o carro elétrico tornou-se bastante popular também devido ao racionamento de combustíveis, mas sua produção foi descontinuada na década de 1950, quando o racionamento cessou.

Somente após a década de 1960, quando a opinião pública começou a se voltar para os problemas ambientais, é que os automóveis elétricos tornaram a atrair a atenção das grandes montadoras. Naquela época, o chumbo ainda era utilizado como aditivo para a gasolina, não havia filtros nem catalizadores para conter as emissões, e o automóvel já era considerado uma das principais fontes da poluição atmosférica nas grandes cidades.

Nos anos 1970, a geração e o consumo energia passaram a levar em conta a questão ambiental, e três fatos apontaram a necessidade de se desenvolver alternativas tecnológicas renováveis para geração de energia:

- i) Em 1972, o Clube de Roma publicou o livro *Limites para o Crescimento*, que propôs um limite para o crescimento da exploração de recursos naturais não renováveis;
- ii) A Crise do Petróleo, em 1973, causada pelo embargo de produtores de petróleo, que teve como consequência ondas de racionamento em diversos países;

iii) A conscientização a respeito do uso da energia nuclear, tais como a segurança operacional e o destino dos dejetos radioativos.

Os anos 1970 foram uma época propícia para os veículos elétricos, que combinavam baixa emissão de poluentes com a possibilidade de utilizar energias renováveis. No entanto, os protótipos desenvolvidos naquela época nunca chegaram às grandes linhas de produção.

Um dos mais ambiciosos programas voltado para a criação de um mercado para carros elétricos ocorreu na França, na década de 1970. Um grupo de grandes empresas, lideradas pela geradora de energia EDF e com apoio financeiro do estado, analisou as necessidades de diversas instituições públicas francesas, com o objetivo de avaliar as necessidades de usuários em potencial e estudar a discrepância existente entre a performance demandada e as possibilidades técnicas. A conclusão foi de que era impossível atender à demanda com a tecnologia de bateria então existente.

Em 1976, o senado norte-americano autorizou o lançamento de um programa voltado para desenvolver veículos elétricos e híbridos. O programa contava com verba de cerca de US\$ 160 milhões para fomentar, por um lado, o desenvolvimento de baterias de níquel-ferro e níquel-zinco e, por outro, os veículos elétricos. O objetivo era a fabricação de 2.500 automóveis elétricos e híbridos entre junho de 1978 e dezembro de 1979, e mais tarde aumentar a produção para 5.000, atingindo em seguida 50.000 veículos por ano. O programa nunca atingiu seu objetivo, tendo sido terminado durante o governo Reagan, por razões econômicas.

No final dos anos 1980, houve nova tentativa de trazer de volta os veículos elétricos, e o objetivo era novamente de reduzir a poluição nas grandes cidades. O conceito de desenvolvimento sustentável estava em voga, e o foco se concentrava na necessidade de se utilizar uma fonte de energia alternativa e desenvolver novas tecnologias de transportes. Em 1990, o estado da Califórnia implementou suas primeiras normas regulatórias de emissão zero.

Em 1992, a Agenda 21 enfatizou a importância de problemas causados pelo uso extensivo de energia fóssil, bem como a necessidade de se reduzir o consumo de

energia nos países desenvolvidos e de se buscar uma possível transição para fontes renováveis de energia. Ainda no ano de 1992, a União Europeia definiu sua política de transportes através da expressão *uma estratégia para a mobilidade sustentável*, e a utilização dos carros elétricos era vista como uma das condições mais importantes para a sustentabilidade proposta.

No início dos anos 1990, os legisladores da Califórnia, levando em conta questões ambientais, decidiram que as montadoras de automóveis daquele estado deveriam oferecer veículos elétricos aos consumidores [20]. A CARB (*California Air Resources Board*), órgão do governo responsável por monitorar a qualidade do ar no estado da Califórnia, definiu uma cota de vendas de veículos com emissão zero (ou ZEV – *zero-emmission vehicle*) de 2% em 1998, 5% em 2001 e 10% em 2003. Os estados de Nova York e Massachusetts adotaram medidas semelhantes logo em seguida. De acordo com a legislação da Califórnia, cada montadora receberia um bônus de 5.000 dólares para cada ZEV vendido dentro da cota. A General Motors (GM) e a Honda iniciaram então o desenvolvimento de veículos elétricos que fossem comercialmente viáveis.

Eram muitas as forças contrárias à iniciativa da CARB: outras montadoras e a AAMA (*American Automobile Manufacturers Association*) alegavam que o veículo elétrico sairia caro demais para os consumidores e que o chumbo, presente nas baterias, não traria benefícios ambientais à substituição da gasolina. As companhias de petróleo como (Exxon, Shell e Texaco) contribuíam para campanhas de políticos contrários aos veículos elétricos e financiavam propagandas contrárias aos veículos elétricos. Como resultado, em 1996 a CARB capitulou e postergou seu cronograma.

Ainda nos anos 1990, foi protagonizada uma nova tentativa de introduzir os automóveis híbridos, desta vez por meio de parcerias público-privadas. O governo Clinton anunciou, em 1993, uma iniciativa denominada *Partnership for a New Generation Vehicles*, ou PNGV, com o objetivo de desenvolver um automóvel “limpo” com consumo de 4,0 litros/100 km. Após alguns anos e investimentos da ordem de um bilhão de dólares, três protótipos foram anunciados. Todos eram híbridos, mas nenhum chegou às linhas de produção.

Em 1997, a Toyota, fabricante japonesa de automóveis que não estava incluída no PNGV, lançou no mercado japonês o *Prius*, que teve de início boa aceitação no mercado. Naquele mesmo ano, a Audi lançou o *Duo*, o primeiro híbrido do mercado europeu, que foi um fracasso de vendas. Diversas montadoras europeias se dedicavam, naquela época, ao desenvolvimento de automóveis a diesel, visando reduzir as emissões de gases de efeito estufa. Desta forma, os elétricos não despertavam tanto interesse.

A Honda, em 1999, foi à primeira empresa a lançar um híbrido no mercado norte-americano, o *Insight*, que foi um sucesso imediato. Em 2000, o *Prius* chegou ao mercado americano, obtendo um sucesso muito maior que o esperado pela Toyota, efeito que se repetiu mais tarde no mercado europeu. Em 2003, a Honda lançou o Civic híbrido, com a mesma aparência e dirigibilidade do Civic convencional. Em 2004 a Ford lançou o *Escape*, um veículo utilitário esportivo, em versão híbrida.



Figura 2-6 Toyota Prius [21]

Com os objetivos, entre outros, de reduzir a dependência da economia dos EUA em relação ao petróleo e de aumentar a produção de combustíveis limpos de origem renovável, o governo norte-americano promulgou em 2007 o *Energy Independence and Security Act*, que destinou anualmente 95 milhões de dólares, entre os anos de 2008 e 2013, à pesquisa e ao desenvolvimento de um sistema de transporte elétrico e à formação de capital humano especializada em veículos elétricos e na tecnologia VHEP, e até 25 bilhões de dólares aos fabricantes de automóveis e fornecedores que produzirem veículos híbridos e seus componentes até o ano de 2020.

Em julho de 2009, foi promulgado nos EUA o *American Clean Energy and Security Act*. Esta lei instituiu que a Secretaria de Energia, as agências reguladoras estaduais e todas as distribuidoras de energia não reguladas deveriam apresentar planos para o desenvolvimento de *smart grids* integradas, com suporte à tecnologia VHEP até julho de 2012, e que a assistência financeira às montadoras que se dedicassem ao desenvolvimento de híbridos e seus fornecedores de autopeças poderia atingir 50 bilhões de dólares até o ano de 2020. O governo Obama tinha como objetivos principais criar empregos “verdes”, reduzir a dependência do petróleo, amenizar as emissões de gases de efeito estufa e buscar a transição para uma economia baseada em energia limpa. Indiretamente, o incentivo financeiro à inovação tecnológica teria como objetivo ajudar a salvar a indústria automobilística americana durante a crise mais grave de sua história.

Como resultado da recente política de incentivo, os híbridos têm aumentado sua participação no mercado norte-americano. Conforme pode ser observado na Figura 2-7, em 2011 as vendas de híbridos nos EUA, atingiram 268.755 unidades. Foram comercializados 38 modelos de híbridos desde o lançamento do Honda *Insight*, em 1999, sendo que 2.157.726 unidades foram vendidas desde então. O modelo mais popular é o Toyota *Prius*, dos quais foram vendidas 1.091.564 unidades desde seu lançamento, seguido pelo Honda Civic e o Toyota Camry, que venderam respectivamente 209.216 e 178.805 unidades desde que foram lançados. Praticamente todos os fabricantes ofertam pelo menos um modelo de híbrido. A Figura 2-7 mostra a evolução das vendas de híbridos nos E.U.A. desde seu lançamento naquele mercado.

2011) U. S. Department of Energy Administration (2012)

O grau de satisfação entre os proprietários do *Prius* é considerado alto. De acordo com pesquisas realizadas [22], 88% dos proprietários estão muito satisfeitos com o automóvel e 12% estão de alguma forma satisfeitos. O sucesso do *Prius* se deve, em grande parte, ao seu design peculiar, à sua popularidade entre celebridades da mídia norte-americana e à propaganda espontânea feita por proprietários.

Após o *Prius*, os lançamentos mais marcantes do mercado norte-americano foram o GM *Volt* e o Nissan *Leaf*. O lançamento do *Volt* foi anunciado pela General Motors em 2007, e tem desde então sido foco de atenção pela mídia. O *Volt*

percorre, com carga plena, 40 milhas (ou 64 km) como um elétrico puro. Quando descarregado, entra em ação um motor a gasolina que gera eletricidade para alimentar o motor elétrico, tal qual um híbrido em série convencional.

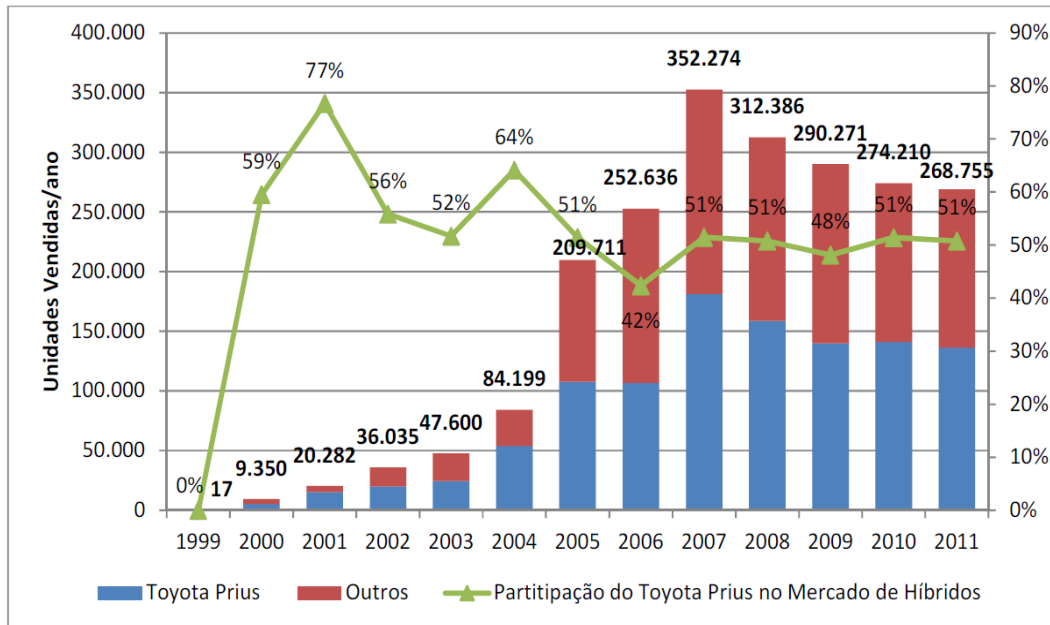


Figura 2-7 Série Histórica das Vendas de VHE no Mercado Norte-Americano (1999-



Figura 2-8 Chevrolet Volt [23]

O lançamento do *Leaf* foi anunciado pela Nissan em 2 de agosto de 2009. Trata-se de um carro elétrico a bateria que pode percorrer, de acordo com o fabricante, 100 milhas (ou 160 km) a cada recarga. A Nissan adotou uma política de preços agressiva - o preço médio ao consumidor nos EUA, considerando os incentivos federais, é de US\$ 25 mil, mas este valor pode ser ainda menor, dependendo dos incentivos locais.



Figura 2-9 Nissan Leaf [24]

A Figura 2-10 mostra as vendas do Leaf e do Volt, no mercado norte-americano, desde o seu lançamento até 2012.

Da mesma forma como ocorre com os híbridos, é ainda muito cedo para se afirmar com exatidão que o *Leaf* e o *Volt* terão no futuro participação expressiva no mercado. No entanto, a aceitação destes produtos pode ser comprovada pelo sucesso das vendas e pela fila de espera de alguns meses para quem pretende adquiri-los.

Ainda no mercado americano uma nova montadora dedicada a veículos esportivos puramente elétricos se destaca, a Tesla Motors, fundada em 2003 pelos engenheiros Martin Eberhard e Marc Tarpenning em San Carlos, Califórnia. O seu nome é uma homenagem ao inventor e engenheiro eletricista Nikola Tesla. A Tesla se destaca, pois a montadora volta com o conceito criado por Ferdinand Porsche em seus veículos, o uso de motorização elétrica independente diretamente

nas rodas. A montadora Tesla Motors ganhou ampla atenção após a sua produção do Tesla Roadster, o primeiro carro esportivo totalmente elétrico. O segundo veículo da empresa é o Model S, um sedã de luxo totalmente elétrico, e os seus dois próximos veículos são os modelos X e 3 respectivamente [25].

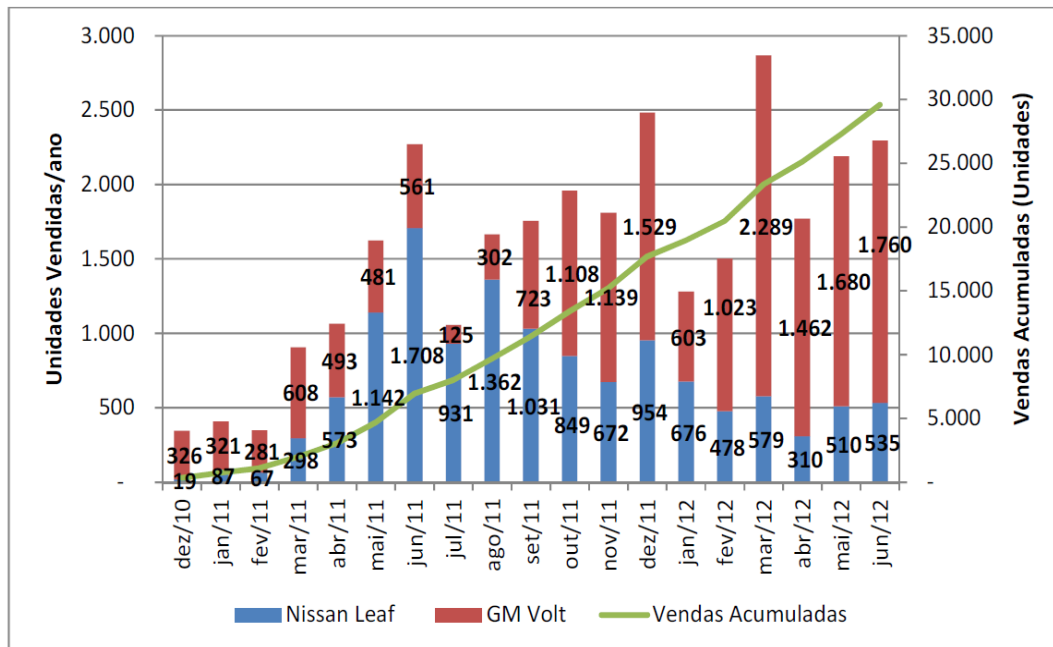


Figura 2-10 Séries Históricas das Vendas do Nissan Leaf e do GM Volt no Mercado Norte- Americano GCBC (2012)



Figura 2-11 Veículo esportivo Tesla Roadster [25]

No mercado Europeu há alguns veículos elétricos que estão se destacando no mercado mundial. A montadora francesa Renault possui dois modelos com grande

sucesso e aplicações distintas: o *Zoe* e o *Twizy*. O *Twizy* chama a atenção por ser um novo conceito de veículo elétrico urbano, projetado com apenas 2 lugares, sendo extremamente compacto e com um custo de aquisição baixo para os consumidores: ele é vendido por aproximadamente 7 mil euros [26].



Figura 2-12 Renault Twizy [26]

No mercado dos esportivos a Mercedes-Benz lançou o *SLS AMG Coupé* totalmente elétrico. O SLS utiliza motorização independente para cada uma de suas rodas, porém diferentemente do Tesla, o motor elétrico se encontra no chassi do veículo e é acoplado por meio de uma transmissão. Este superesportivo possui 751hp e atinge de 0 a 100km/h em 3,9 segundos [27]. A Figura 2-14 mostra a disposição dos seus componentes, onde se pode ver a motorização independente para as rodas do veículo.



Figura 2-13 Mercedes-Benz SLS AMG Coupé elétrico [27]

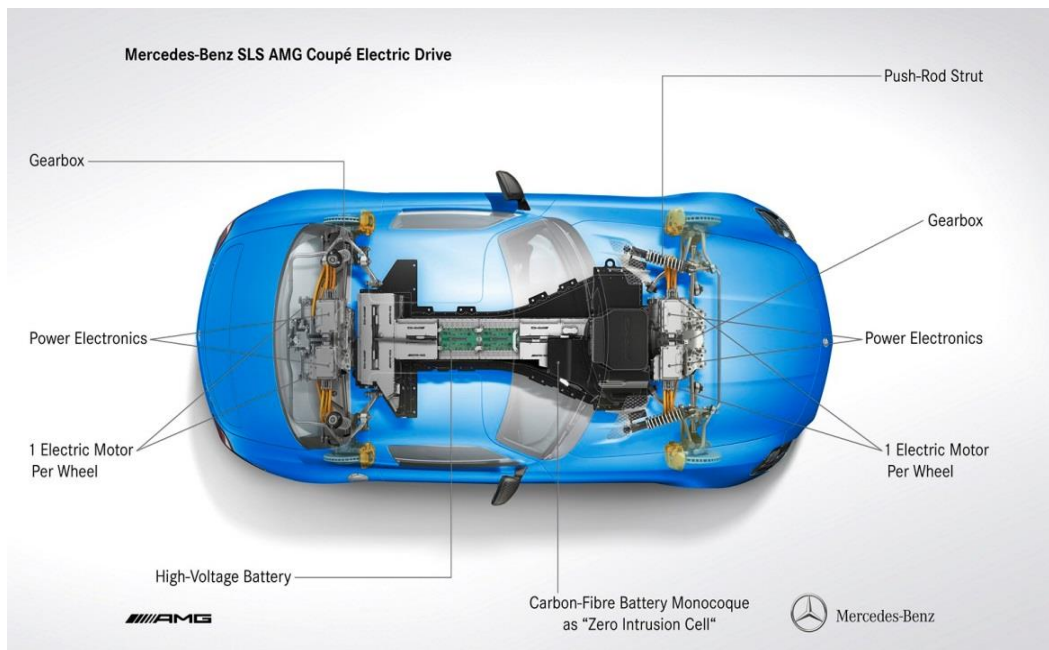


Figura 2-14 Disposição dos componentes Mercedes-Benz SLS AMG Coupé elétrico [27]

No contexto atual, pode-se afirmar que os híbridos representam o passo intermediário da evolução entre os automóveis convencionais e os elétricos. Apesar de as tecnologias híbrida e elétrica não serem recentes, representam uma novidade para a geração atual de consumidores. Mesmo com a crescente inserção de novos modelos elétricos e híbridos no mercado, muito ainda precisa ser desenvolvido, e seguindo esta demanda mundial este trabalho assim se dedica.

2.2. Veículos Elétricos Híbridos (VEH)

O princípio de funcionamento dos automóveis híbridos é bem diferente daquele dos automóveis convencionais. Os híbridos utilizam um motor elétrico movido pela energia armazenada em baterias, além do motor a combustão interna. Há basicamente três tipos de sistemas nos automóveis híbridos comercializados atualmente:

- i) O sistema híbrido em série, em que um motor de combustão interna aciona um gerador que alimenta o motor elétrico;
- ii) O sistema híbrido em paralelo, em que o motor de combustão interna é auxiliado pelo motor elétrico nas situações que exijam mais potência;

iii) E o sistema misto, em que dois motores elétricos atuam um em série e outro em paralelo ao MCI.

Nos três sistemas supracitados, as baterias são recarregadas também por um sistema de frenagem regenerativa, e o MCI é desligado quando o veículo fica parado no trânsito por muito tempo.

O Honda *Insight* é um exemplo de híbrido com tração em paralelo. Ele possui um motor elétrico que auxilia na tração do automóvel ao se acoplar diretamente no eixo de saída do MCI. O Toyota *Prius*, por sua vez, é um exemplo de híbrido com tração em série. Neste sistema, uma engrenagem planetária permite que o MCI e o motor elétrico atuem em paralelo na tração das rodas, ou que apenas um dos motores atue. As baterias podem ser carregadas tanto pelo sistema de frenagem regenerativa quanto pelo MCI.

Os VEs são de 30% a 40% mais eficientes do que os de combustão interna tanto do ponto de vista energético quanto ambiental [28]; [20]; [29], mas por outro lado são também mais caros e de mecânica mais complexa do que seus equivalentes convencionais [28]; [20].

A maior parte da eficiência energética dos híbridos vem da combinação entre o MCI e o motor elétrico. O motor de combustão convencional (ciclo Otto) a gasolina é relativamente ineficiente (de 5% a 10%) em baixa rotação, e relativamente mais eficiente (até 28%) em alta rotação, sendo a eficiência média em torno de 15%. A questão é que, no meio urbano, automóveis raramente trabalham em alta rotação.

O motor elétrico, por outro lado, produz torque máximo na partida, e sua curva de eficiência permanece quase constante até atingir alta rotação. A vantagem dos híbridos está em combinar os dois motores, utilizando o motor elétrico em baixa rotação e o MCI quando conveniente. A Figura 2-15 mostra as curvas de eficiência do motor elétrico versus o MCI a gasolina.

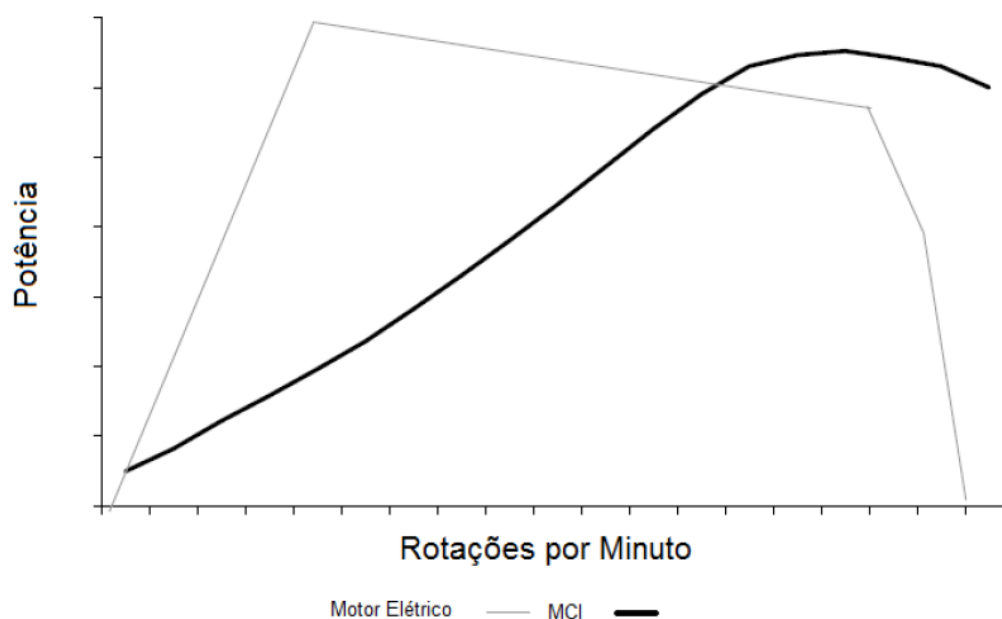


Figura 2-15 Curvas de Potência do Motor Elétrico e MCI [30]

2.3. Veículos Elétricos Híbridos *Plug-in* (VHEP)

Assim como o híbrido elétrico, o VHEP utiliza uma bateria, um MCI e um motor elétrico, sendo que a bateria possui maior capacidade de armazenamento que a de um VHE não *plug-in*, podendo ser recarregada quando conectada à rede de distribuição de energia elétrica.

A bateria do VHEP armazena energia suficiente para deslocar o veículo por longas distâncias sem assistência do MCI. Quando a bateria descarrega, o MCI é utilizado como um gerador de energia para o motor elétrico. O VHEP pode ter configuração em série ou em paralelo, e pode operar em dois diferentes modos: o modo de carga sustentada (*charge sustaining* – CS) ou o modo de carga depletada (*charge depleting* – CD), ambos ilustrados na Figura 2-16.

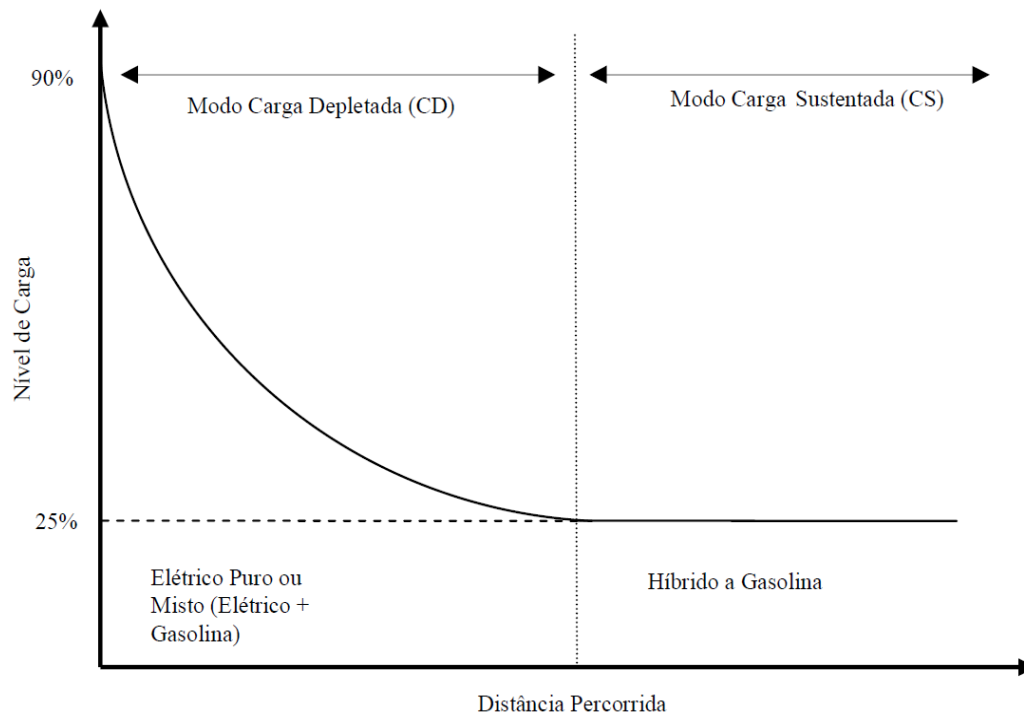


Figura 2-16 Ciclos de Descarga Típicos, adaptado de [31]

O eixo vertical da Figura 2-16 representa o nível de carga da bateria de um VHEP convencional que, para prolongar a vida útil da bateria, nunca está em 100% nem zero. No exemplo acima, a bateria trabalha na faixa de 25%-90%, o que significa dizer que 35% da capacidade total da bateria não é utilizada, ou que o grau de descarga (*depth of discharge* – DOD) é de 65%. O eixo vertical é o nível da carga (ou *state of charge* – SOC), e o eixo horizontal representa a distância percorrida.

Na Figura 2-16, a bateria inicia o ciclo com carga máxima (obtida da rede elétrica) de 90%. No modo CD, a energia armazenada na bateria é utilizada para percorrer determinada distância – a bateria é “depletada”. Quando a bateria é depletada até um nível mínimo (no exemplo, SOC de 25%), o veículo entra no modo CS, no qual a carga da bateria é “sustentada” pelo MCI. O automóvel permanece no modo CS até ser novamente conectado na rede elétrica, e a bateria ser recarregada.

Um segundo ponto conceitual importante a respeito do VHEP é que ele pode funcionar no modo CD como elétrico puro ou misto, utilizando eletricidade e gasolina. Como elétrico puro, o VHEP utiliza apenas a energia da bateria, e o MCI não é acionado. Como misto, o VHEP utiliza tanto a energia da bateria quanto o MCI, simultaneamente. Desta forma, um VHEP rodando no modo CD

como elétrico puro precisa de uma bateria com mais capacidade de fornecer energia do que um VHEP rodando no modo CD como mistos gasolina e elétrico.

Para indicar a distância no modo CD é comumente utilizada a notação VHEP-X, onde X representa a distância, geralmente em milhas. Por exemplo, um VHEP-10 percorre 10 milhas (ou 16 km) no modo CD até entrar no modo CS. No entanto, esta notação não indica se o VHEP funciona no modo elétrico puro ou no modo misto, nem especifica as condições de direção. Portanto, quando comparamos dois ou mais VHEP, devemos levar em conta o tipo de operação no modo CD e o ciclo de direção.

O ciclo de direção é um padrão de acelerações, velocidades e frenagens num determinado intervalo de tempo, e é normalmente utilizado para avaliar o consumo de combustível e o desempenho de baterias. Os dois ciclos de direção mais comuns são os definidos pela U.S. *Environmental Protection Agency* (EPA), o órgão de proteção ambiental norte-americano: o *Urban Dynamometer Driving Schedule* (UDDS) e o *Federal Highway Schedule* (HWFET), representados na Figura 2-17 e na Figura 2-18.

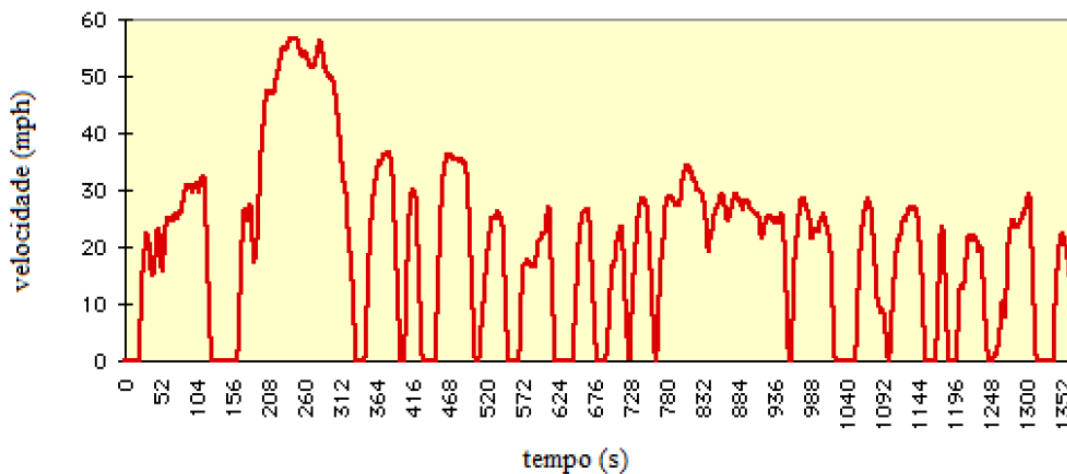


Figura 2-17 *Urban Dynamometer Driving Schedule* (UDDS) [32]

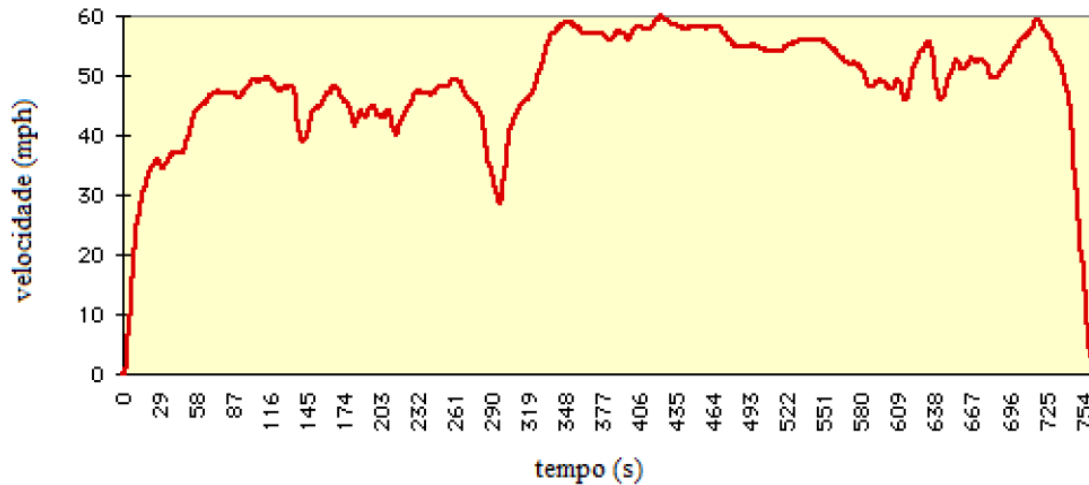


Figura 2-18 Federal Highway Schedule (HWFET) [32]

O UDDS simula as condições de direção nos centros urbanos, enquanto o HWFET simula as condições de direção em rodovias. Ambos os ciclos de direção foram criticados por não representarem devidamente a agressividade de motoristas norte-americanos [33], sendo que uma direção mais agressiva resulta na redução da distância percorrida no modo CD. Portanto, ao se utilizar a nomenclatura VHEP-X, deve-se considerar não apenas a premissa do ciclo de direção assumido, mas também a representatividade desta premissa em relação à realidade.

2.4. Sistemas *In-Wheel*

O sistema de motorização *In-Wheel* ou *Hub Motor* é um sistema inovador e simples. Como o próprio nome já sugere, é simplesmente a incorporação de um motor elétrico no cubo das rodas do veículo, podendo ser 4x2 ou mais comumente utilizado 4x4.

Este sistema permite que o motor tracione diretamente a roda do veículo. Os motores elétricos são controlados de forma mais simples que os motores de combustão interna, o que permite melhorar o desempenho do automóvel. Esta melhoria possibilita o desenvolvimento de outras tecnologias tais como prevenção de acidentes, já que com esse sistema é possível aplicar uma gama de controles inteligentes para auxílio da condução do veículo [34].

Esta tecnologia já existe há algum tempo: a primeira patente deste sistema surgiu em 1884, por Wellington Adams para a companhia elétrica Adams nos Estados Unidos [35]. O primeiro motor funcional instalado no cubo de uma roda surgiu em 1890, patenteado por Albert Parcele [36]. O veículo elétrico mais célebre que utilizou esta tecnologia foi o *Lohner-Porsche*, que utilizava quatro motores elétricos independentes para cada uma de suas rodas [15].

A pesquisa e o desenvolvimento destes sistemas é algo crescente e algumas empresas estão se destacando no desenvolvimento desta tecnologia. Os principais sistemas já desenvolvidos são: Michelin com a sua *Active Wheel Drive* [37], Siemens com a eCorner VDO [38], Bridgestone com a *Dynamic-Damping In-Wheel Motor Drive System* [39], Mitsubishi Motors com o sistema *MIEV* [40], e Protean com o sistema *in-wheel motor technology* [41].

O sistema da Michelin e da Siemens incorpora uma suspensão ativa ao sistema *motor In-Wheel*. Esta suspensão ativa é atuada por um segundo motor elétrico e diminui o efeito causado pelo acréscimo de peso à massa não amortecida [37] e [38].

As Figuras 2-19 e 2-20 mostram respectivamente os sistemas da Michelin e Siemens.



Figura 2-19 Michelin Active Wheel Drive [37]

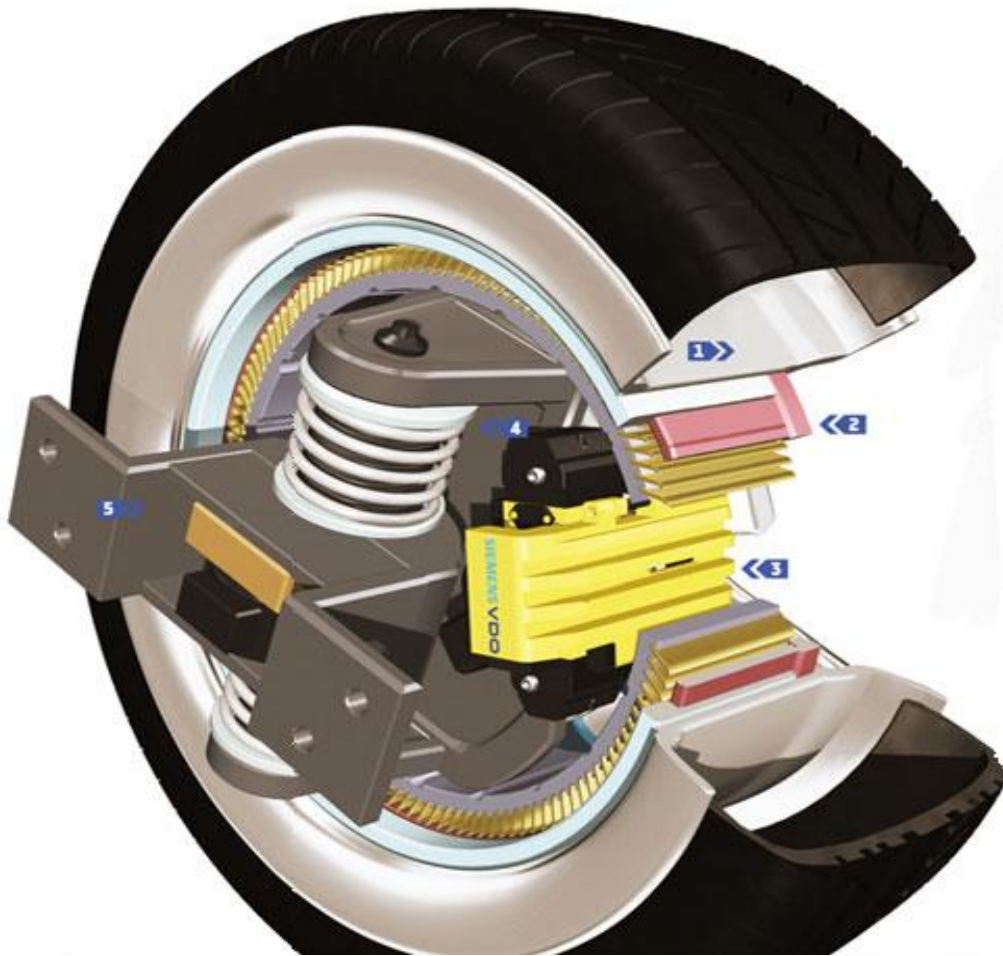


Figura 2-20 Siemens eCorner VDO [38]

Na Figura 2-20, destacam-se os componentes:

1. O conjunto: A parte externa da roda continua coberta por um pneu, mas com sensores para controlar a pressão. A revolução está dentro, onde o *eCorner* exige uma arquitetura padronizada, com módulos que podem ser trocados de forma simples. A Siemens VDO garante que o peso não será muito maior que o de um conjunto de roda comum.
2. Motor: Cada roda abriga um motor elétrico que trabalha sozinho ou em parceria com um motor a combustão, no caso de um carro híbrido. A prioridade, porém, é que seja 100% elétrico. Assim, o sistema de motores individuais elimina as conexões mecânicas, além de aproveitar 96% da energia.
3. Freios: Chamados de *Electronic Wedge Brakes (EWB)* são discos acionados por pequenos motores elétricos, em vez de pistões, reduzindo o peso e o espaço ocupado por dutos hidráulicos. Quando houver desaceleração, cada motor elétrico

ainda funcionará como um gerador, ajudando a frear o carro, ao mesmo tempo em que aproveita a energia para recarregar as baterias.

4. Suspensão: Cada roda possui um conjunto de suspensão ativa, com sensores eletrônicos aliados a amortecedores motorizados, para gerenciar o contato dos pneus com o asfalto. Todo o sistema é muito compacto, para caber dentro do aro da roda. Os sistemas auxiliares (ESP e ABS) trabalham integrados, para garantir a melhor aderência possível.

5. Direção: O sistema de direção é todo eletrônico e motorizado, abolindo as conexões mecânicas entre o volante e as rodas.

A estratégia da Bridgestone para resolver o problema do acréscimo de massa à roda é o acoplamento flexível no motor com um sistema de suspensão independente do veículo, utilizando para isso quatro molas e dois amortecedores tubulares que isolam o motor da massa não amortecida. A Bridgestone afirma que o motor funciona como um amortecedor, eliminando as vibrações causadas pela irregularidade do piso através das vibrações do motor [39].

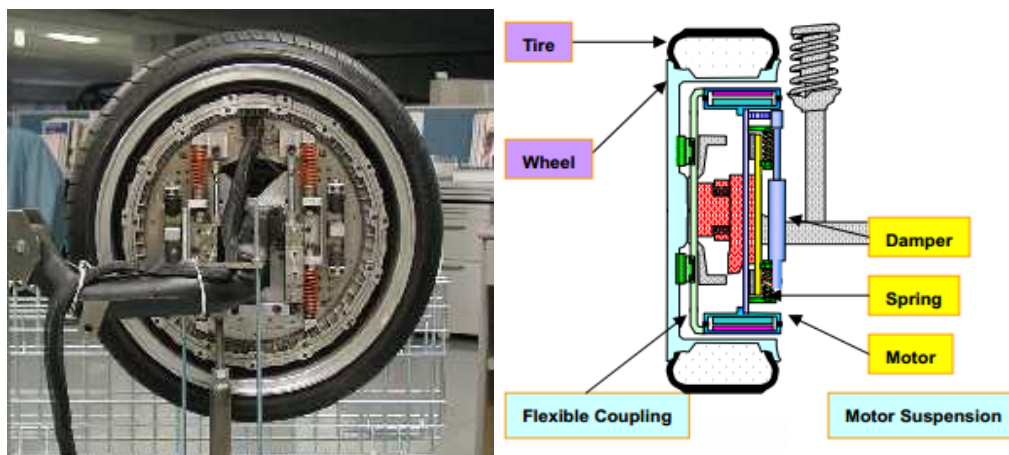


Figura 2-21 Bridgestone com a Dynamic-Damping In-Wheel Motor Drive System [39]

As figuras 2-22 e 2-23 mostram respectivamente os sistemas da Mitsubishi e Protean. Ambos os sistemas são mais simples do que os sistemas mostrados anteriormente, porém são tão eficientes quanto. A principal diferença é em relação ao sistema de suspensão, onde tanto a Mitsubishi quanto a Protean utilizam a

suspensão convencional dos veículos. A preocupação com o aumento da massa não suspensa do veículo é pertinente, porém como será mostrado neste trabalho, os problemas aparecem quando este aumento é muito grande em relação à massa total do veículo. Se a massa do sistema de motorização independente for proporcionalmente alterada em relação à massa do veículo, este problema é resolvido e assim não é necessária uma suspensão independente para o sistema.

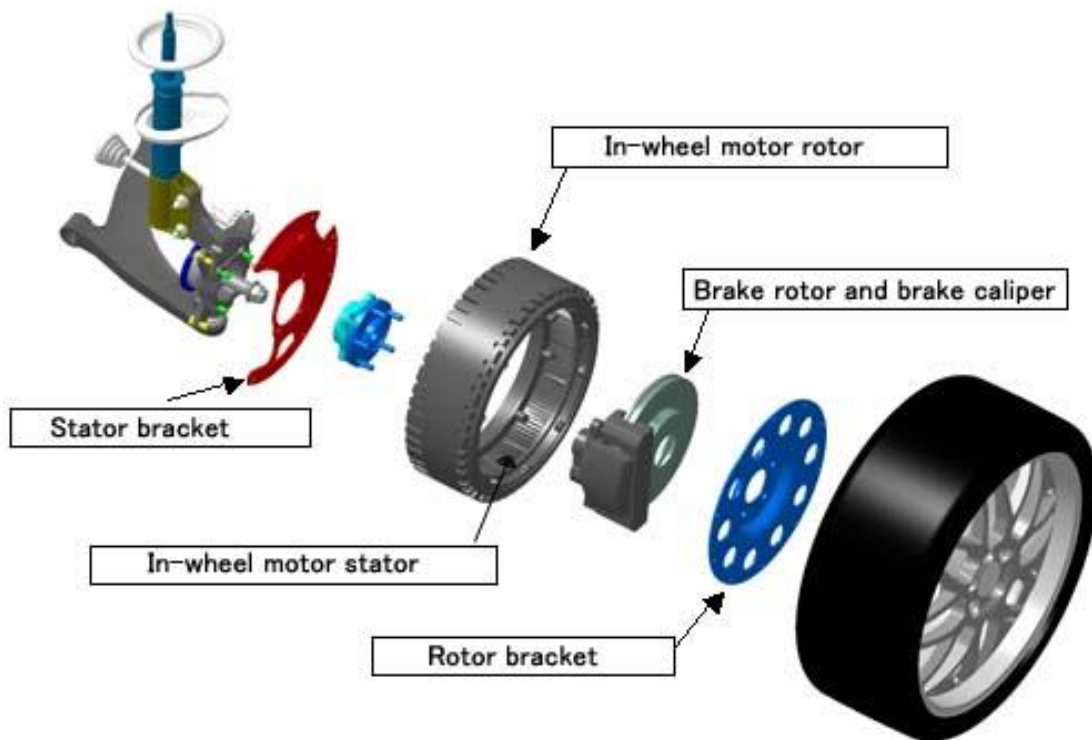


Figura 2-22 Mitsubishi Motors com o sistema MIEV [40]

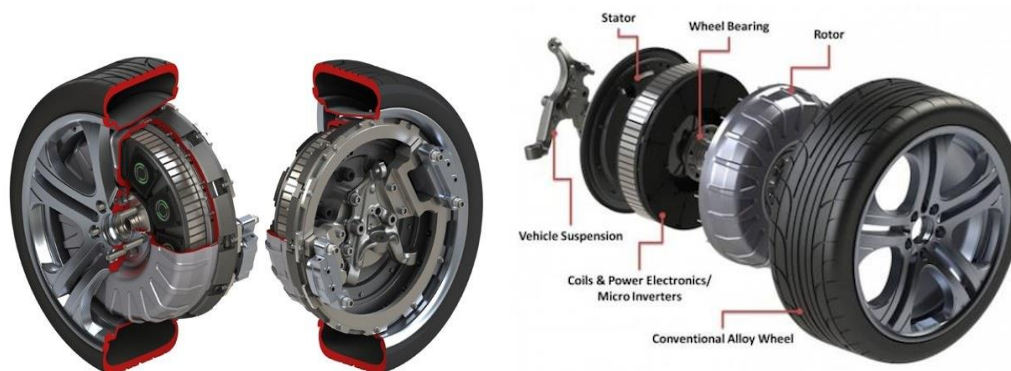


Figura 2-23 Protean com o sistema *in-wheel motor technology* [41]

O sistema da Protean até o momento é o sistema de motorização independente mais simples já desenvolvido. Este sistema foi desenvolvido com o intuito de transformar veículos convencionais de combustão interna em veículos puramente elétricos ou híbridos. Além da simplicidade e maior eficiência de um motor elétrico, este tipo de sistema permite outras vantagens. Quando se monta um motor elétrico diretamente na roda, a eficiência energética do veículo aumenta, pois a transmissão da potência do motor é aplicada diretamente à roda do veículo, reduzindo as perdas. Esta alteração permite a eliminação de elementos mecânicos que degradam parte da potência transmitida pelo motor, tais como sistema de transmissão, caixa de velocidades, entre outros. Além disso, a massa do veículo é reduzida, reduzindo também o custo de fabricação mecânica do veículo [42] e [43].

As rodas do veículo são controladas por um computador de maneira independente, possibilitando uma resposta dinâmica do veículo mais eficaz. Este fato permite que também outros sistemas de segurança possam ser implementados a baixo custo: ABS, sistema de frenagem regenerativa, sistema de *cruise control* ativo, assistência à frenagem, entre outros.

A tecnologia das rodas motrizes cria um espaço vazio no veículo no local onde antes estavam os componentes mecânicos acima referidos. Isto permite que o veículo seja redesenhado, aumentando o espaço disponível, a segurança e conforto dos passageiros. O sistema de motorização *In-Wheel* permite ainda que o centro de massa do veículo baixe, aumentando a sua segurança e estabilidade.

A Figura 2-24 apresenta três modelos que foram modificados e utilizam o sistema de motorização independente da Protean, sendo os dois primeiros elétricos puros e o último híbrido, demonstrando assim que o sistema de motorização independente diretamente nas rodas pode ser o futuro das novas gerações de veículos elétricos.

Volvo C30 Series HEV (2007)

- Four Protean Drive™ motors
- One motor at each wheel
- AWD battery EV
- 0-60 mph in 5 seconds



Ford F-150 EV (2008)

- Four Protean Drive™ motors
- One motor at each wheel
- AWD battery EV
- Electric truck with over 7,000 lb GVW
- IC engine removed



BRABUS Hybrid based on Mercedes-Benz E-Class

- Diesel engine rear-wheel-drive vehicle with Protean Drive™ also powering the rear wheels
- Debuted on the Brabus stand at the 2011 Frankfurt Motor Show
- Match-funded German government program for the conversion of Mercedes E-Class taxis.
- 0-100 kph (0-62 mph) in 7.4 seconds and 60-120 kph (37-75 mph) in 5.6 seconds



Figura 2-24 Modelos que utilizam o sistema da Protean [41]

2.5. Motores Elétricos

Seria impossível este estudo sem o conhecimento sobre os motores elétricos, portanto neste tópico será abordado um pouco do histórico e do funcionamento dos principais tipos de motores elétricos.

Em 1600 o cientista inglês William Gilbert publicou, em Londres, a obra intitulada *De Magnete*, descrevendo a força de atração magnética. O fenômeno da eletricidade estática já havia sido observado antes pelo grego Tales, em 641 a.C.: ele verificou que ao friccionar uma peça de âmbar com um pano, esta adquiria a propriedade de atrair corpos leves, como pêlos, penas, cinzas, etc [44].

A primeira máquina eletrostática foi construída em 1663 pelo alemão Otto Von Guericke e aperfeiçoada em 1775 pelo suíço Martin Planta. O físico dinamarquês Hans Christian Oersted, ao fazer experiências com correntes elétricas, verificou em 1820 que a agulha magnética de uma bússola era desviada de sua posição norte-sul quando esta passava perto de um condutor no qual circulava corrente elétrica. Esta observação permitiu a Oersted reconhecer a íntima ligação entre o magnetismo e a eletricidade, dando assim, o primeiro passo em direção ao desenvolvimento do motor elétrico [44].

Somente em 1886, Siemens construiu um gerador sem a utilização de ímã permanente, provando que a tensão necessária para o magnetismo poderia ser retirada do próprio enrolamento do rotor, isto é, que a máquina poderia se auto-excitar. O primeiro dínamo de Werner Siemens possuía uma potência de aproximadamente 30 watts e uma rotação de 1200RPM. A máquina de Siemens não funcionava somente como um gerador de eletricidade, mas também podia

operar como um motor, desde que se aplicasse aos seus bornes uma corrente contínua [44].

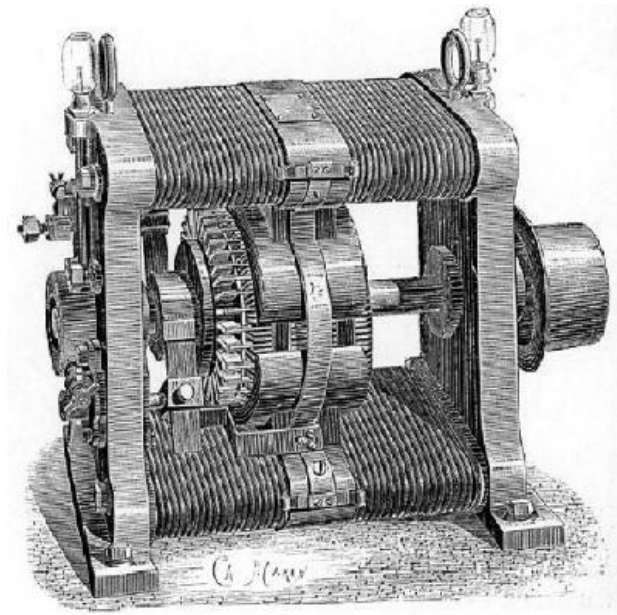


Figura 2-25 O primeiro dínamo de Werner Siemens [44]

Os principais tipos de motores elétricos modernos são: Motores elétricos *DC*, Motores elétricos *AC*, e Motores elétricos *DC brushless*. Os motores elétricos *AC* são mais utilizados na indústria e não na área veicular, em particular em sistemas *In Wheel*, devido às suas grandes dimensões e maior dificuldade para seu controle.

Motores *DC* (ou *CC*) são motores que trabalham com corrente contínua, e são amplamente utilizados na robótica e na área veicular. As principais vantagens em sua utilização são atingir facilmente alto torque, serem acionados diretamente por baterias, e terem controle de velocidade relativamente simples [45].

Os três principais tipos de motores *DC* são os de ímã permanente, em paralelo e em série. Os em série são utilizados principalmente como motores de arranque em veículos com motores de combustão interna, sua principal característica é o alto torque inicial e uma alta velocidade máxima, porém, se estes motores são acelerados sem carga, eles podem atingir uma velocidade muito alta e se autodestruir [45].



Figura 2-26 Motor DC de ímã permanente com escovas [45]

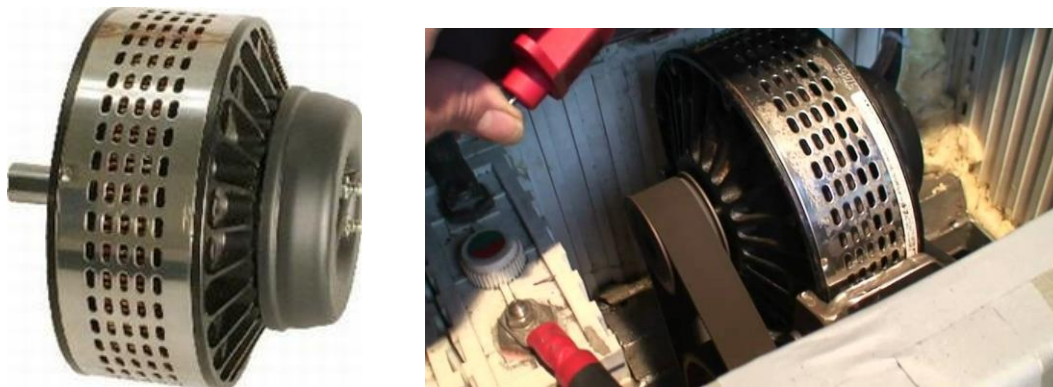


Figura 2-27 Motor DC Série LEM 200-127 [46]

Os motores de corrente contínua sem escovas ou motores BLDC (*Brushless DC*) oferecem diversas vantagens sobre os motores de corrente contínua com escovas, dentre as quais se podem destacar a confiabilidade mais elevada, o ruído reduzido, a vida útil mais longa (devido à ausência de desgaste das escovas), a eliminação da ionização do comutador, e a redução total de EMI (interferência eletromagnética) [47]. Tais características coloca este tipo de motor elétrico em vantagem sobre os demais para utilização em veículos elétricos.

Os principais sistemas In Wheel utilizam motores elétricos *DC brushless*: nesses sistemas, o motor é projetado especialmente para a roda do veículo, isso devido à sua forma simples e sua facilidade de customização.



Figura 2-28 Motor elétrico DC brushless [48]

2.6. Baterias e Super Capacitores

As principais características das baterias e super capacitores que são determinantes para veículos elétricos são a capacidade de potência (medida em KW) e a energia armazenada (medida em KWh). Ambas dependem de variáveis como o alcance no modo CD, o tipo de operação no modo CD (elétrico puro ou misto), o ciclo de direção, o *design* do veículo e o tipo de recarga, entre outros.

A potência é a taxa de transferência de energia. Nos automóveis convencionais, a potência é proporcional à taxa com que o combustível é fornecido ao MCI: quanto mais se acelera um automóvel, mais combustível é consumido (no caso dos VEs operando em modo CD, mais potência é fornecida pela bateria). A potência da bateria é um fator crítico para os automóveis elétricos, cujo desempenho é limitado por quantos kW a bateria é capaz de fornecer.

A capacidade de armazenamento, medida geralmente em kWh, é a característica que determina a distância que pode ser percorrida no modo CD e o peso do sistema de baterias, e está relacionada com a quantidade de energia que a bateria é capaz de armazenar.

Conforme o uso e com o passar do tempo, a performance da bateria (o que inclui potência, capacidade de armazenamento e segurança) pode se degradar. Os principais indicadores da longevidade da bateria são: tempo de uso, número de ciclos profundos, número de ciclos rasos, e temperatura, discutidos a seguir:

- i) O tempo de uso é decorrente da degradação da bateria com o passar do tempo, e independe de quanto e de como a bateria é utilizada;
- ii) O número de ciclos profundos é a quantidade de descargas e recargas que a bateria suporta no modo CD;
- iii) O número de ciclos rasos está relacionado com a quantidade de vezes em que varia o estado de carga (SOC), que pode ser alto pois frequentemente a bateria sofre cargas e descargas. Os ciclos rasos degradam a bateria, mas em menor escala que os ciclos profundos;
- iv) A temperatura a que a bateria é submetida quando fora de operação tem alguma influência sobre sua longevidade. Embora não existam muitos estudos a respeito [33], deve-se ter em mente que altas temperaturas podem reduzir a vida útil da bateria.

Quando se comparam diferentes tecnologias de baterias, é comum utilizar a densidade de potência (ou potência por quilograma da bateria em W/kg) e a densidade energética (ou energia por quilograma de bateria em Wh/kg). A Figura 2-29 compara as densidades de energia e de potência de diversos tipos de tecnologias de baterias.

Apesar da relação inversa entre densidade de energia e densidade de potência, as baterias de íon-lítio (Li-Ion) têm clara vantagem em relação às demais tecnologias tanto em termos de energia quanto de potência por kg. Baterias para VHE devem ter grande capacidade de armazenamento de energia, enquanto baterias para VHEP geralmente têm alta densidade de potência.

No que diz respeito aos ciclos de carga-descarga, baterias de VHEP estão sujeitas a ciclos de descarga profunda, seguidos por ciclos rasos, por conta da frenagem regenerativa e do auxílio do MCI. Baterias para VHE, por sua vez, devem sofrer ciclos de descarga profunda constantemente, sem tantos ciclos rasos. Economias de escala devem favorecer a difusão de somente um tipo de bateria para ambas as tecnologias automotivas [19].

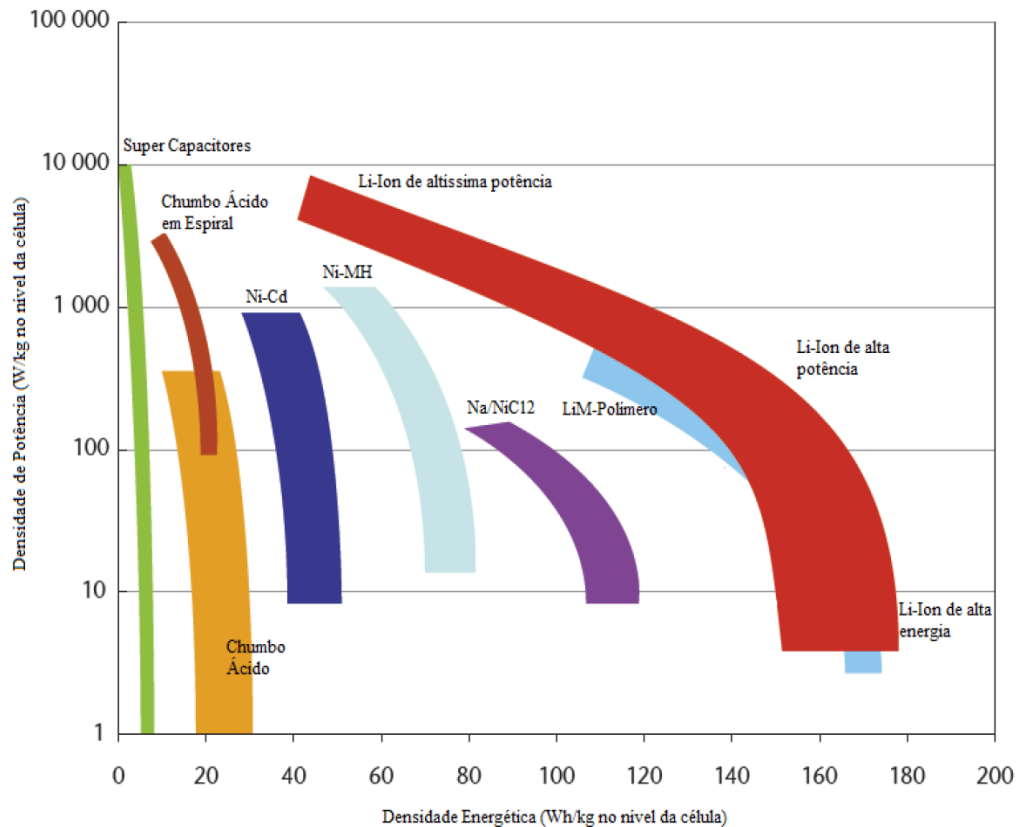


Figura 2-29 Densidade Energética e Densidade de Potência de Diferentes Tipos de Bateria [19]

Outro aspecto importante diz respeito à segurança, já que as baterias contêm produtos químicos que podem se tornar perigosos caso elas sofram curto-circuito, impactos, sobrecarga, ou sejam expostas a altas temperaturas. Por esse motivo, baterias de uso automotivo são controladas por unidades de controle que, entre outras tarefas, monitoram tensão e temperatura.

As duas tecnologias mais utilizadas nas baterias para VE são a de níquel-hidreto metálico (NiMH) e íon-lítio. As baterias NiMH foram até agora as mais utilizadas nos elétricos e híbridos. Elas têm alta confiabilidade e longa vida útil, mas são caras, relativamente pesadas e não possuem muita eficiência térmica (isto é, esquentam), além de sofrer forte degradação se descarregadas completamente. Não há expectativas quanto a possibilidade dos preços da bateria NiMH caírem no futuro, tampouco de progressos técnicos, uma vez que esta tecnologia de bateria já está atingindo a maturidade [33].

As baterias Li-Ion, por outro lado, são a grande aposta da indústria para o futuro do carro elétrico. Não são tóxicas, e o lítio é uma matéria-prima barata. Quando comparadas com as baterias NiMH, possuem as seguintes vantagens [30]:

- i) Alta potência: entre 1,4x e 1,7x a densidade energética da bateria NiMH, o que implica em baterias mais leves e menores;
- ii) Eficiência: são mais eficientes na carga e descarga, ou seja, não esquentam, prolongando sua vida útil e aumentando a segurança;
- iii) Custos: possuem menos custo de metal por kWh, apesar de ter maiores custos para os demais componentes.

As principais desvantagens do Li-Ion em relação à NiMH são [30] :

- i) Segurança: a sobrecarga, a carga em dias extremamente frios, curtos-circuitos e utilização em condições extremas podem destruir a bateria, ou até incendiá-la;
- ii) Performance: células de lítio não funcionam devidamente em temperaturas muito altas ou muito baixas, e podem se deteriorar em níveis de carga muito altos ou muito baixos;
- iii) Durabilidade: devido ao custo alto, é necessário que as baterias Li-Ion suportem milhares de ciclos de carga e descarga (300.000 para híbridos e 7.000 para VEs) e durem 15 anos, mantendo 80% de sua capacidade inicial de energia e potência ao final de sua vida útil; e
- iv) Custo: o custo por kWh ainda é alto se comparado às baterias de NiMH.

O custo das baterias é um dos fatores cruciais para a viabilidade comercial dos VEs e VHEPs. Um dos maiores desafios atualmente é tornar o custo de aquisição dos automóveis a bateria compatível com o dos automóveis convencionais, tarefa dificultada pelo alto custo das baterias. Nos EUA, uma bateria de Li-Ion custa atualmente às montadoras cerca de US\$ 600/kWh, enquanto para o consumidor final este valor fica em torno de US\$ 250/kWh [33].

Super capacitores, ou ultra capacitores, são equipamentos capazes de armazenar energia sobre uma superfície de placas paralelas. Conforme pode ser observado na Figura 2-29, quando comparados às baterias, eles possuem alta densidade de

potência e baixa densidade energética, o que significa uma alta capacidade de carga e descarga e uma baixa capacidade de armazenamento. Suas características variam conforme o material utilizado na sua construção, sendo que sua densidade energética se situa entre 4-8 Wh/kg, enquanto a potência disponível fica entre 800-1400 W/kg. O ciclo de vida dos super capacitores é de centenas de milhares de ciclos de descarga profunda.

O desenvolvimento de super capacitores para aplicações automotivas ocorre desde os anos 1990. A maior parte da pesquisa tem sido focada no carbono microporoso, mas atualmente a P&D tem se concentrado em outras formas de carbono e em óxidos metálicos, bem como no desenvolvimento de equipamentos híbridos, isto é, que conjugam características tanto de super capacitores quanto de baterias.

As baterias são caras, em parte, pelo fato de se degradarem com o uso e com o tempo. Como compensação, os fabricantes de automóveis projetam veículos com baterias maiores que o necessário, o que aumenta sua vida útil.

Super capacitores, quando utilizados em paralelo com as baterias, reduzem a necessidade de grandes baterias [49]. Os super capacitores não se degradam significativamente com o tempo, mesmo quando carregados e descarregados pesadamente sucessivas vezes. Desta forma, super capacitores podem proteger as baterias de sobrecargas de potência, que ocorrem nos momentos de aceleração, por exemplo.

Com a utilização de super capacitores, as baterias podem ser projetadas para armazenar mais energia. Conforme pode ser observado na Figura 2-29, existe um *tradeoff* entre a velocidade de carga e descarga (potência) da bateria e a quantidade de energia que ela é capaz de armazenar. Se conjugadas com super capacitores, pode-se reduzir o tamanho da bateria e, ao mesmo tempo, permitir maior capacidade de armazenamento do sistema [49].

Uma alternativa que já está implementada é o aluguel da bateria para o consumidor. Este modelo de negócio é utilizado pela montadora norte-americana Tesla na venda de seus veículos elétricos. Desse modo, o custo do veículo diminui e o consumidor não precisa se preocupar com a vida útil e com o descarte das baterias do veículo.

2.7. Sistema de Recuperação de Energia Cinética “KERS”

SREC ou *KERS* (Sistema de Recuperação de Energia Cinética, em inglês *Kinetic Energy Recovery System*) é um sistema utilizado para captar a energia que seria desperdiçada no momento da desaceleração do veículo e, em seguida, a reutilizar para aumentar a potência do veículo. Em sistemas de frenagem convencionais, em que a energia se perde na forma de calor, este sistema já é usado, em especial no mundo do automobilismo.

O *KERS* vem sendo desenvolvido desde a década de 1990, porém a sua apresentação para o público em geral foi somente em 2009 quando os carros da Fórmula 1 começaram a utilizar o sistema. O primeiro sistema de *KERS* utilizado na Fórmula 1 pesava 24Kg e possuía uma capacidade energética de 400KJ e uma potência de 60KW [50].

O método mais comum utilizado para o armazenamento da energia recuperada pelo *KERS* é a utilização de baterias ou super capacitores, porém outro método também é utilizado, este totalmente mecânico através de um sistema de volante de inércia.

O *KERS* é composto basicamente por um motor elétrico que funciona como gerador no modo de carregamento no momento da frenagem e como motor para ajudar na aceleração do veículo, uma caixa de controle que monitora todo o sistema e controla o motor elétrico, tanto em modo de carregamento quanto em modo de aceleração, e um conjunto de baterias ou super capacitores onde a energia é armazenada no modo de carregamento e é liberada no modo de aceleração do veículo, vide Figura 2-30.

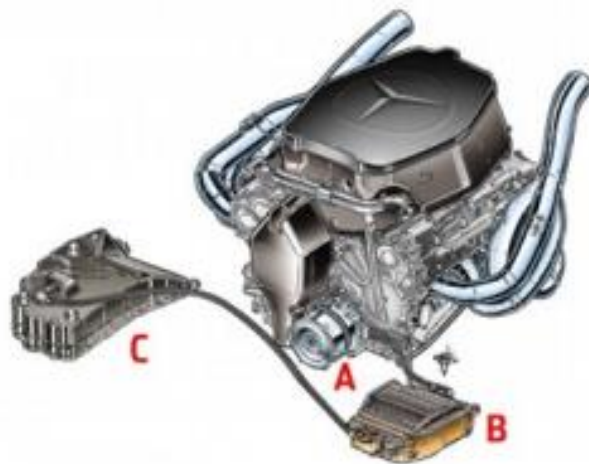


Figura 2-30 A – Motor elétrico, B – Unidade eletrônica de controle, C – Conjunto de baterias [50].

O sistema de recuperação de energia cinética ou *KERS* utiliza o princípio básico da física à “lei da conservação da energia” onde, “a energia não pode ser criada ou destruída, mas pode ser infinitamente convertida” [51]. Quando um veículo está em movimento ele possui energia cinética, no momento da frenagem a mesma energia é convertida em energia térmica sendo dissipada em forma de calor. Com a introdução do *KERS* no momento da frenagem, o motor se transforma em gerador, assim captando a energia cinética que iria ser dissipada como energia térmica e a armazena nas baterias ou nos super capacitores. Assim, esta energia armazenada estará pronta para ser utilizada novamente pelo motor elétrico.

Os sistemas de *KERS* eletrônicos fornecidos pela empresa italiana Magneti Marelli são comumente usados na Fórmula 1 pela Red Bull, Toro Rosso, Ferrari, Renault e Toyota. O principal desafio enfrentado por este tipo de *KERS* é o super aquecimento das baterias de lítio. A BMW tem usado super capacitores, ao invés de baterias, para manter a refrigeração do sistema. Com este sistema, quando o freio é aplicado ao veículo, uma pequena porção da energia cinética é capturada pelo motor elétrico montado numa extremidade do virabrequim do motor [50].

Outro importante fabricante de *KERS* é a *Flybrid*, que desenvolveu um sistema baseado num volante de inércia acoplado por embreagem a um câmbio CVT, ligado ao câmbio do carro. O volante de inércia, feito de aço e fibra de carbono, gira a mais de 60.000 RPM no vácuo, graças a uma câmara selada, para diminuir

o atrito. O equipamento completo pesa 24 kg e é capaz de gerar até 60 kW (pouco mais de 81,5 cv). É o controle da relação das polias do câmbio CVT que define quando o sistema armazena ou libera energia. Na desaceleração, o movimento é dirigido ao volante de inércia, que acumula energia [50].

A tecnologia da *Flybrid* não é exatamente nova. A própria empresa explica que alguns veículos híbridos, como ônibus, e até protótipos de carros, já empregaram algo semelhante. A *Flybrid* conseguiu melhorar o sistema, pois utiliza um volante de inércia muito leve, que compensa a falta de massa com a altíssima rotação. Segundo a *Flybrid*, foi possível também uma redução significativa do efeito giroscópico.

O sistema desenvolvido pela Williams também usa um volante de inércia, mas ele é acionado eletricamente, e não há um câmbio CVT. No *KERS* da equipe Williams o volante de inércia, também mantido em compartimento a vácuo, é produzido em fibra de carbono, com rolamentos de cerâmica e eixo de aço, e ultrapassa 100.000 RPM. No sistema da Williams, partículas magnéticas são incorporadas ao material do volante de inércia, e um inversor permite o fluxo no sentido contrário - quando o piloto pressiona o botão de acionamento do *KERS*, o volante de inércia funciona como um gerador, enviando corrente ao motor elétrico auxiliar.

A vantagem deste sistema na Fórmula 1 é que ele possibilita o aumento da potência do veículo durante a aceleração, porém a sua utilização é controlada já que o *KERS* pode ser acionado durante 6 segundos a cada volta. Essa potência é realmente extra, porque não há peso adicional no carro nem consumo de combustível associada a ela. Os 81,5 cv despejados pelo *KERS* representam 10% a mais de potência.

Porém, como em todo sistema há desvantagens na sua utilização. Apesar de relativamente pequeno, o *KERS* ocupa espaço significativo e também é pesado. Embora o seu peso em si não seja o real problema, a sua localização no veículo pode afetar o desempenho dos carros. O regulamento da F-1 estabelece um peso mínimo para o carro, medido com o piloto a bordo [52].

3. Estudo do Comportamento Dinâmico Vertical

A Dinâmica Vertical é o estudo da ação das forças que interagem com o veículo, quando o mesmo é submetido a oscilações e vibrações. As vibrações que um veículo, e conseqüentemente os seus passageiros, estão sujeitos durante o seu funcionamento é uma característica que o projetista do automóvel tenta evitar ou minimizar para a maximização do conforto e segurança dos passageiros.

Apesar de todas as vantagens referidas anteriormente, a utilização de um sistema de motorização independente *In-Wheel* em um veículo elétrico tem uma desvantagem em relação ao seu comportamento dinâmico vertical. Quando se monta um motor elétrico no cubo de uma roda, acrescenta-se uma massa nas rodas que não é amortecida pelo sistema de suspensão. Este aumento, caso seja significativo, pode prejudicar a segurança e o comportamento do veículo. Como resultado do aumento da massa não amortecida, a inércia das rodas é maior, fazendo com que a suspensão demore mais tempo a reagir às solicitações impostas pelo piso. Um aumento da massa nas rodas pode reduzir a estabilidade e o controle do veículo, assim como o conforto dos passageiros [53], [54] e [55].

Desse modo, este capítulo tem como objetivo o estudo do comportamento vertical do sistema proposto. É realizada a modelagem matemática de $\frac{1}{4}$ do sistema mecânico de um veículo elétrico com motorização independente diretamente nas rodas, podendo ser tração 4x4 ou 4x2. São apresentadas simulações e análises da influência do aumento da massa não suspensa na vibração do veículo. São realizadas simulações com duas configurações propostas distintas, uma com o sistema motriz embarcado na massa não suspensa, e outra com o sistema motriz embarcado na massa suspensa do veículo.

Antes da realização da modelagem matemática e das simulações, foi desenvolvido em CAD um desenho tridimensional do sistema, considerando $\frac{1}{4}$ de um veículo elétrico leve de massa aproximada de 800 Kg. Todos os componentes mecânicos foram desenhados com o intuito de serem fabricados para aplicação em um veículo elétrico leve com motorização independente.

3.1. Desenvolvimento do Sistema em CAD

Devido a limitações de componentes neste trabalho, não foi possível projetar um sistema completamente *In Wheel* onde não existe caixa redução. Com os componentes disponíveis, foi projetado um sistema de motorização independente utilizando um motor DC com escovas mas com uma caixa de redução com relação 3:1.

A seguir são apresentadas as duas configurações propostas, uma com o sistema motriz embarcado na massa não suspensa, e outra com o sistema motriz embarcado na massa suspensa do veículo. Os desenhos foram elaborados utilizando o software de CAD *SolidWorks2013®*, e no projeto foram especificados os materiais e componentes existentes no mercado, assim como suas massas e dimensões. Na Configuração 1, o sistema motriz é embarcado na massa não suspensa do veículo, vide figuras 3-1 e 3-2.



Figura 3-1 Duas vistas da Configuração 1 proposta

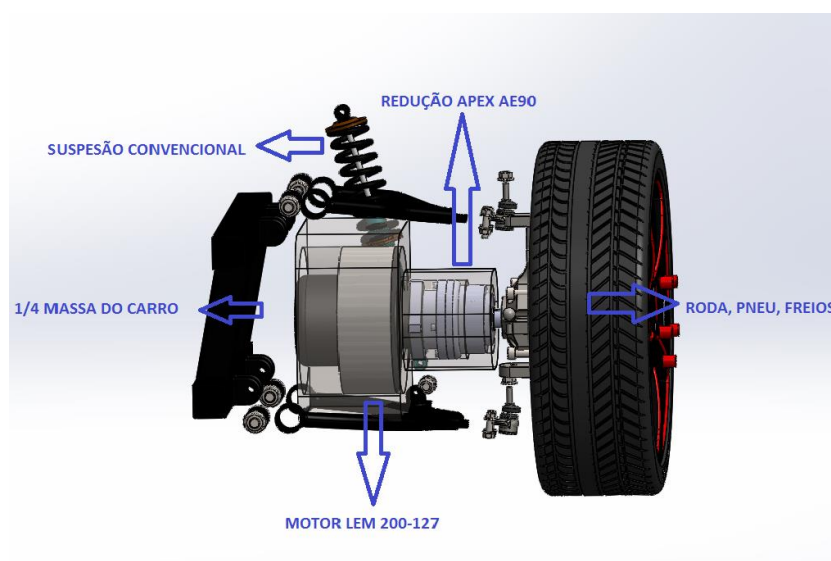


Figura 3-2 Esquemático da Configuração 1 proposta

Na Configuração 2, o sistema motriz é acoplado a uma junta homocinética que realiza o acoplamento ao cubo da roda do veículo, como em um sistema convencional, vide figuras 3-3 e 3-4.



Figura 3-3 Duas vistas da Configuração 2 proposta

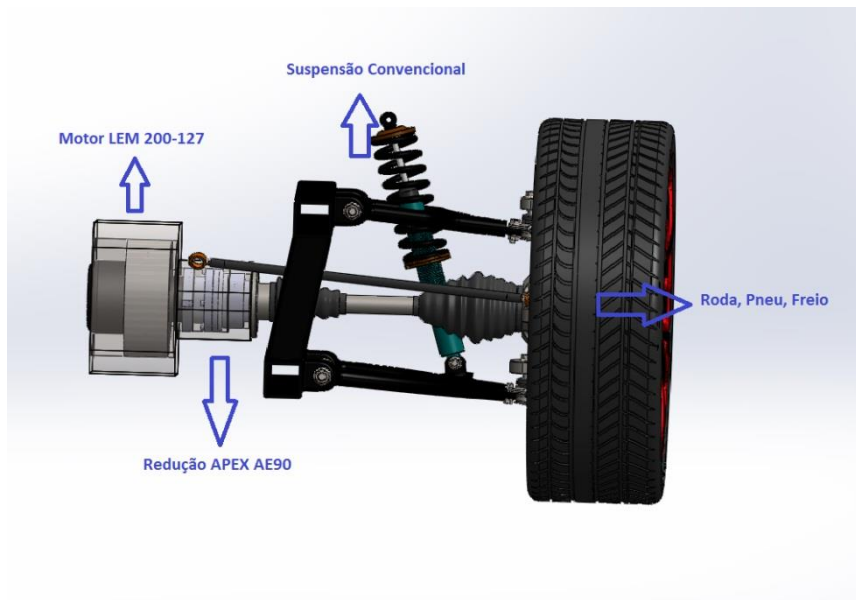


Figura 3-4 Esquemático da Configuração 2 proposta

3.2. Modelagem Matemática do Sistema Mecânico

A Figura 3-5 mostra o diagrama do sistema mecânico simplificado usado na modelagem da Dinâmica Vertical, com graus de liberdade denotados por y . Nesta modelagem, m denota massa, k constante de rigidez das molas e c constante de amortecimento das suspensões. As equações resultam então em

$$m_1 \ddot{y}_1 = k_2(y_2 - y_1) + c_2(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) + k_1(y_0 - y_1) + c_1(\dot{y}_0 - \dot{y}_1) \quad (3.1)$$

$$m_2 \ddot{y}_2 = -k_2(y_2 - y_1) - c_2(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) \quad (3.2)$$

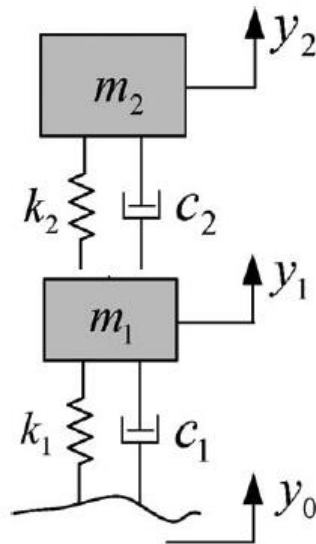


Figura 3-5 Diagrama do sistema mecânico modelado para a dinâmica vertical [56]

Desse modo,

$$m_2 \ddot{y}_2 + c_2(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) + k_2(y_2 - y_1) = 0 \Rightarrow$$

$$m_2 y_2 S^2 + c_2 y_2 S - c_2 y_1 S + k_2 y_2 - k_2 y_1 = 0 \Rightarrow$$

$$y_2(m_2 S^2 + c_2 S + k_2) + y_1(-c_2 S - k_2) = 0$$

$$m_1 \ddot{y}_1 - c_2 \dot{y}_2 + (c_2 + c_1) \dot{y}_1 - k_2 y_2 + (k_2 + k_1) y_1 = k_1 y_0 + c_1 \dot{y}_0 \Rightarrow$$

$$m_1 y_1 S^2 - c_2 y_2 S + (c_2 + c_1) y_1 S - k_2 y_2 + (k_2 + k_1) y_1 = k_1 y_0 + c_1 y_0 S \Rightarrow$$

$$y_2(-c_2 S - k_2) + y_1(m_1 S^2 + (c_2 + c_1) S + (k_2 + k_1)) = y_0(c_1 S + k_1)$$

Obtêm-se assim as funções de transferência:

$$\frac{y_1}{y_0} = \frac{c_1 S + k_1}{m_1 S^2 + (c_2 + c_1) S + k_2 + k_1} \quad (3.3)$$

$$\frac{y_2}{y_0} = \frac{\frac{y_1}{y_0}(c_2 S + k_2)}{m_2 S^2 + c_2 S + k_2} \quad (3.4)$$

3.3. Simulações em MatLab2012®

Após a modelagem matemática do sistema, com as funções de transferência encontradas, são realizadas simulações para analisar o comportamento de vibração

do sistema mecânico proposto em relação a uma entrada y_0 do terreno. Os parâmetros foram escolhidos a partir da análise da tabela da Figura 3.6 [56].

Parâmetros	Média	Mínimo	Máximo
$\varepsilon = \frac{m_s}{m_u}$	3 – 8	2	20
$\omega_s = \sqrt{\frac{k_s}{m_s}}$	1	0.2	1
$\omega_u = \sqrt{\frac{k_u}{m_u}}$	10	2	20
$r = \frac{\omega}{\omega_s}$	0 – 20 Hz	0	200 Hz
$\alpha = \frac{\omega_s}{\omega_u}$	0.1	0.01	1
$\xi = \frac{c_s}{2m_s\omega_s}$	0.55	0	2

Figura 3-6 Tabela de parâmetros para modelo de ¼ de veículo [56]

As relações e parâmetros utilizados a partir da tabela acima, e extraídos do modelo em CAD do sistema proposto, podem ser resumidas em: massa do sistema motoredutor $m_{motoredutor} = 25kg$; massa do veículo $m_{veículo} = 800 kg$; massa do modelo de ¼ de veículo $m_2 = \frac{m_{veículo}}{4}$; massa da roda $m_{roda} = \frac{m_2}{5,5}$; massa combinada da roda e motoredutor $m_1 = m_{roda} + m_{motoredutor}$; e relações sugeridas com unidades no Sistema Internacional: $k_1 = (100 * m_1)N/m$; $k_2 = m_2$; $c_1 = 40Ns/m$; $c_2 = (0,55 * 2 * m_2)Ns/m$.

As figuras 3-7 a 3-9 apresentam a resposta ao degrau unitário, $y_0 = \text{step}$, para uma simulação 1 com $m_{motoredutor} = 25kg$, simulação 2 com $m_{motoredutor} = 0 kg$, e simulação 3 com $m_{motoredutor} = 150 kg$. Note as oscilações quando $m_{motoredutor}$ é significativa. A massa de 150 kg foi escolhida após várias simulações com valores de massa inferiores, sendo que a partir de 150 kg as oscilações apresentaram maior significância.

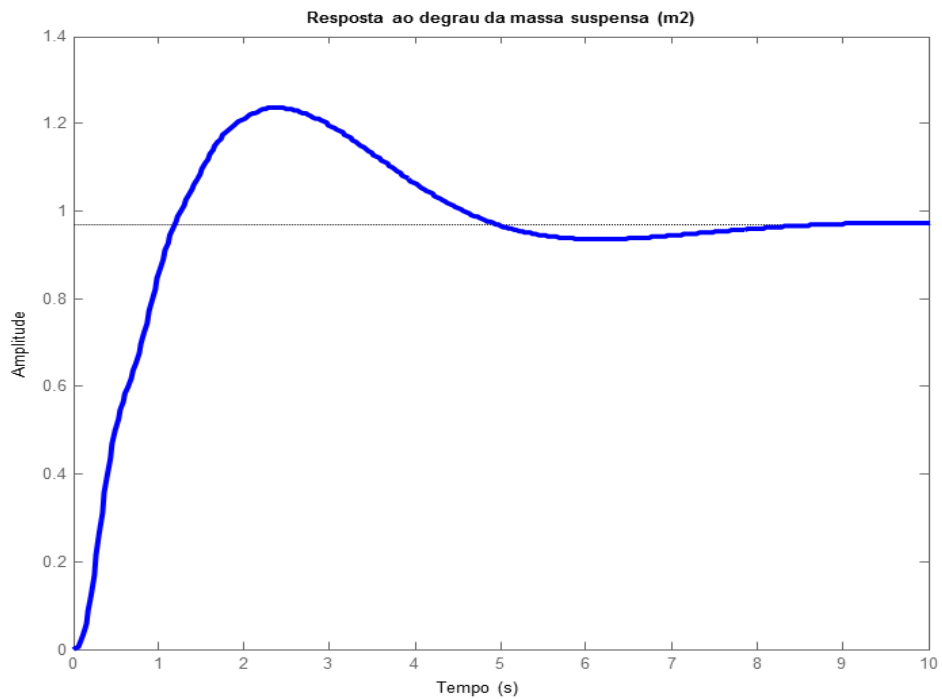


Figura 3-7 Gráfico da simulação 1 em MatLab2012® ($m_{\text{motoredutor}} = 25\text{kg}$)

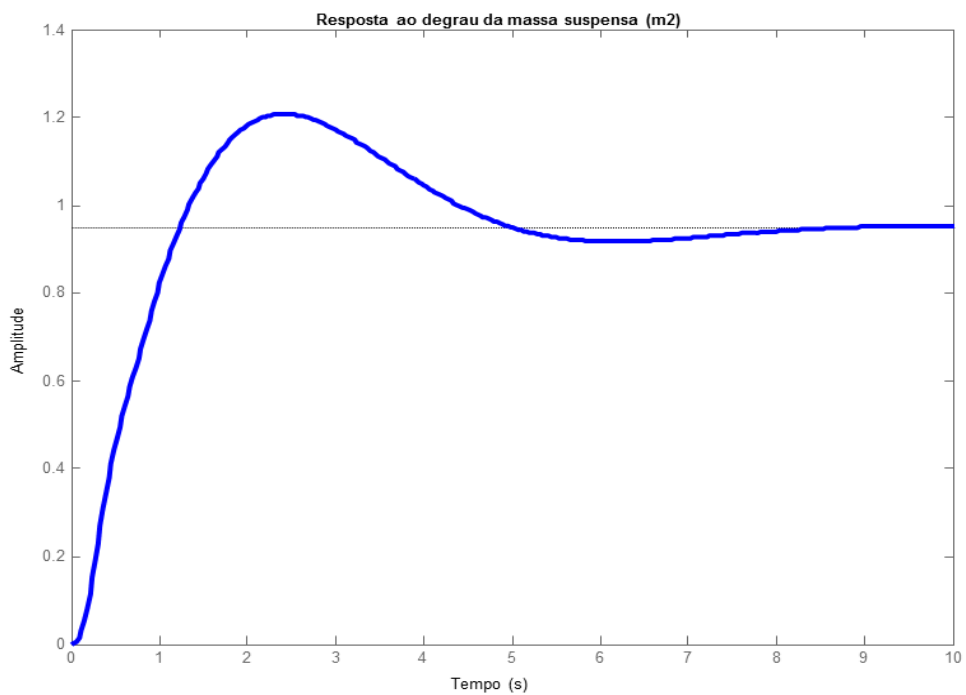


Figura 3-8 Gráfico da simulação 2 em MatLab2012® ($m_{\text{motoredutor}} = 0\text{kg}$)

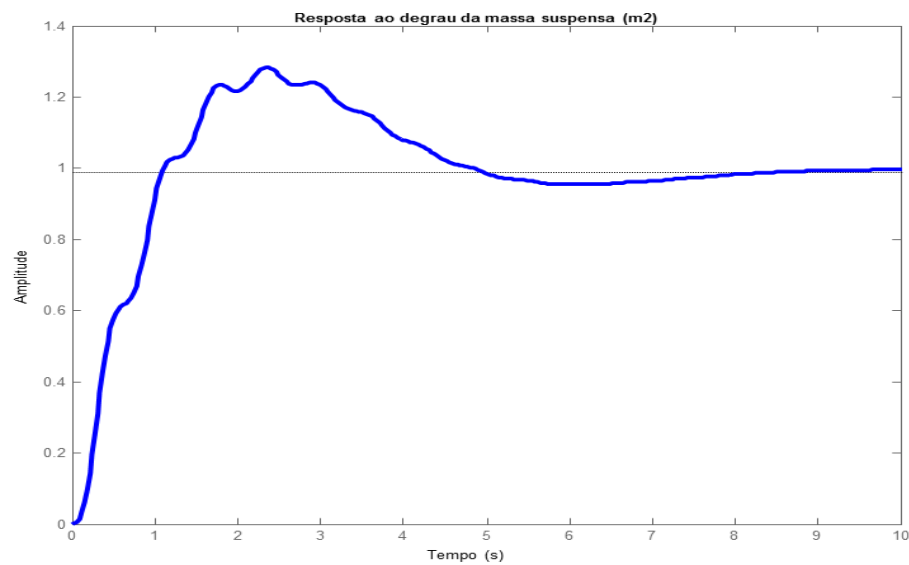


Figura 3-9 Gráfico da simulação 3 em MatLab2012® ($m_{motoreductor} = 150kg$)

As figuras 3-10 a 3-12 mostram a resposta em frequência para os 3 casos, através de seus respectivos Diagramas de Bode. As figuras 3-13 a 3-15 apresentam uma medida de conforto dos passageiros, através da resposta em frequência do *jerk*, definido como a derivada da aceleração.

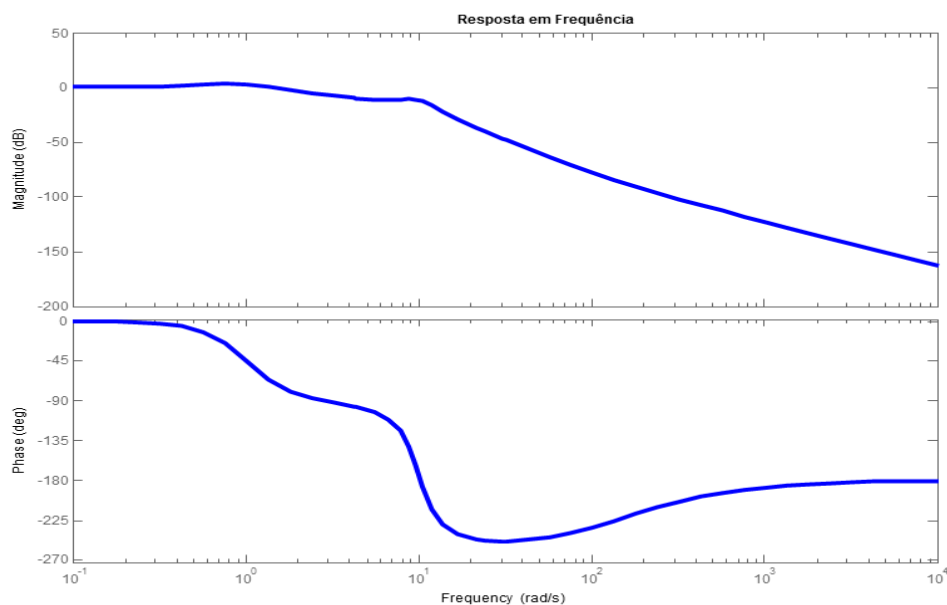


Figura 3-10 Diagrama de Bode da simulação 1 em MatLab2012® ($m_{motoreductor} = 25kg$)

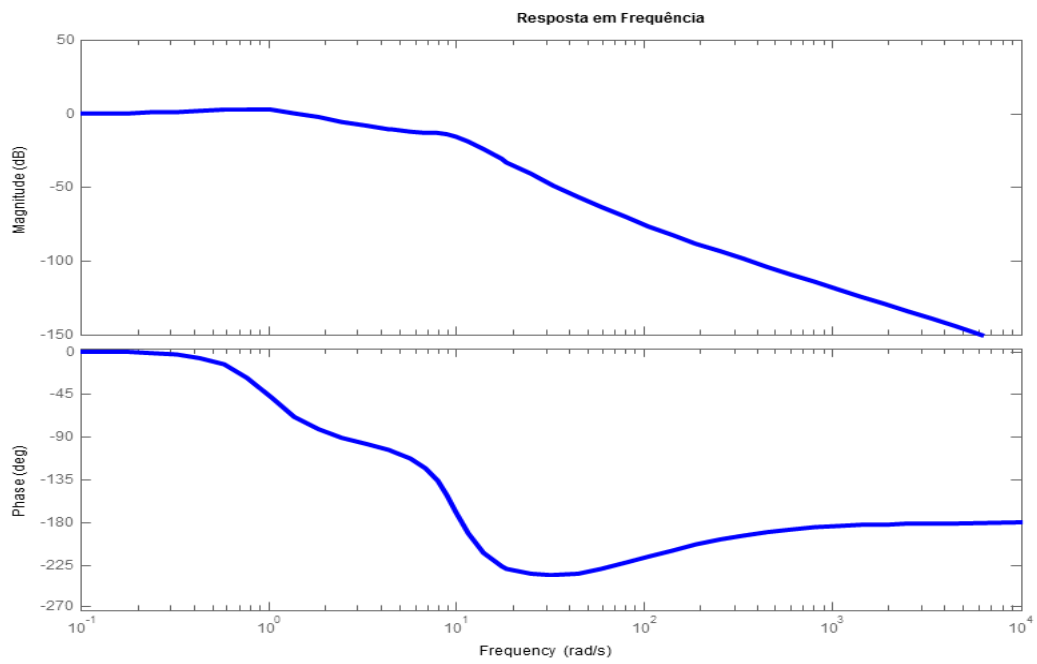


Figura 3-11 Diagrama de Bode da simulação 1 em MatLab2012® ($m_{motoredutor} = 0kg$)

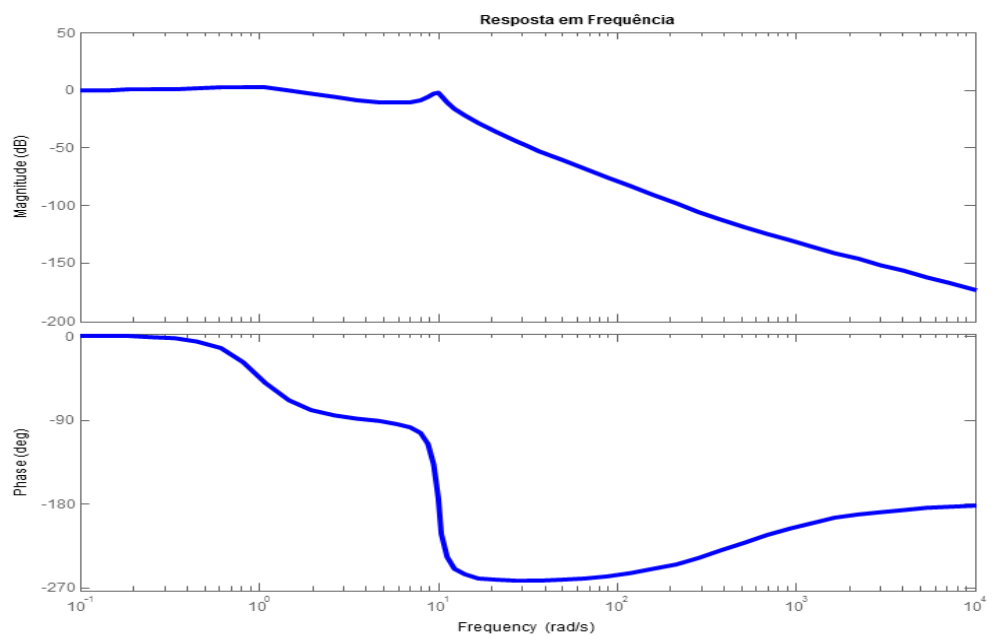


Figura 3-12 Diagrama de Bode da simulação 1 em MatLab2012® ($m_{motoredutor} = 150kg$)

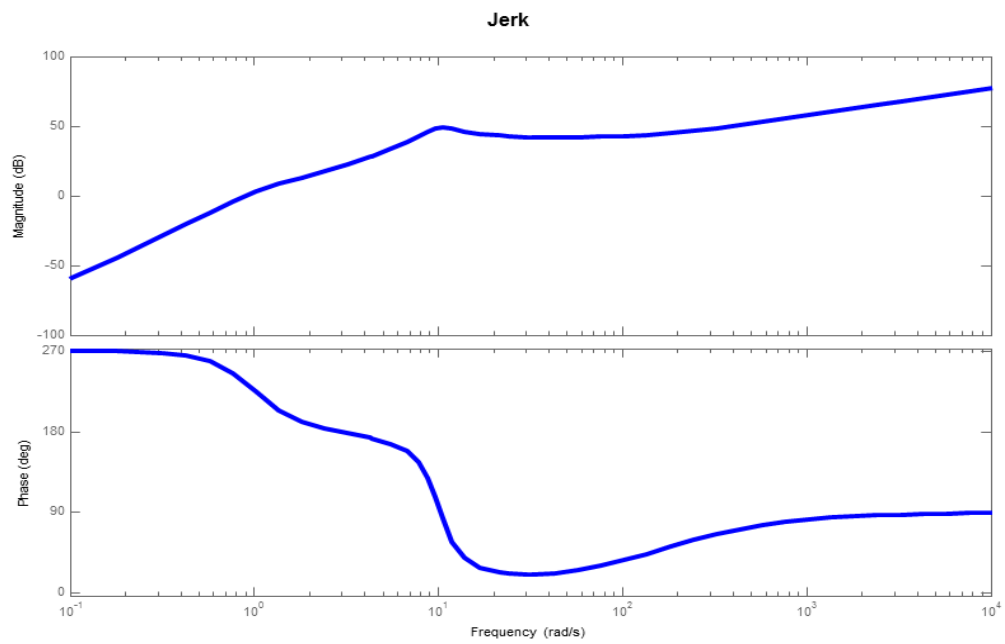


Figura 3-13 Resposta em frequência do *jerk* para $m_{motoredutor} = 25kg$

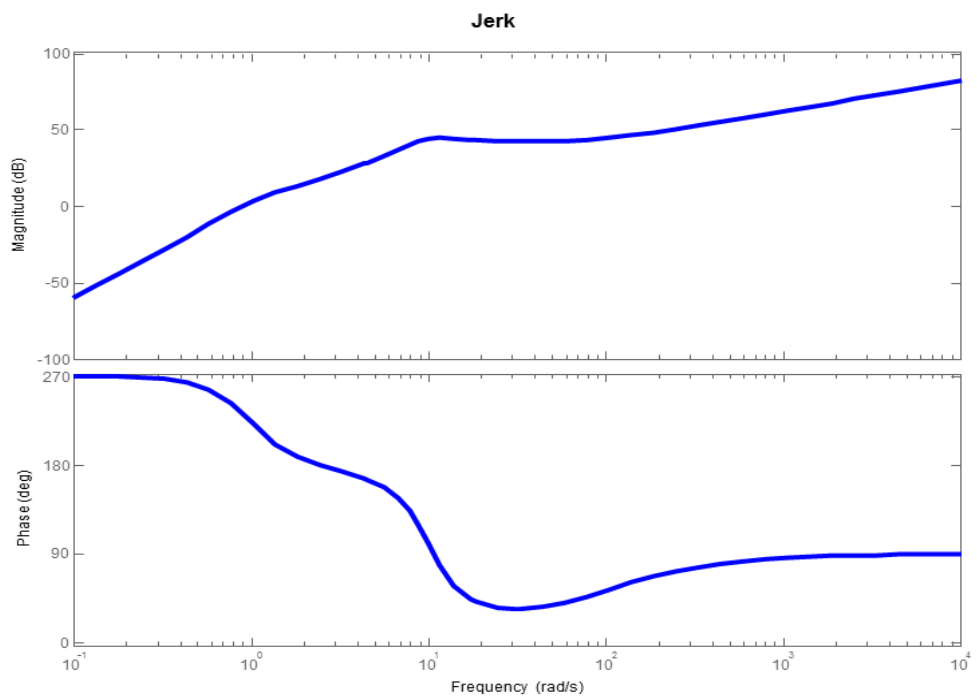


Figura 3-14 Resposta em frequência do *jerk* para $m_{motoredutor} = 0kg$

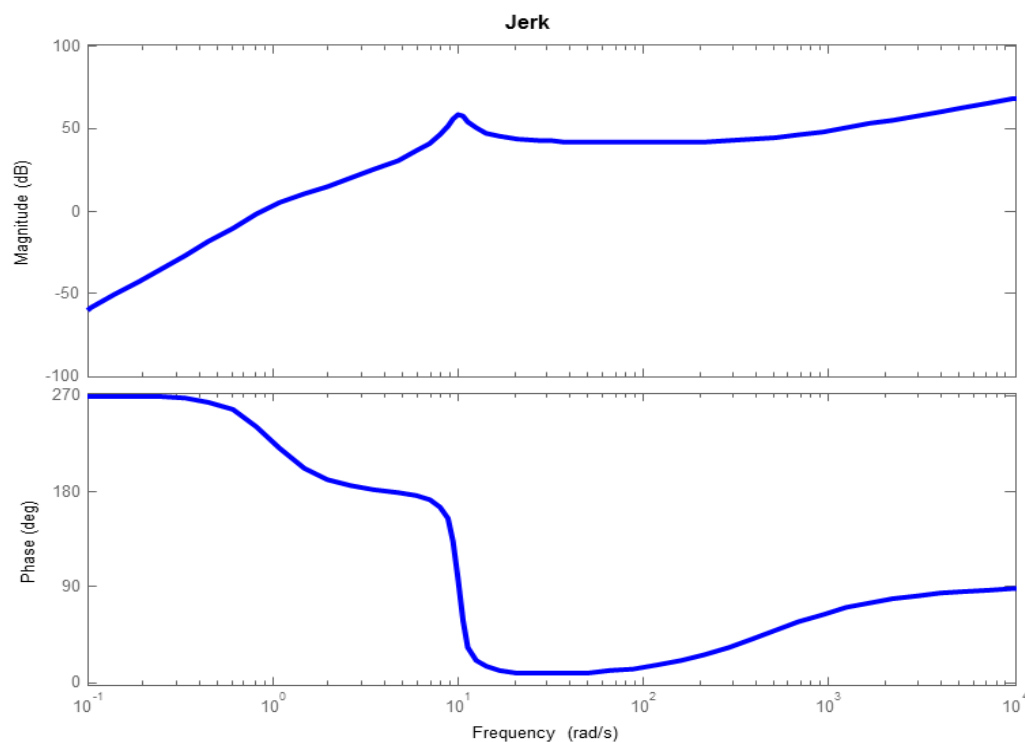


Figura 3-15 Resposta em frequência do *jerk* para $m_{motoredutor} = 150kg$

3.4. Análise dos resultados obtidos

Com base nos dados dos gráficos apresentados na seção anterior, pode-se notar que com a inserção do sistema motriz de 25 kg proposto no projeto em CAD na massa não suspensa do veículo, não há alteração em níveis consideráveis da vibração do sistema. Nota-se que a resposta ao degrau unitário apresentada nas simulações 1 e 2 (figuras 3-7 e 3-8) mostram um comportamento muito similar nas duas condições, assim como os respectivos Diagramas de Bode (figuras 3-10 e 3-11). Analisando os gráficos das respostas em frequência de *jerk* destas duas simulações (figuras 3-13 e 3-14), pode-se perceber um ligeiro aumento do valor da magnitude 4(dB), o que mostra um pequeno aumento do desconforto dos passageiros do veículo; porém, esse aumento é muito pequeno, em um sistema real seria quase imperceptível para os passageiros.

Quando aumenta-se a massa do sistema motriz consideravelmente, de 25kg para 150kg, os problemas com a vibração aparecem, como visto na resposta ao degrau

unitário da simulação 3 (Figura 3-9), onde se pode perceber claramente um aumento considerável na oscilação do sistema. Isso pode ser verificado no respectivo Diagrama de Bode (Figura 3-12), que mostra um aumento da magnitude da frequência. A resposta em frequência do *jerk* (Figura 3-15) há um aumento de 15(dB) na magnitude do sistema, o que implica em um aumento significativo no desconforto dos passageiros do veículo.

Após a análise dos resultados dessas simulações do modelo simplificado, pode-se concluir que o sistema de motorização independente acoplado diretamente nas rodas do veículo acima proposto com $m_{motoreductor} = 25kg$ possui um comportamento dinâmico vertical satisfatório, com resultados similares às simulações com $m_{motoreductor} = 0kg$. Note a importância de minimizar o peso do motoreductor, uma vez que valores elevados podem causar desconforto significativo dos passageiros.

No próximo capítulo, o controle de velocidade do sistema estudado é desenvolvido.

4. Estudo e Desenvolvimento de Controle de Velocidade

Este capítulo possui como objetivo o desenvolvimento de um controle de velocidade para o sistema de motorização independente acoplado diretamente nas rodas proposto. Utiliza-se para o estudo e desenvolvimento o software *MatLab2012*® com módulo *Simulink*®.

A partir do modelo apresentado no capítulo anterior, o controle de velocidade da rotação do motor é desenvolvido com a utilização de um controlador PID. Neste capítulo apresentam-se 5 simulações com parâmetros e configurações de controladores distintos.

A seguir são apresentados o modelo e seu desenvolvimento, assim como os resultados obtidos pelo controle de velocidade proposto e as suas respectivas análises.

4.1. Características do Sistema

Após o estudo do comportamento da dinâmica vertical do sistema e de acordo com a análise apresentada no capítulo 3, a configuração 1 é escolhida.

O sistema modelado utiliza o motor *LEM 200-127* [46] e uma caixa de redução *Apex Dynamic* com a relação de 3:1 e 98% de eficiência.

O *LEM 200-127* [46] é um motor elétrico DC série, amplamente utilizado como motor de arranque em veículos de grande porte como escavadeiras e tratores. Também utiliza-se este motor em carros de golfe e em conversões de veículos convencionais a combustão para elétrico. Sua tensão de trabalho é de 48V, possui um torque nominal de 31,5 Nm, potência 16,08 KW ou 21,56 HP e uma eficiência energética de 89%.

O motivo da utilização desse motor elétrico para o sistema proposto deve-se às suas dimensões reduzidas e seu alto torque. Motores DC série não são comuns em sistemas *In Wheel*, porém este motor possui as características necessárias para o sistema proposto e a Universidade já possui duas unidades e um controlador de velocidade, sendo outro fator determinante para a utilização do *LEM 200-127* [46] no sistema proposto. As figuras 4-1 e 4-2 demonstram as características do motor.

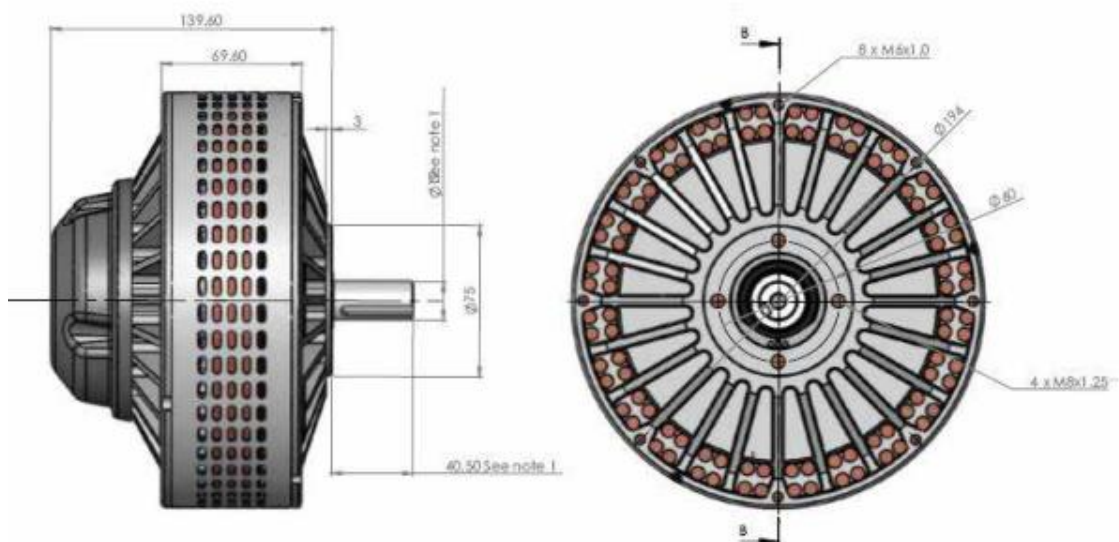


Figura 4-1 Motor *LEM 200 – 127* [46]

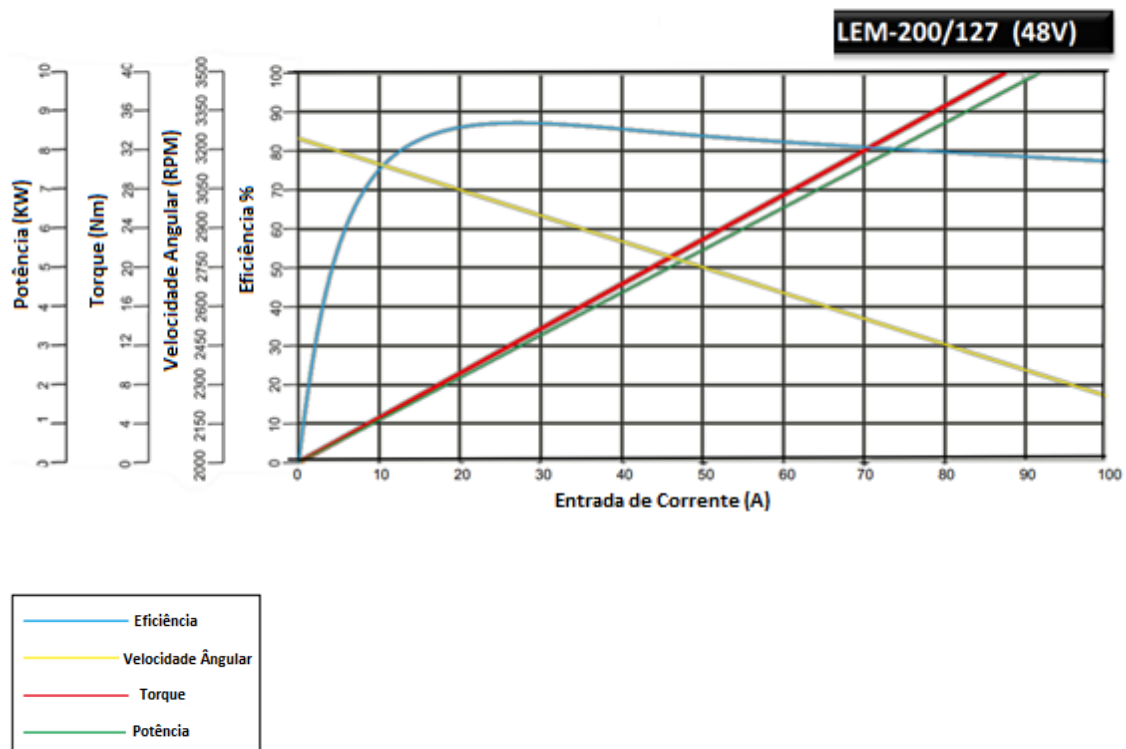


Figura 4-2 Gráfico de Características do *Motor LEM 200 – 127* [46] Adaptado

Como se pode notar na figura 4-1 as dimensões do *LEM 200-127* [46] são reduzidas para um motor deste porte, fator que justifica sua utilização no sistema. A figura 4-2 apresenta o gráfico de características do motor, onde sua eficiência ótima encontra-se na faixa de corrente entre 25 a 30 A.

4.2. Modelagem

A modelagem do sistema proposto é realizada no *Simulink*®, respeitando as suas respectivas equações. A figura 4-4 apresenta a representação do circuito de um motor DC genérico.

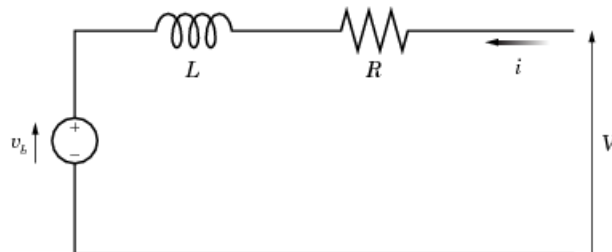


Figura 4-3 Circuito representando um motor DC genérico [57]

Modelagem do Motor DC [57], com equações representativas relativas à sua modelagem:

$$v_b = k_v \omega \quad (4.1)$$

$$T_E = k_t i \quad (4.2)$$

$$T_E \omega = v_b i \quad (4.3)$$

$$k_t i \omega = k_v \omega i \quad (4.4)$$

$$k_v = k_t \quad (4.5)$$

$$i = \frac{V - v_b}{R} = \frac{V - k_v \omega}{R} \quad (4.6)$$

$$T_E = \frac{k_t}{R} (V - k_v \omega) \quad (4.7)$$

$$T = \frac{k_t}{R} (V - k_v \omega) - J \dot{\omega} - \lambda \omega \quad (4.8)$$

A seguir a configuração do modelo do motor é descrita de acordo com as características do *LEM 200-127* [46]. O *Simulink*® possui o modelo padrão de um motor DC [58], onde todos os parâmetros são configuráveis, para que o modelo seja o mais fiel possível à realidade.

Block Parameters: DC Motor

DC Motor

This block represents the electrical and torque characteristics of a DC motor.

The block assumes that no electromagnetic energy is lost, and hence the back-emf and torque constants have the same numerical value when in SI units. Motor parameters can either be specified directly, or derived from no-load speed and stall torque. If no information is available on armature inductance, this parameter can be set to some small non-zero value.

When a positive current flows from the electrical + to - ports, a positive torque acts from the mechanical C to R ports. Motor torque direction can be changed by altering the sign of the back-emf or torque constants.

Parameters

Electrical Torque Mechanical

Model parameterization: **By equivalent circuit parameters**

Armature resistance: 0.0225 Ohm

Armature inductance: 23 uH

Define back-emf or torque constant: **Specify torque constant**

Torque constant: 0.15 N*m/A

Rotor damping parameterization: **By no-load current**

No-load current: 5 A

DC supply voltage when measuring no-load current: 48 V

OK Cancel Help Apply

Block Parameters: DC Motor

DC Motor

This block represents the electrical and torque characteristics of a DC motor.

The block assumes that no electromagnetic energy is lost, and hence the back-emf and torque constants have the same numerical value when in SI units. Motor parameters can either be specified directly, or derived from no-load speed and stall torque. If no information is available on armature inductance, this parameter can be set to some small non-zero value.

When a positive current flows from the electrical + to - ports, a positive torque acts from the mechanical C to R ports. Motor torque direction can be changed by altering the sign of the back-emf or torque constants.

Parameters

Electrical Torque Mechanical

Model parameterization: **By stall torque & no-load speed**

Armature inductance: 23 uH

Stall torque: 31.5 N*m

No-load speed: 2592 rpm

Rated DC supply voltage: 48 V

Rotor damping parameterization: **By no-load current**

No-load current: 5 A

DC supply voltage when measuring no-load current: 48 V

OK Cancel Help Apply

Figura 4-4 Configuração dos parâmetros modelo genérico de motor DC.

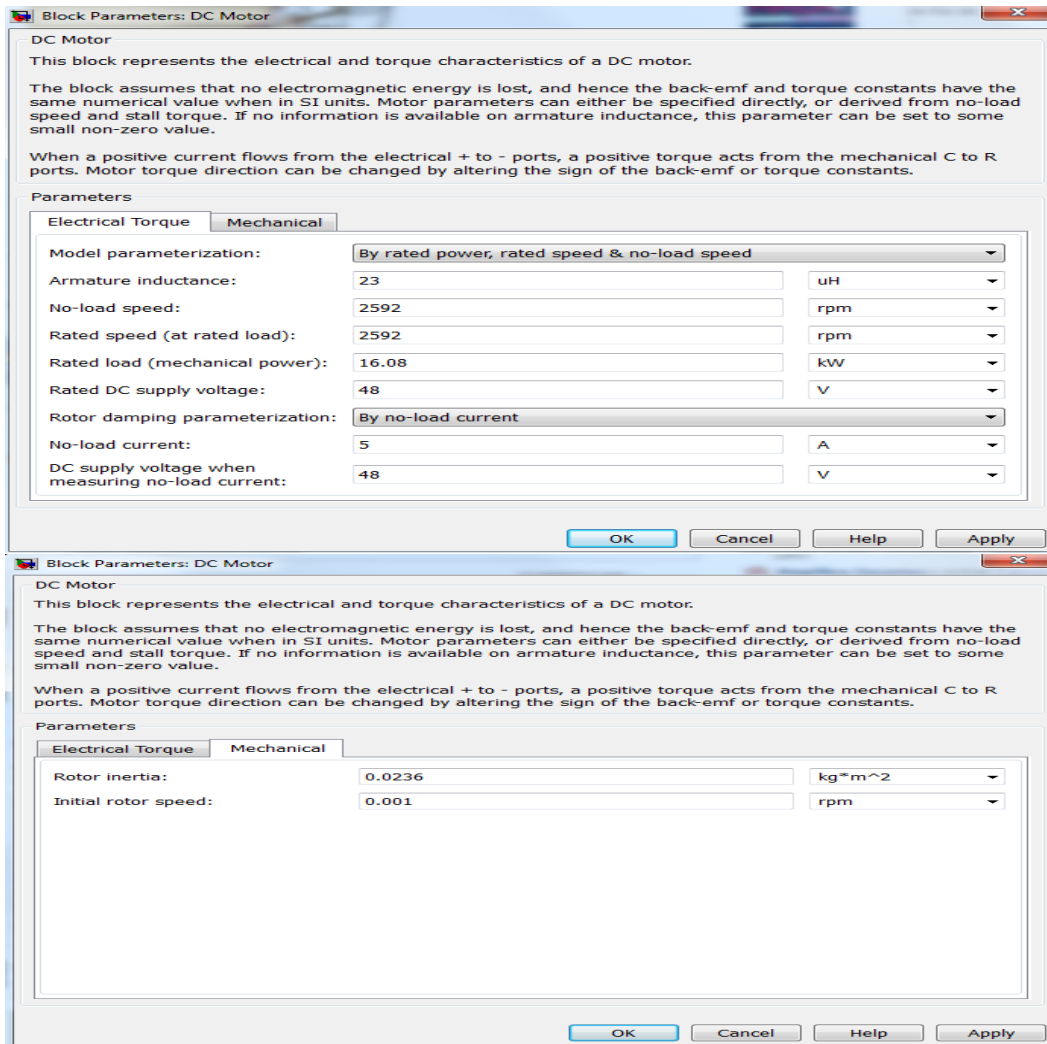


Figura 4-5 Configuração dos parâmetros do modelo genérico de motor DC.

Equação Diferencial da Dinâmica Rotacional da Roda [56]:

$$J\dot{\omega} = K_t * i * GB^2 - B * \omega - \tau_{externo} \quad (4.9)$$

A partir da equação acima se constroi o modelo em *Simulink*:

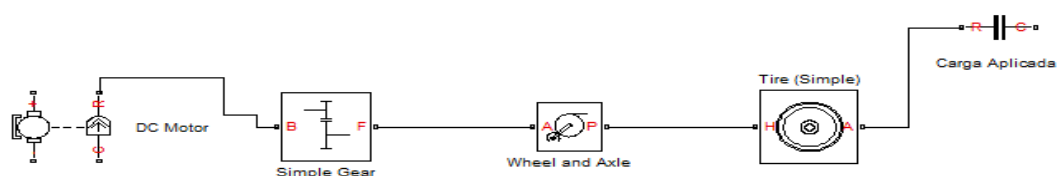


Figura 4-6 Modelo no *simulink*® da Equação Diferencial da Dinâmica Rotacional da Roda

onde:

J - Inércia angular da roda.

$\dot{\omega}$ - Aceleração angular.

K_t - Constante de torque do motor.

i - Corrente do motor.

GB^2 - Redução ao quadrado.

B - Perda no eixo (coeficiente de atrito viscoso).

ω - Velocidade angular.

$\tau_{externo}$ - Torque externo aplicado à roda.

A figura 4-7 mostra a transposição da Equação Diferencial da Dinâmica Rotacional da Roda (4.9) para o modelo em *Simulink*®. Todos os blocos utilizados [58] possuem parâmetros de configuração para que os resultados das simulações sejam próximos à realidade.

4.3. Sistema de Controle

A partir do modelo apresentado na figura 4-7, constroem-se o seguinte sistema de controle de malha fechada, para realizar o controle de velocidade. O diagrama de controle do sistema é mostrado na figura 4-8, onde a realimentação do controlador PID é diretamente da saída do motor, dado este extraído por um bloco de sensor de velocidade [58]; este bloco não possui configuração dos parâmetros.

Para que as simulações sejam o mais próximo possível da realidade, utiliza-se no sistema sensores de corrente, tensão e rotação. Além dos sensores, utiliza-se uma fonte de tensão regulada, um controlador PWM, e uma ponte H, assim como em um sistema real. A alimentação do sistema não é realizada pela fonte de tensão regulada, esta é realizada por uma fonte de tensão contínua de 48V configurada dentro do bloco da ponte H [58]. A fonte de tensão controlada simula um potenciômetro, que gera um sinal em nível de tensão para controlar o *duty cycle* do PWM. Todas as informações referentes ao gerador de PWM e à Ponte H estão contidos na seção de ajuda [58] do *Simulink*®.

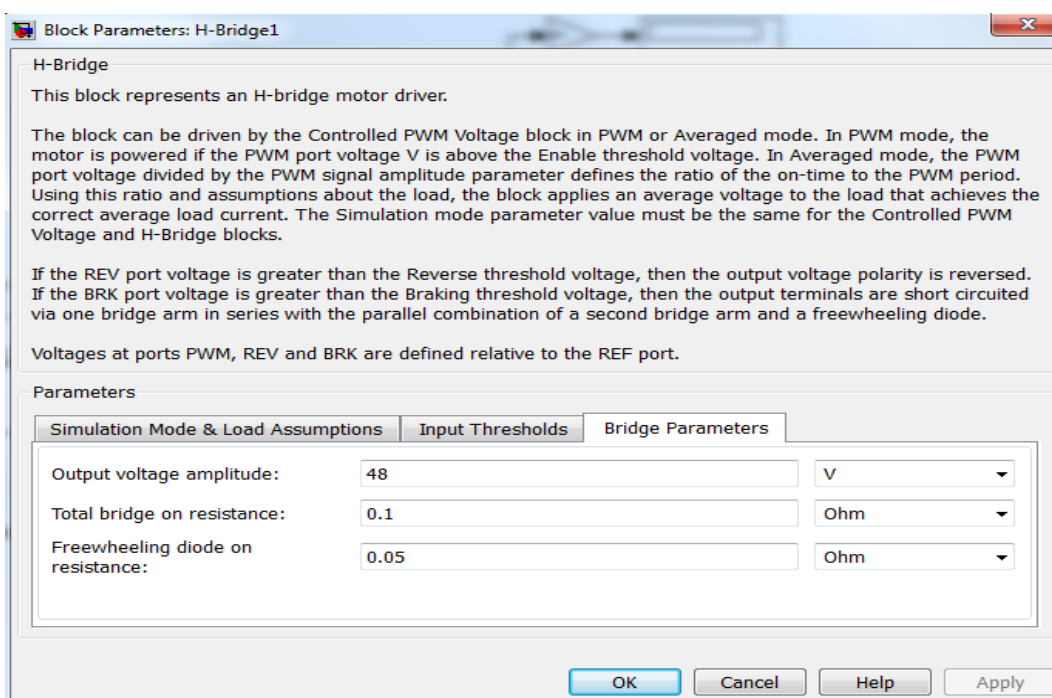


Figura 4-8 Configuração da alimentação do sistema

A figura 4-8 mostra a configuração do bloco do controlador de velocidade, onde todos os parâmetros foram extraídos do controlador real utilizado no sistema o *AXE 7245* [59], que é apresentado com mais detalhes no capítulo 7.

4.4. Simulações Realizadas

A seguir são apresentadas 5 simulações com parâmetros e configurações de controladores distintos para o sistema proposto.

Simulação 1 : Sistema de controle em malha aberta, com velocidade desejada de 1000 RPM e carga aplicada na roda de 10 Nm. A figura 4-9 mostra o diagrama desta simulação 1.

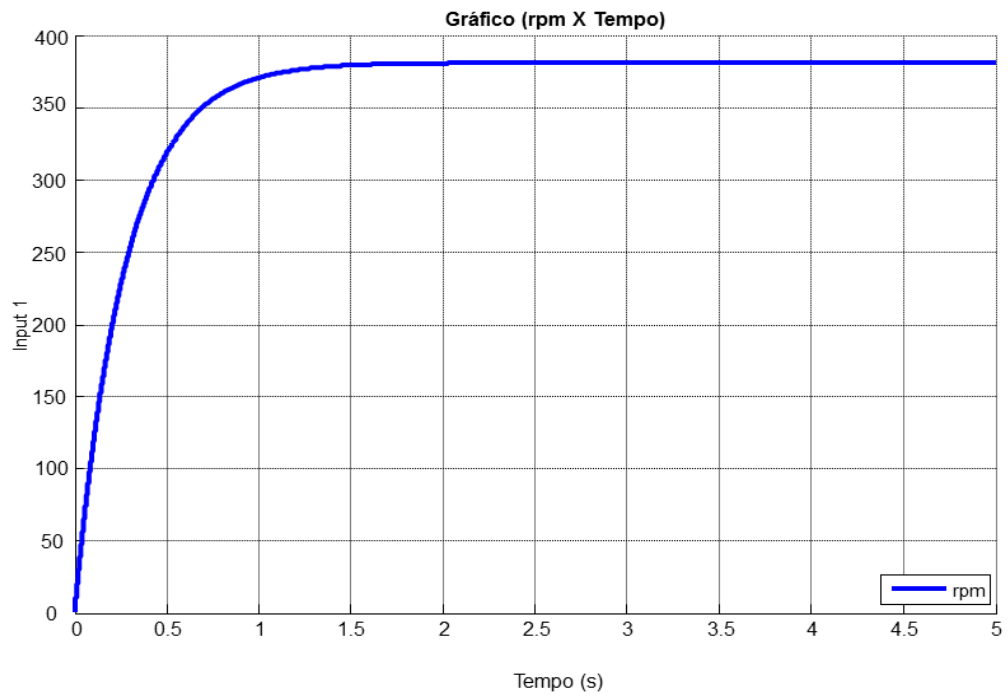


Figura 4-10 Gráfico RPM X Tempo (s) Simulação 1

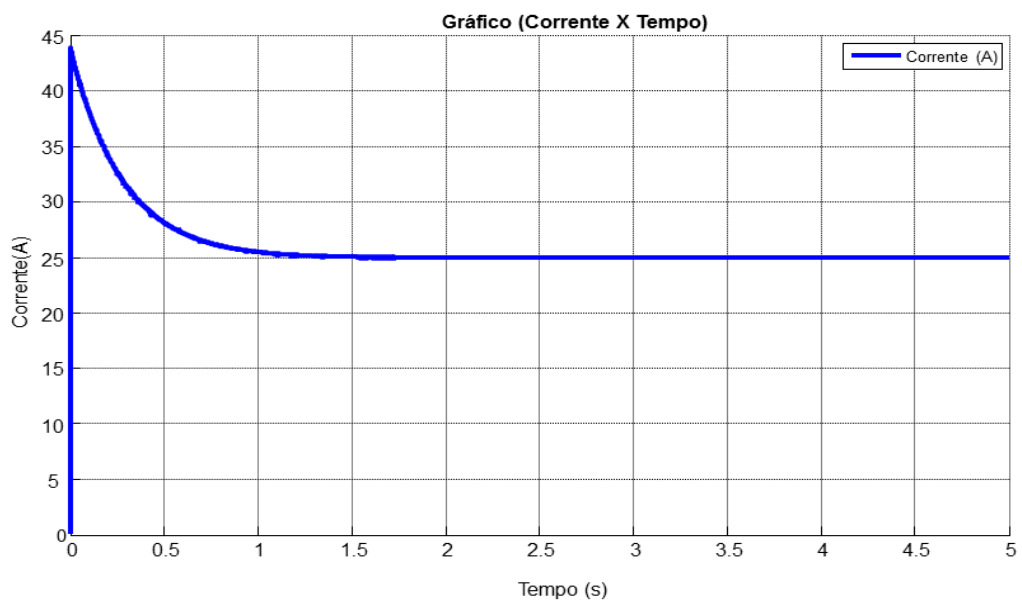


Figura 4-11 Gráfico Corrente X Tempo (s) Simulação 1

As figuras 4-11 e 4-12 mostram o comportamento do sistema em malha aberta, onde claramente observa-se que o sistema não atinge a velocidade angular desejada. Assim, nas simulações seguintes o sistema de controle utilizado é de malha fechada, utilizando um controlador PID.

Por ser um sistema simples, para o cálculo dos parâmetros P, I e D utiliza-se o método de Ziegler e Nichols [60]. Segundo este método, temos T_u , o período da oscilação, e K_u o ganho crítico, valor associado à instabilidade quando sob controle proporcional. A figura 4-12 apresenta as fórmulas para cálculos dos ganhos.

Tipo de controlador	K	T_i	T_d
P	$0,5K_u$	--	--
PI	$0,4K_u$	$0,8T_u$	--
PID	$0,6K_u$	$0,5T_u$	$0,125T_u$

Figura 4-12 Fórmulas de Ziegler e Nichols para ajuste pelo método do período crítico.

Simulação 2 : Sistema de controle em malha Fechada, controlador somente com P, com velocidade desejada de 1000 RPM e carga aplicada na roda de 10 Nm.

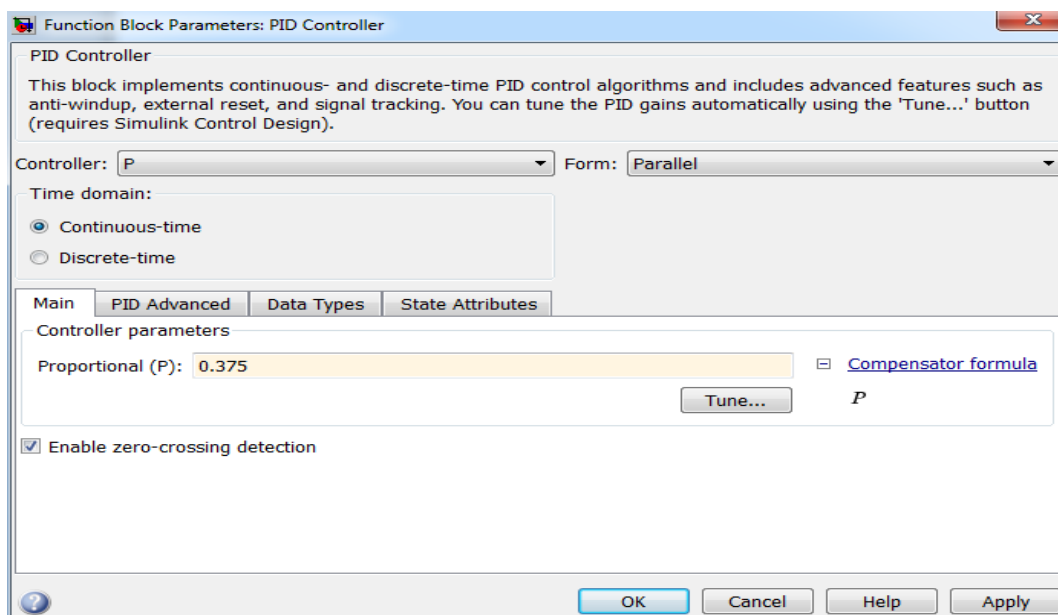


Figura 4-13 Configuração do controlador da Simulação 2

Simulação 3 : Sistema de controle em malha Fechada, controlador PI, com velocidade desejada de 1000 RPM e carga aplicada na roda de 10 Nm.

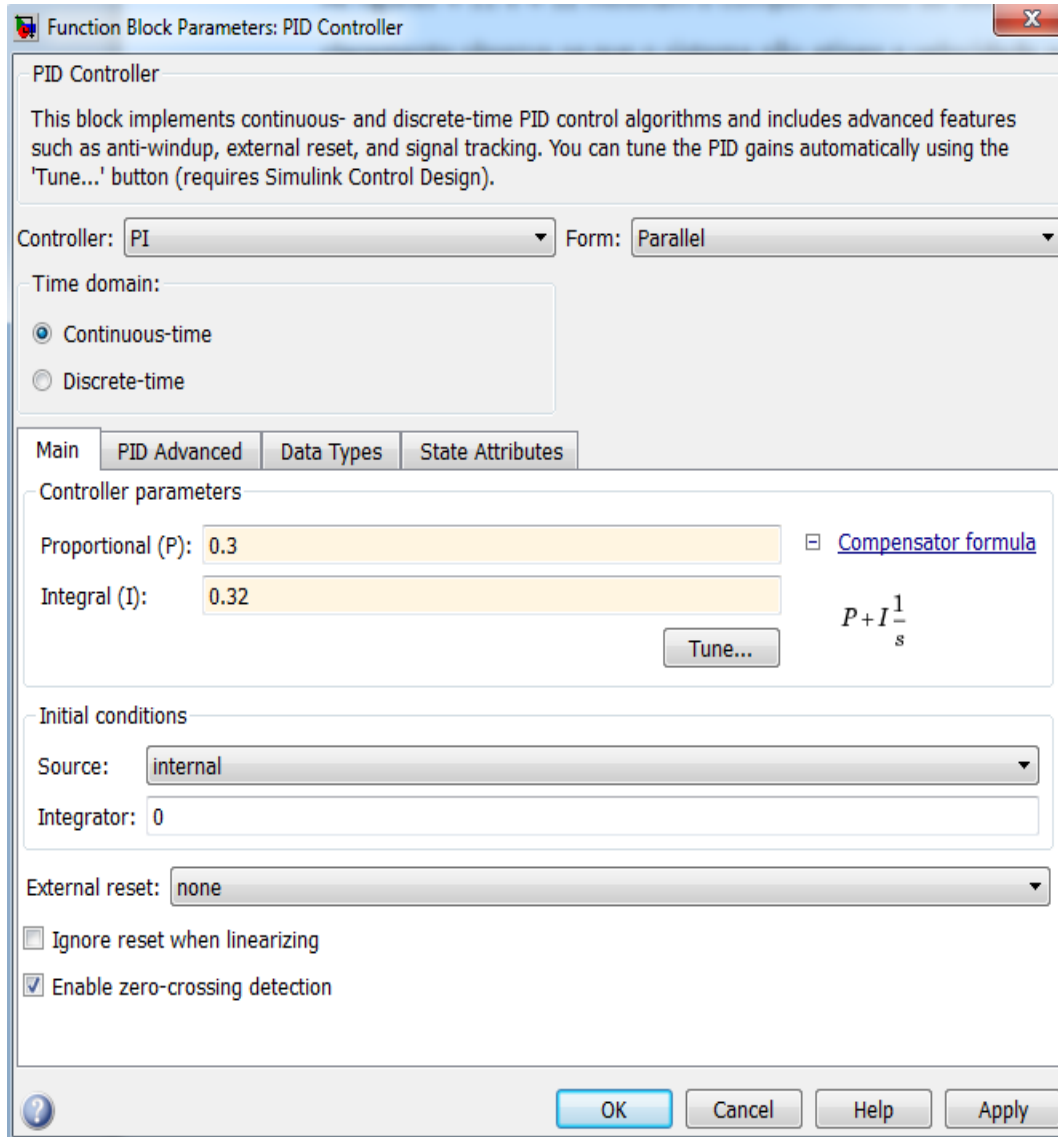


Figura 4-15 Configuração do controlador para Simulação 3.

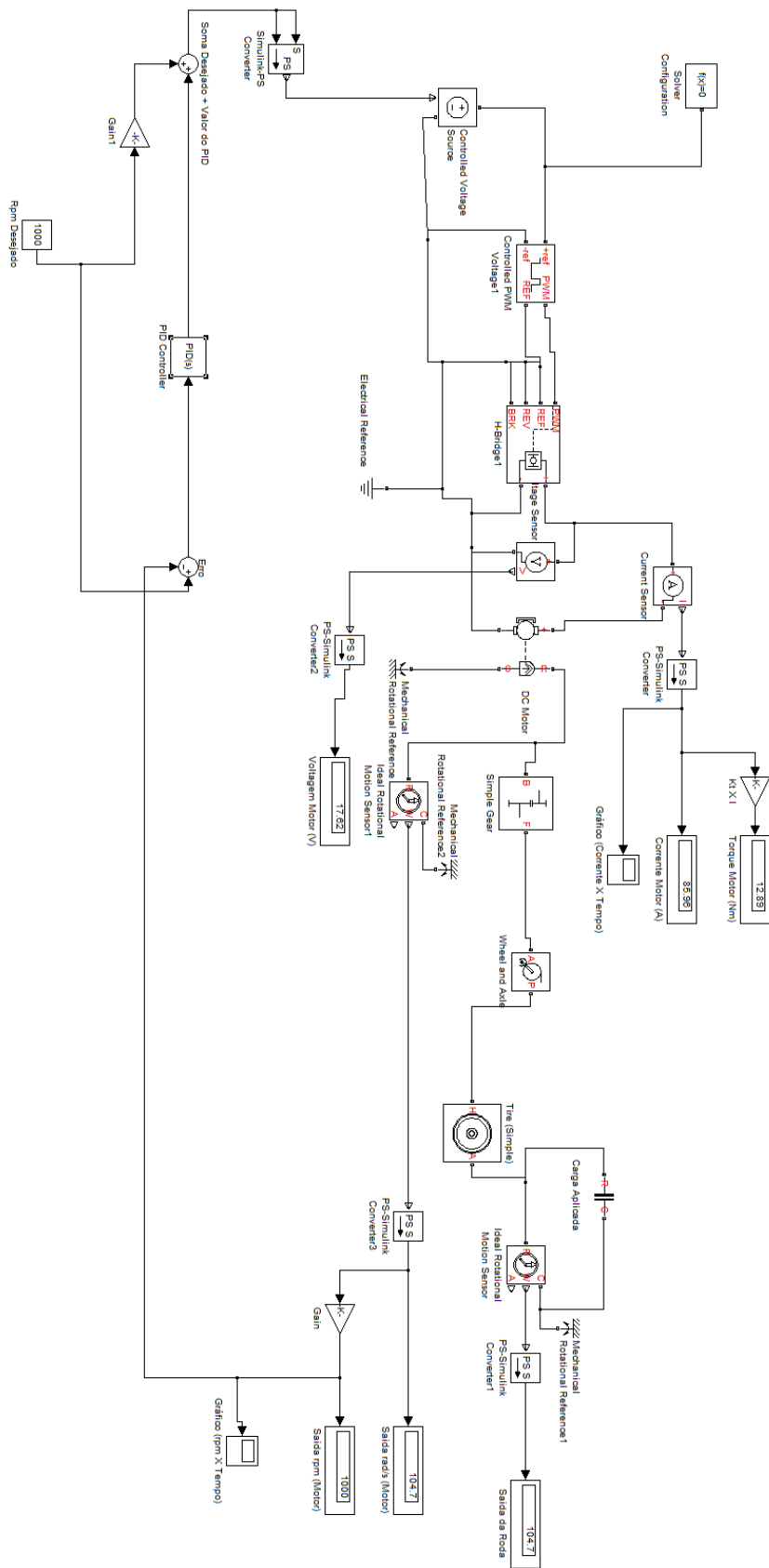


Figura 4-16 Diagrama da Simulação 3.

Simulação 4 : Sistema de controle em malha Fechada, controlador PID, com velocidade desejada de 1000 RPM e carga aplicada na roda de 10 Nm.

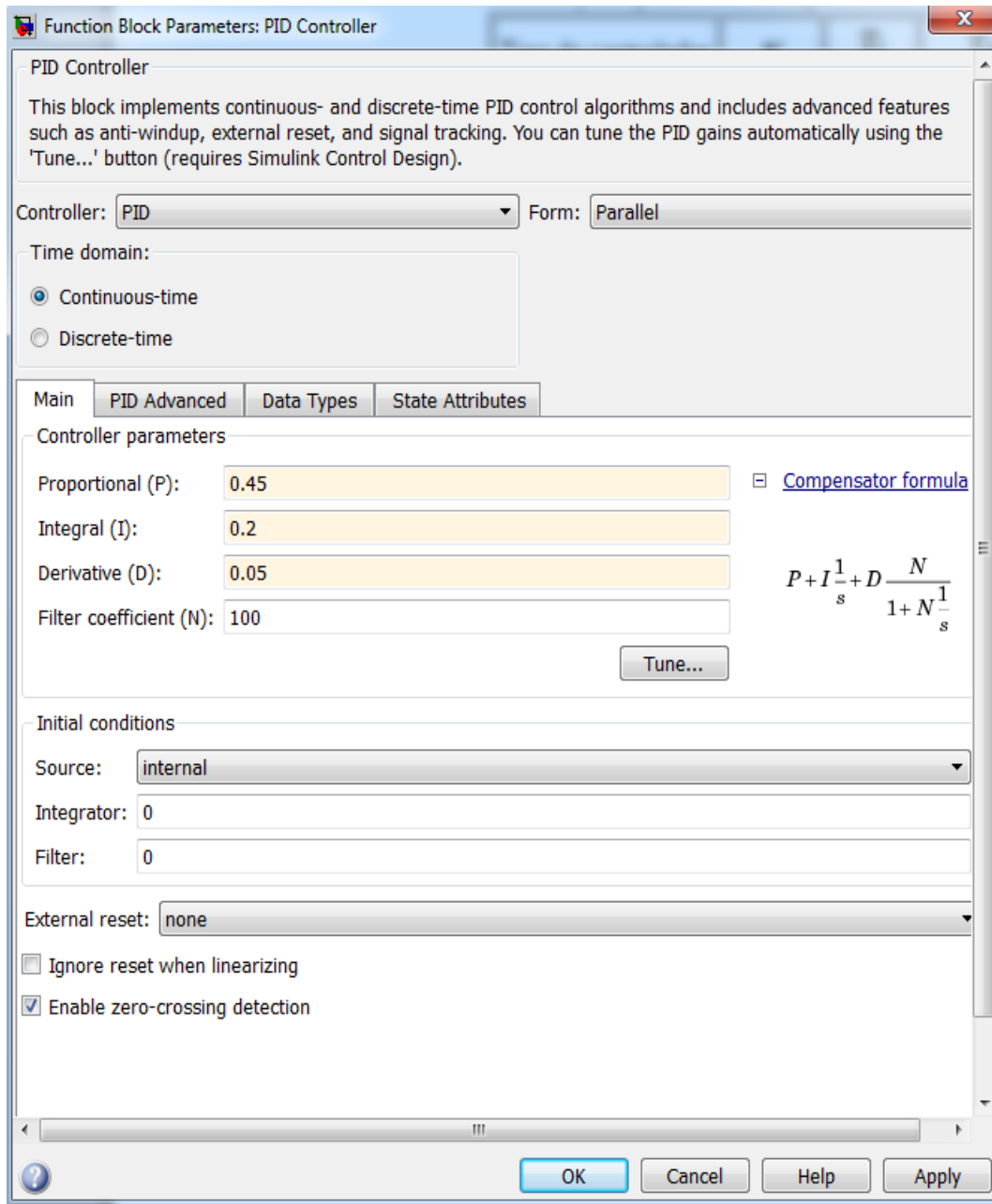


Figura 4-17 Configuração controlador para a Simulação 4.

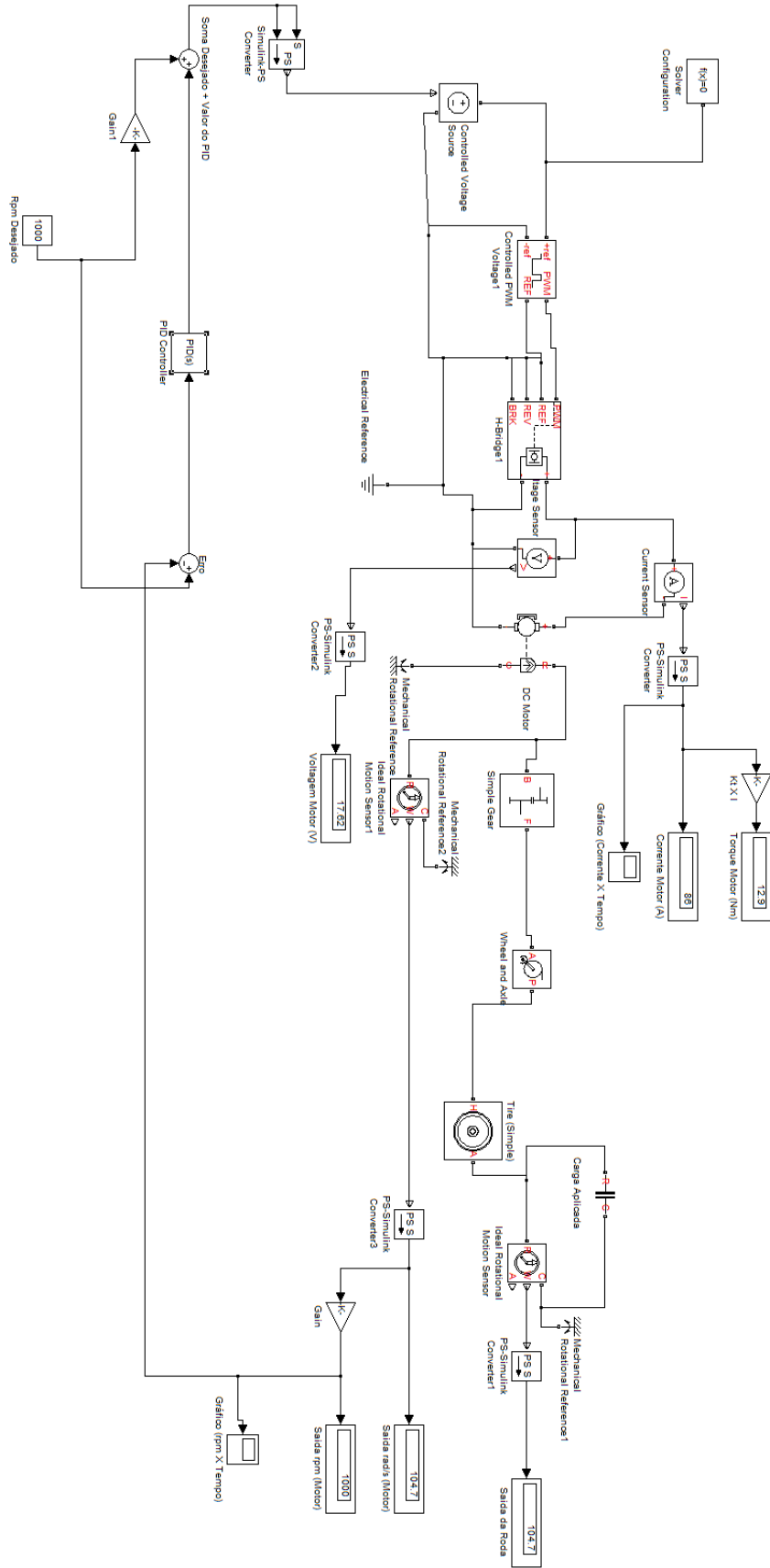


Figura 4-178 Diagrama da Simulação 4

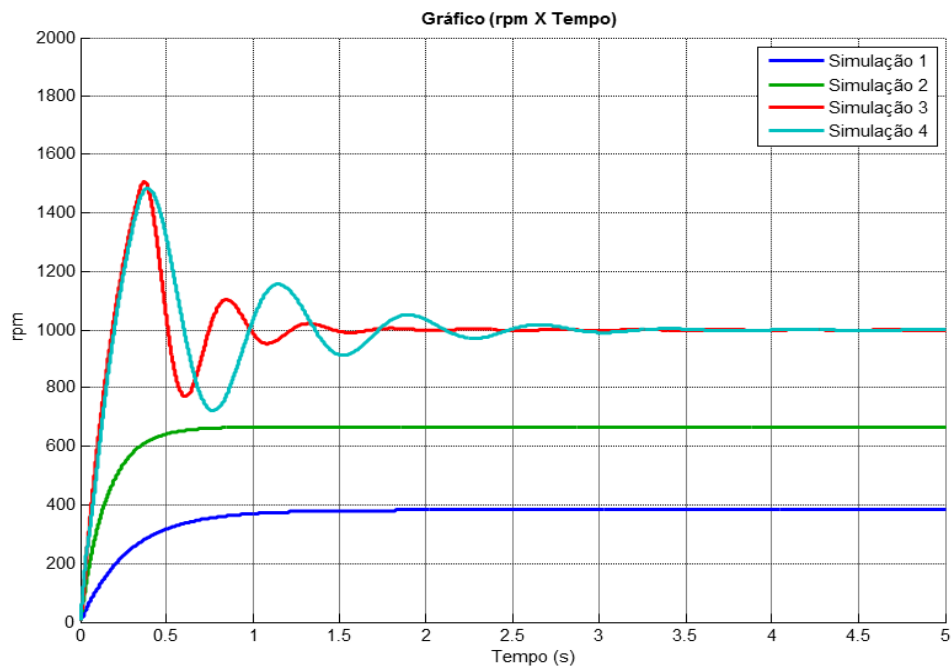


Figura 4-19 Gráfico Rpm x Tempo para as simulações 1,2,3 e 4.

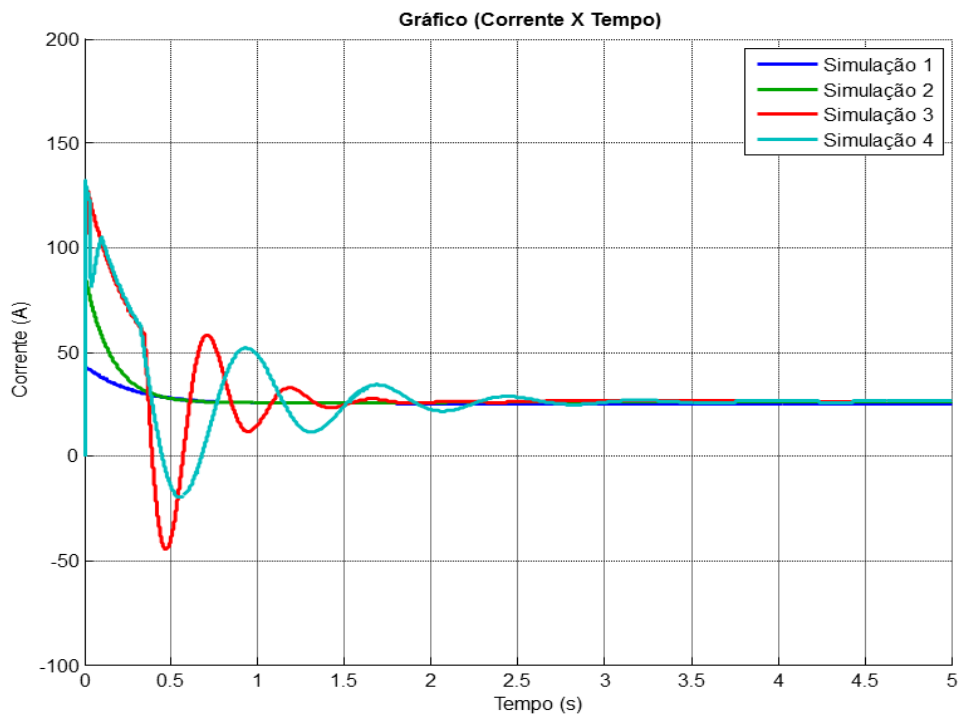


Figura 4-20 Gráfico Corrente x Tempo para as Simulações 1,2,3 e 4.

Simulação 5 : Sistema de controle em malha Fechada, controlador PI, com velocidade desejada de 2000 RPM e carga aplicada na roda de 15 Nm.

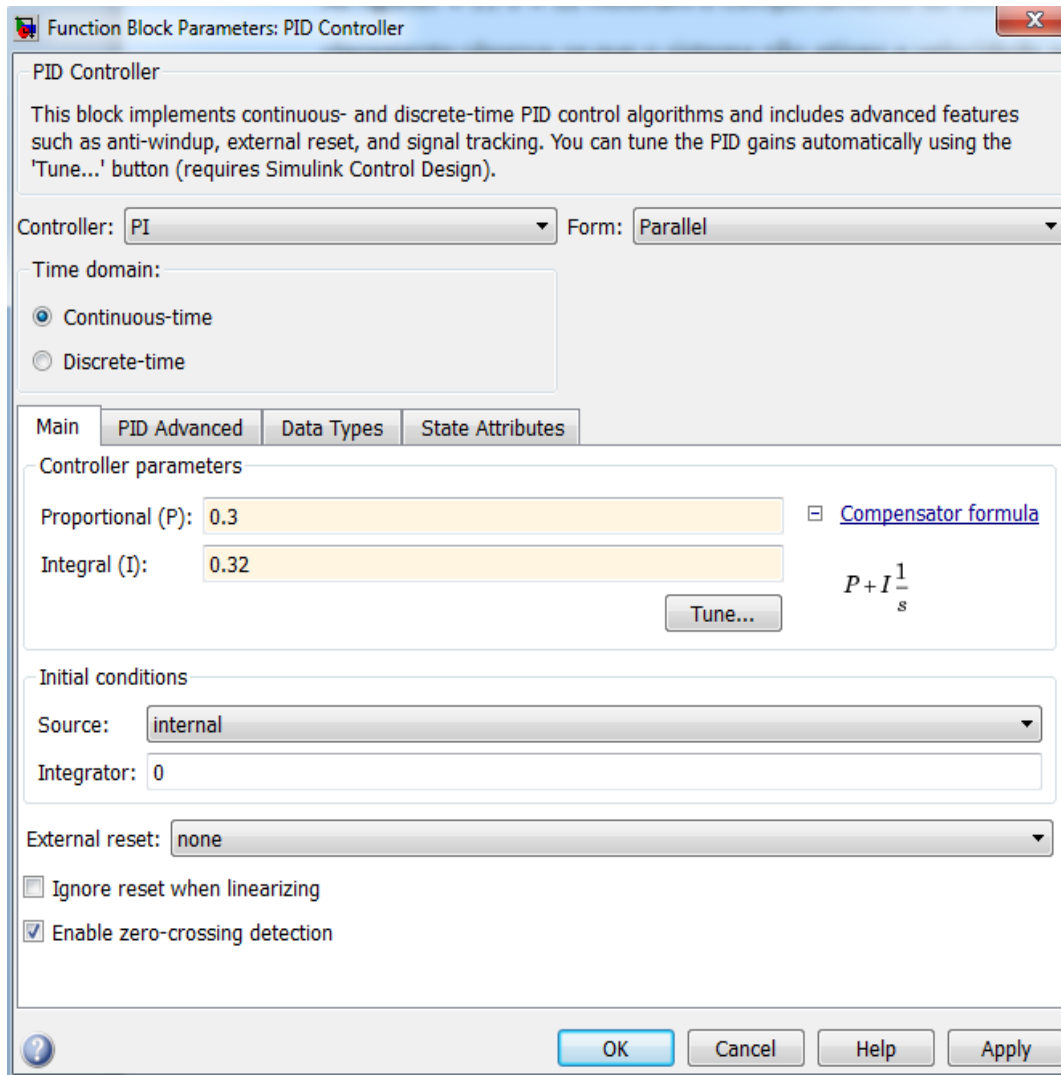


Figura 4-21 Configuração do controlador para a Simulação 5

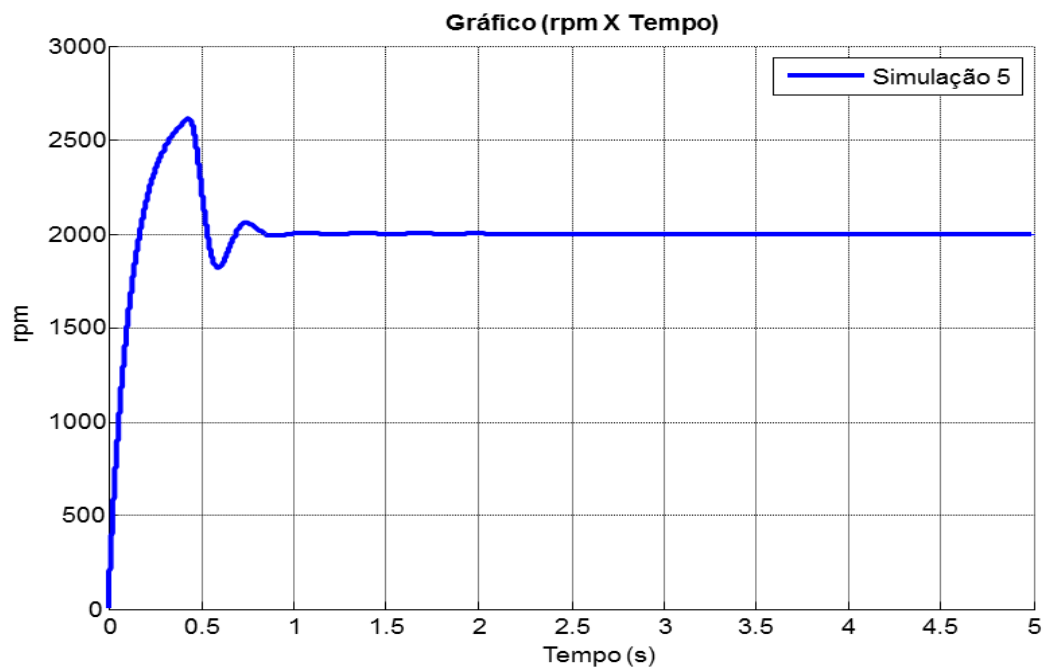


Figura 4-193 Gráfico Rpm X Tempo (s) da Simulação 5

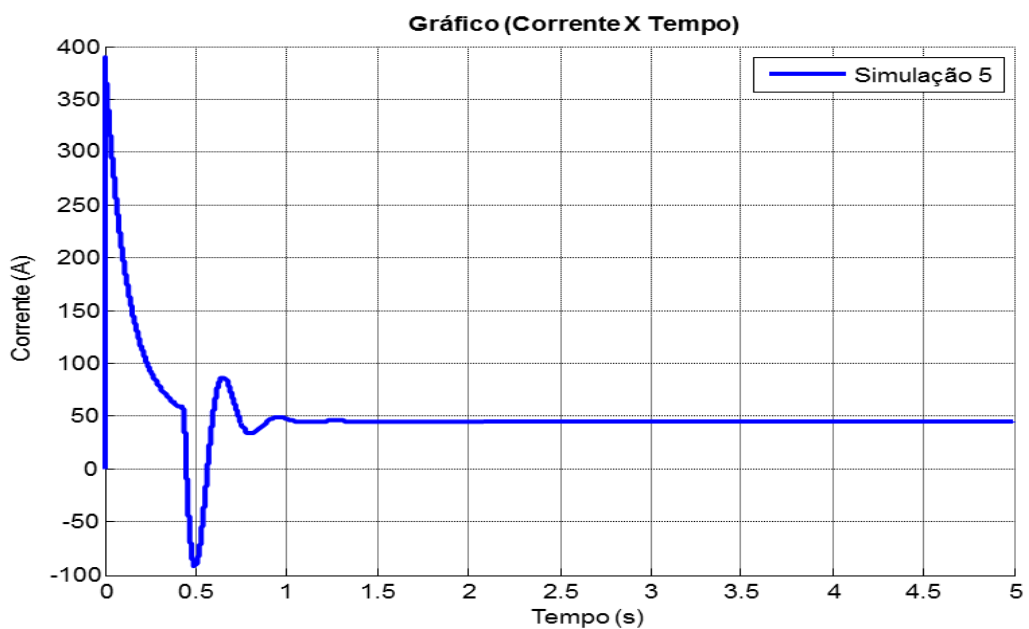


Figura 4-204 Gráfico Corrente X Tempo (s) da Simulação 5

4.5. Resultados

Com base nos dados apresentados na seção anterior, a simulação 1 foi realizada para demonstrar que quando aplicado um torque externo, o controle em malha aberta não é suficiente para atingir a velocidade desejada.

Na simulação 2 com o controlador somente proporcional (P), ocorre uma maior aproximação da velocidade desejada, porém a meta não é alcançada. Na simulação 3 é utilizado um controlador PI com a introdução do ganho integral (I) ao controlador e a meta é atingida com êxito, com a velocidade rapidamente controlada. O ganho derivativo (D) é introduzido na simulação 4, e a velocidade desejada assim como na simulação 3 também é controlada, entretanto com um tempo de estabilização maior.

Comparando as simulações 3 e 4 pode-se observar que o sistema obtém uma resposta mais rápida com o controlador (PI). Para validação dos resultados, foi realizada a simulação 5, onde os parâmetros de torque de entrada foram modificados e o controlador (PI) novamente obteve um ótimo resultado.

Conclui se então que o melhor controlador para o sistema proposto é o controlador PI. No capítulo seguinte, será apresentado o desenvolvimento de um controle de frenagem ABS.

5. Estudo e Desenvolvimento de Controle de Frenagem ABS

Este capítulo se dedica ao estudo e ao desenvolvimento de um controle de frenagem para aplicação no modelo proposto. O capítulo apresenta o princípio de funcionamento do sistema de frenagem com antitravamento das rodas (ABS), e a modelagem do sistema considerando a “fórmula mágica” [61], que possibilita o cálculo das forças para que o sistema de frenagem atue no limiar do travamento das rodas.

O capítulo também apresenta um controle desenvolvido para a implementação da frenagem ABS totalmente elétrica, somente atuando no motor de tração do veículo.

5.1. Sistema de Frenagem ABS

O sistema de frenagem ABS foi desenvolvido para aumentar a segurança e a eficiência do sistema de freios quando houver a necessidade de uma parada emergencial (ou a diminuição na velocidade) em condições de emergência. Como consequência do não travamento das rodas, o sistema também atende a um segundo problema comum neste tipo de situação, tratando-se da dificuldade do motorista em conseguir manter o controle do veículo.

Em termos gerais o sistema atua com base em informações de sensores no veículo, comparando a velocidade de rotação das rodas com a velocidade relativa. Caso a velocidade relativa seja maior que a velocidade de rotação das rodas, significa que as rodas irão travar em uma frenagem, e assim o sistema é atuado.

O sistema de frenagem proposto atua com base nos parâmetros fornecidos pela “formula mágica” [61].

5.2. Descrição do bloco da “formula mágica”

O desenvolvimento do controle de frenagem utiliza o *Simulink*® como plataforma, e como parâmetros um bloco com o modelo do pneu baseado na “formula mágica” [61]. A figura 5-1 mostra as forças atuantes e em seguida as equações que descrevem a modelagem do bloco segundo Pacejka [61].

Sentido de Rotação e Forças Atuantes



Figura 5-1 Sentido de rotação e forças atuantes referentes à “formula mágica”

Variáveis do modelo segundo Pacejka [61]:

r_w - Raio da roda

V_x - Velocidade longitudinal

u - Deformação longitudinal do Pneu

Ω - Velocidade angular da roda

Ω' - Ponto de contato da velocidade angular, onde $\Omega = \Omega'$ se $u = 0$

$r_w \Omega'$ - Velocidade longitudinal do pneu em relação ao solo

V_{th} - Velocidade limiar da roda

F_z - Força vertical no pneu

F_x - Força longitudinal do pneu exercida no ponto de contato com o solo

I_w - Inercia da roda

τ_{drive} - Torque aplicado no eixo da roda

Equações que descrevem a modelagem do bloco utilizado:

$$V_{sx} = r_w \Omega - V_x \quad (5.1)$$

$$V'_{sx} = r_w \Omega' - V_x \quad (5.2)$$

$$k = \frac{V'_{sx}}{|V_x|} \quad (5.3)$$

$$k' = \frac{V_{sx}}{|V_x|} \quad (5.4)$$

$$C_{F_x} = \left(\frac{dF_x}{du} \right)_0 \quad (5.5)$$

$$b_{F_x} = \left(\frac{dF_x}{d\dot{u}} \right)_0 \quad (5.6)$$

O parâmetro de interesse para o desenvolvimento proposto é a diferença entre a velocidade relativa do veículo e a velocidade da roda. O bloco fornece este parâmetro k pelas expressões (5.1) e (5.3), onde:

Se k for maior que zero, significa que a roda está em rolamento perfeito.

Se k for negativo, significa que a roda está travada.

O bloco fornece o valor de k pelo parâmetro de saída “S” como mostra a figura 5-2:

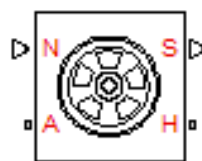


Figura 5-2 Bloco do Simulink® referente à “formula mágica” [61]

Nesta figura, a entrada “N” representa a carga vertical F_z através de um sinal de entrada física, ou seja, a força normal de $\frac{1}{4}$ do veículo. A rotação do eixo da roda é representada pela porta de conservação de rotação “A”. A transferência do eixo da roda de reação de força axial horizontal para o veículo é representado pela porta de conservação de translação H.

5.3. Sistema de controle

A estratégia para controle de frenagem utiliza como parâmetro de ativação a variável k que é extraída do bloco do *Simulink*®, referente ao pneu pela “formula mágica” [61]. Para que não ocorra o deslizamento da roda, o controle é ativado quando a roda estiver na iminência do deslizamento, ou seja, quando k for igual a zero. A figura 5-3 representa o bloco que realiza a comparação do valor de chegada com zero e realiza o chaveamento.

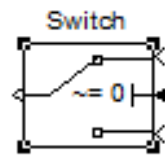


Figura 5-3 Bloco do *Simulink*® que representa a chave utilizada para atuar no sistema

Se k for maior que zero, a frenagem fica por conta do controle de velocidade apresentado no capítulo anterior; caso k seja igual a zero, a frenagem é realizada pelo controle de frenagem.

A figura 5-4 mostra o sistema de controle de frenagem com ABS eletrônico, recebendo o *feedback* do sistema e decidindo o momento de atuação no sistema. O sistema é simples, porém eficiente.

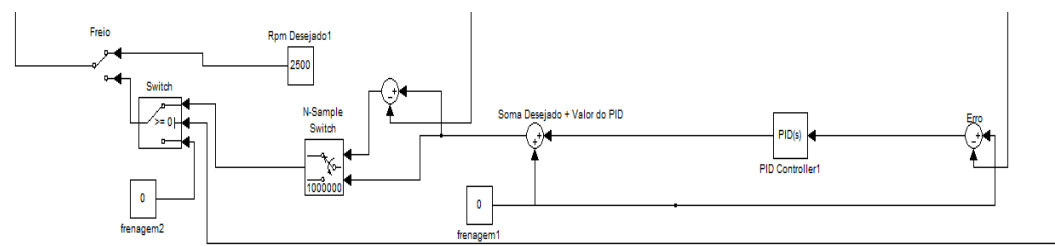


Figura 5-4 Controle de frenagem

A estratégia para simular o sistema ABS é utilizar um chaveamento para a entrada do controle de velocidade. O chaveamento é dinâmico de acordo com o comportamento do sistema, onde se considera o valor da última velocidade aferida pelo sensor de velocidade e o valor ótimo de frenagem fornecido pelo controle PID.

A figura 5-5 apresenta o sistema completo para a realização das simulações.

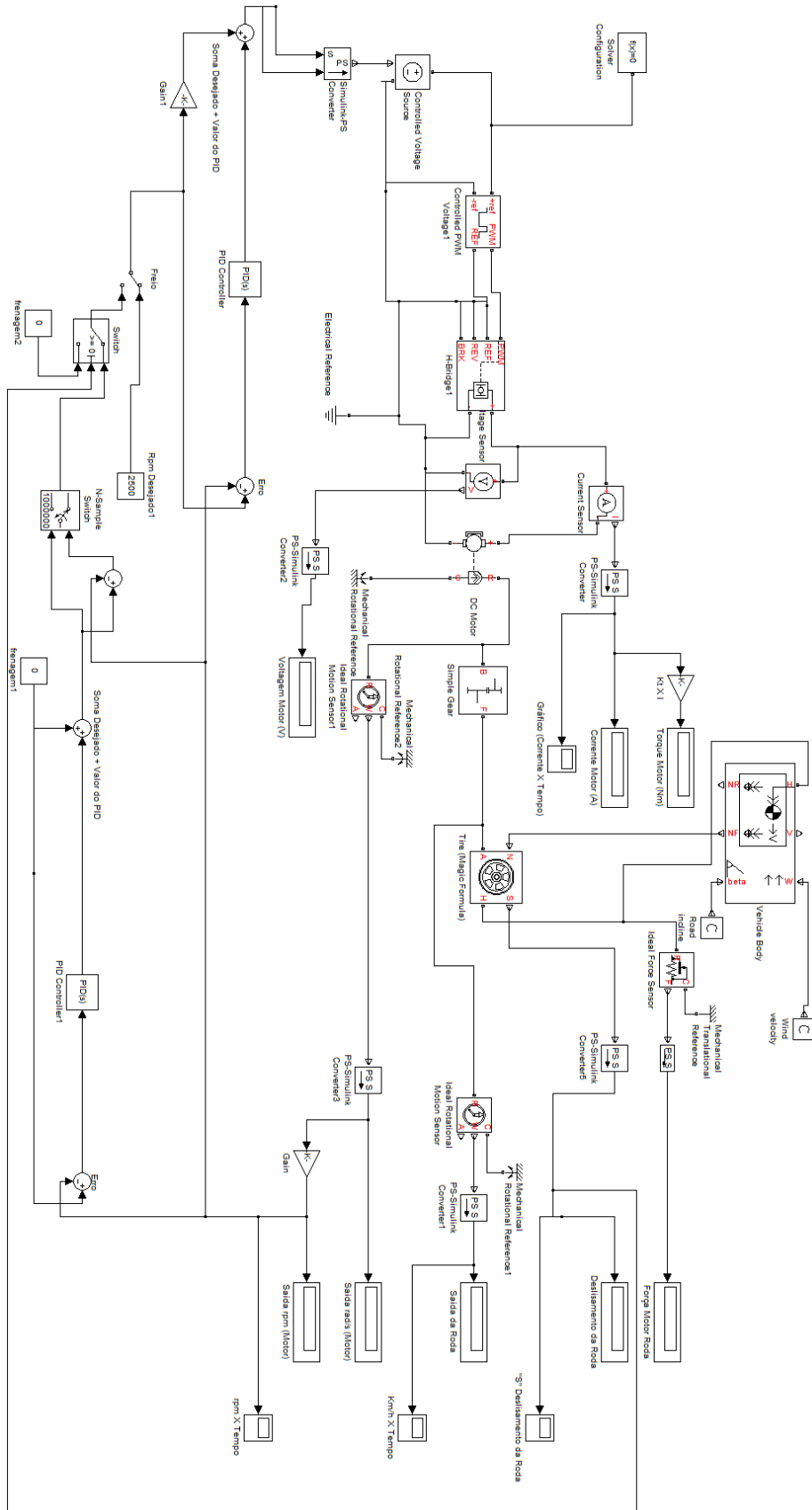


Figura 5-5 Representação do sistema completo simulado

5.4. Simulações

Com o sistema de frenagem ABS eletrônico apresentado na seção anterior, as simulações são realizadas, com o objetivo de validar o sistema.

A figura 5-6 mostra a simulação 1, onde o veículo tem sua velocidade estabilizada em 100 km/h e realiza-se a frenagem até a velocidade 0 Km/h. Na simulação 1, analisa-se o valor de saída do bloco da “formula mágica” “S” que representa a variável “k” e o tempo de frenagem em segundos. O gráfico apresenta duas curvas, em verde o sistema de frenagem ABS eletrônico está desligado e na curva em azul o sistema de frenagem ABS eletrônico está ligado. Em ambos os testes o coeficiente de atrito com o solo é $\mu = 0,9$, que corresponde ao asfalto emborrachado.

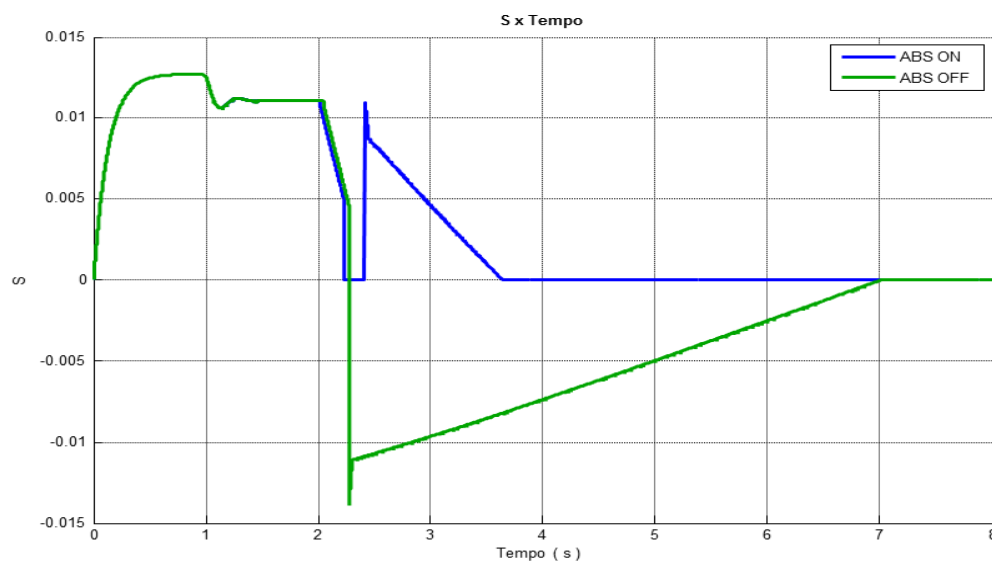


Figura 5-6 Gráfico variável k x Tempo - Simulação 1

Na simulação 2 apresentada na figura 5-7, os parâmetros da simulação 1 são repetidos, porém analisa-se a distância que o veículo necessita para frenagem completa. Novamente a velocidade é estabilizada em 100 Km/h e a frenagem até 0 Km/h. O gráfico apresenta duas curvas, em verde o sistema de frenagem ABS

eletrônico está desligado e na curva em azul o sistema de frenagem ABS eletrônico está ligado. Em ambos os testes o coeficiente de atrito com o solo é $\mu = 0,9$, que corresponde ao asfalto emborrachado.

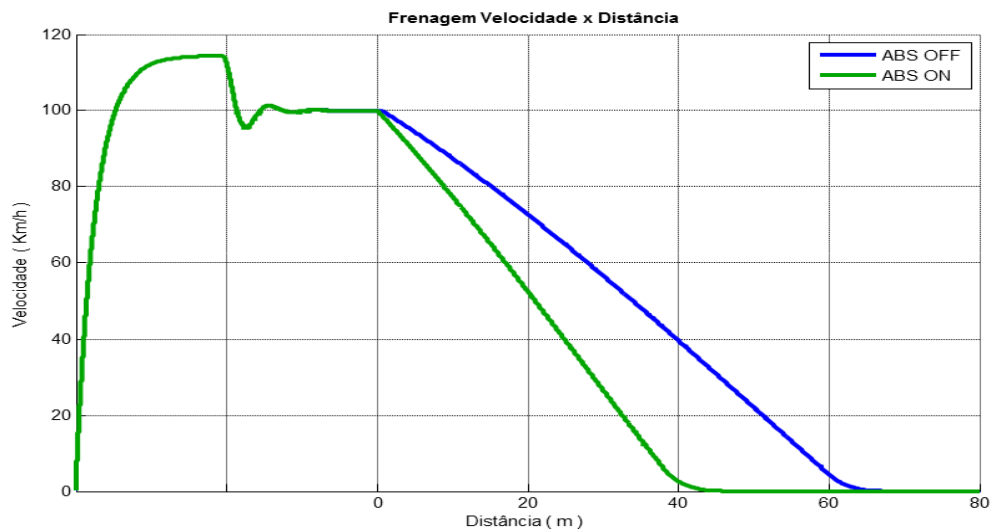


Figura 5-7 Gráfico de Frenagem - Velocidade (km/h) x Tempo (s).

O objetivo da simulação 3, apresentada na figura 5-8, é analisar o comportamento do sistema em uma simulação em um piso mais escorregadio. Assim, o valor do coeficiente de atrito com o solo é modificado. Novamente a velocidade é estabilizada em 100 Km/h e a frenagem até 0 Km/h. O gráfico apresenta duas curvas, em verde o sistema de frenagem ABS eletrônico está desligado, e na curva em azul o sistema de frenagem ABS eletrônico está ligado. Em ambos os testes o coeficiente de atrito com o solo é $\mu = 0,55$, que corresponde ao asfalto com neve.

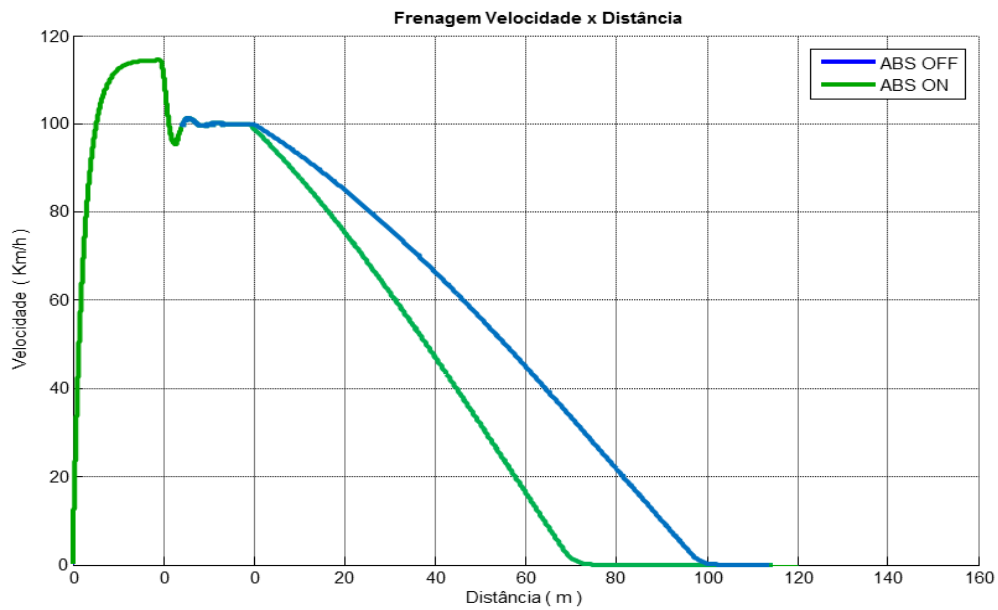


Figura 5-8 Gráfico de Frenagem - Velocidade (km/h) x Tempo (s).

A Figura 5-9 representa o sistema de atuação do controle, a qual simula a frequência de bombeamento do freio ABS no caso dos sistemas de frenagem hidráulicos. No sistema proposto, toda atuação é eletrônica realizado pelo motor acoplado diretamente na roda do veículo.

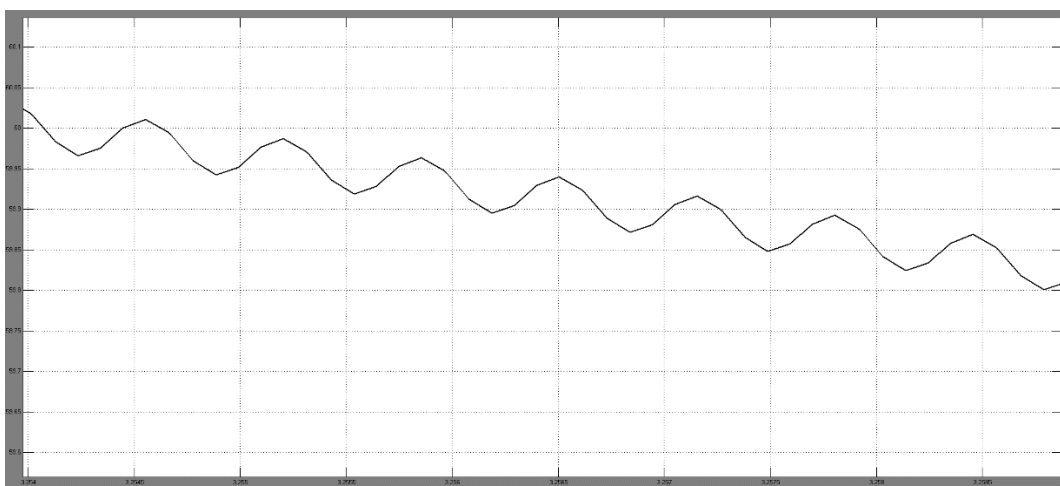


Figura 5-9 Atuação do ABS Elétrico

5.5. Resultados

Na simulação 1, quando realizada com o sistema de frenagem desligado, pode-se observar que a variável k fica negativa após o freio ser acionado, ou seja, a roda do veículo trava e o pneu desliza, validando o conceito apresentado pela “formula mágica” [61]. Quando o sistema de frenagem desenvolvido é acionado, pelo gráfico da variável k pelo tempo, pode-se observar que a partir do momento em que k é igual a zero a chave muda e o sistema de controle de frenagem começa a atuar, fazendo com que k volte a ser positivo, não deixando que a roda trave e o pneu deslize.

As simulações 2 e 3 comprovam o funcionamento do sistema de frenagem ABS eletrônico apresentado. Pelos gráficos das figuras 5-7 e 5-8 observa-se que a distância de frenagem quando o sistema está desligado é consideravelmente maior que com o sistema ligado. Pela figura 5-8 nota-se que a diferença entre as distâncias de frenagem é maior quando o coeficiente de atrito com o solo é menor, como esperado. Dado este que o sistema quando aplicado torna a frenagem do veículo mais eficiente.

Sendo assim, o sistema proposto apresenta comportamento satisfatório, atingindo o seu objeto, realizando a frenagem do sistema sem que haja travamento das rodas do veículo.

O capítulo a seguir apresenta simulações do sistema *In Wheel* proposto em ciclos de condução.

6. Simulações do sistema em ciclos de condução

Esse capítulo apresenta simulações do sistema *In Wheel* proposto em dois diferentes ciclos de condução, urbano e estrada, com o objetivo de medir a potência consumida pelo sistema, e assim calculando sua eficiência energética. Este capítulo também apresenta uma comparação dos resultados obtidos com a eficiência medida pelo experimento de Fernando Zegarra [62], onde foi medida a eficiência energética de um *Peugeot 3008* com os mesmos parâmetros e ciclos de direção.

6.1. Ciclos de condução

Os ciclos de condução estão compostos por duas categorias, ciclos urbanos e ciclos de Estrada. A finalidade de fazer esta divisão é lógica, pois os modos de direção são completamente diferentes. As seções seguintes apresentam os ciclos a serem utilizados, os resultados das simulações e suas análises.

6.1.1. New York City Cycle – NYCC

O ciclo *New York City Cycle – NYCC* simula a condução do veículo com velocidades baixas em ambiente urbano e com paradas frequentes, alcançando uma velocidade máxima de 44,6 km/h. A duração deste ciclo é de 598 segundos e percorre aproximadamente 1,89 km com velocidade média de 11,42 km/h. No gráfico apresentado pela figura 6-1, pode-se observar o comportamento da velocidade em função do tempo.

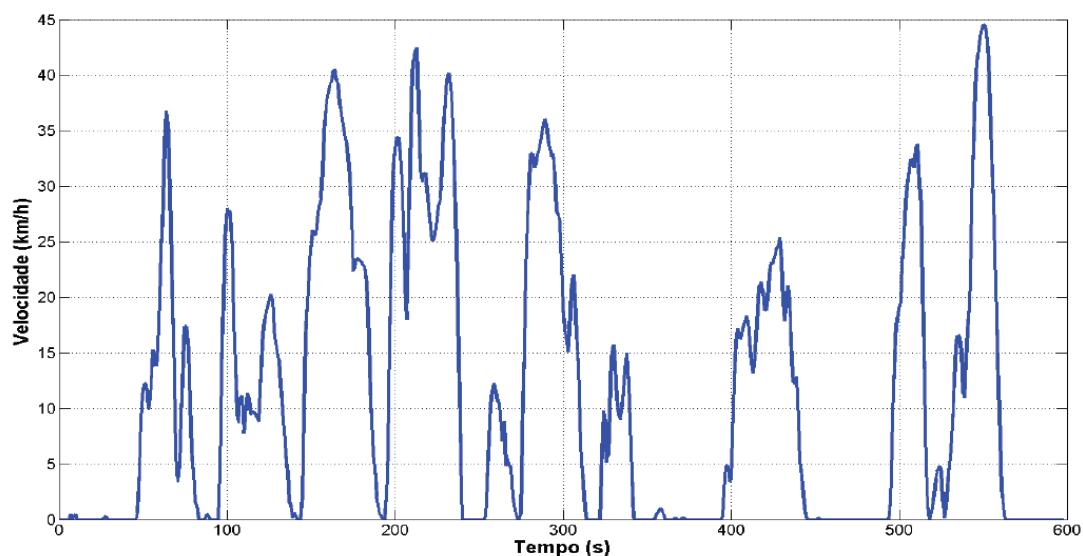


Figura 6-1 Ciclo de condução *New York City Cycle Driving Schedule - EPA NYCC*
[63]

6.1.2. EPA Highway Fuel Economy Test Driving Schedule

Este ciclo representa uma mistura de direção em estradas rurais e interestaduais, com um motor quente, típico de viagens mais longas e de tráfego livre. Este ciclo de condução tem uma duração de 765 segundos e percorre aproximadamente 16,51 km com velocidade média de 77,73 km/h. Na Figura 6-2 pode-se observar o comportamento da velocidade em função do tempo. Este ciclo de condução pode também ser encontrado na Norma da ABNT NBR 7024 [62].

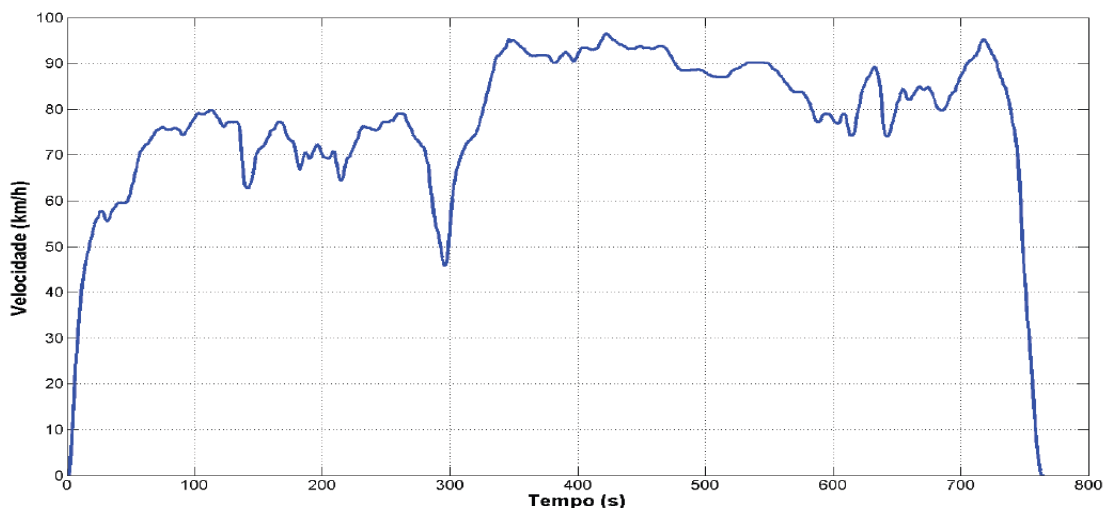


Figura 6-2 Ciclo de condução EPA Highway Fuel Economy Test Driving Schedule [63]

6.2. Geração dos dados de carga de entrada para as simulações

Os dados disponibilizados referentes aos ciclos de condução estão disponíveis na forma de velocidade do veículo (em Km/h) pelo tempo(s). Para a realização das simulações é preciso o cálculo do torque do motor para cada velocidade do ciclo.

Para descobrir o torque do motor é preciso calcular a força de tração das rodas motrizes do veículo, que é o somatório das forças de resistência aplicadas ao veículo. Estas forças são: força de resistência ao rolamento, força de resistência aerodinâmica, força de resistência à subida de um plano inclinado, força inercial de resistência à aceleração.

Para o cálculo das forças de resistência do veículo, utilizam-se os dados fornecidos pelo LEV (Laboratório de Engenharia Veicular da PUC-Rio [62]). Estes dados são referentes a um *Peugeot 3008* sem o motor a combustão e com 4 conjuntos do sistema proposto neste trabalho. A equação (6.1) descreve a força de resistência aerodinâmica a ser calculada.

$$F_{ra} = \frac{1}{2} \rho_a C_D A_f V^2 \quad (6.1)$$

onde os parâmetros para os cálculos são:

$$\rho_a = 1,184 \text{ (kg/m}^3\text{) a } 25^\circ\text{C.}$$

$$C_D = 0,296.$$

$$A_f = 2,652 \text{ m}^2.$$

V = Velocidade (em m/s).

A velocidade “ V ” é a entrada fornecida pelo ciclo de condução. A equação (6.2) descreve a força de resistência ao rolamento do veículo a ser calculada.

$$F_{rr} = Mgf_r \quad (6.2)$$

onde os parâmetros para os cálculos são:

$$M = 1742,2 \text{ (kg)}.$$

$$g = 9,81 \text{ (m/s}^2\text{)}.$$

Segundo Mehrdad Ehsani [64], o cálculo do coeficiente de resistência ao rolamento pode ser obtido utilizando a equação (6.3), que é válida na faixa de 0 até 128 km/h (35,6 m/s):

$$f_r = 0,01 \left(1 + \frac{v}{160} \right) \quad (6.3)$$

A equação (6.4) representa a força de resistência à subida de um plano inclinado.

$$F_{rp} = Mg \sin \alpha \quad (6.4)$$

Nos ciclos utilizados para as simulações não existe plano inclinado, sendo assim

$$\alpha = 0 \text{ logo } F_{rp} = 0.$$

A Força de Resistência que o veículo experimenta quando ele acelera ou desacelera é

$$F_x = M\delta \frac{dv}{dt} \quad (6.5)$$

Segundo Mehrdad Ehsani [64], o cálculo do fator de correção de massas (δ) para um carro convencional pode ser obtido utilizando

$$\delta = 1 + \delta_1 + \delta_2 i_0^2 i_{gi}^2 \quad (6.6)$$

onde, para o modelo utilizado, os valores das variáveis são: $\delta_1 = 0,04$; $\delta_2 = 0,0025$ [14].

Como o sistema proposto é composto por motores embutidos nas rodas, não se tem diferencial e caixa de marcha. Assim, os valores de i_0^2 e i_{gi}^2 são iguais a 1.

O termo $(\frac{dv}{dt})$ na equação é a aceleração do veículo. Esta razão é calculada para cada instante de tempo i :

$$a_i = \frac{dv_i}{dt_i} = \frac{v_i - v_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \quad (6.7)$$

Como dito anteriormente, a força de tração das rodas motrizes é o somatório das forças de resistência aplicadas ao veículo, sendo assim:

$$F_T = F_{ra}(i) + F_{rr}(i) + F_{rp}(i) + F_x(i) \quad (6.8)$$

Os dados fornecidos pelo LEV [62] são para um veículo com motorização nas 4 rodas, porém nesta dissertação trata-se do modelo de ¼ do veículo, assim calcula-se a força de tração em uma única roda:

$$F_{TR} = \frac{F_T}{4} \quad (6.9)$$

Para o cálculo de F_{TR} de forma automática para os diferentes ciclos utilizados nas simulações, utiliza-se o software MatLab2012®, onde o algoritmo lê uma planilha Excel com os dados do ciclo (velocidade do veículo em km/h e tempo em s) em duas colunas distintas, e tem como saída um novo arquivo com os valores de F_{TR} para cada velocidade em relação ao tempo.

Após este processo, obtêm-se os arquivos de entradas para as simulações: o primeiro arquivo de entradas para o motor elétrico do sistema proposto contendo velocidade de rotação em (rpm), e o segundo arquivo com os valores de F_{TR} .

A eficiência energética é representada pela equação

$$\eta_{ene} = \frac{\text{Quantidade de energia utilizada}}{\text{Quantidade de energia fornecida}} \quad (6.10)$$

A quantidade de energia utilizada se refere à quantidade de energia que os pneus de tração precisam para trasladarem de um ponto A até um ponto B. A energia fornecida é calculada mediante uma simulação: esta energia é a que os pneus de tração precisam para mover o veículo. Calcula-se seguindo os seguintes passos:

- somam-se as forças de resistência que o sistema de propulsão deve vencer. Esta é a força total;
- a força total é multiplicada pela velocidade do pneu para obter a potência na roda; e para obter a energia consumida, basta calcular uma integral da potência consumida ao longo do tempo de duração do percurso determinado.

6.3. Resultados das simulações do sistema nos ciclos de condução

A figura 6-3 representa o diagrama do sistema no software *Simulink*®, onde utilizam-se blocos para leitura de dados diretamente do programa *Excel*®, e blocos para geração dos gráficos e de um outro arquivo com os resultados das simulações. Inserindo a planilha de entrada, os resultados são obtidos automaticamente, e os gráficos gerados são salvos em formato de imagem (*metafile*).

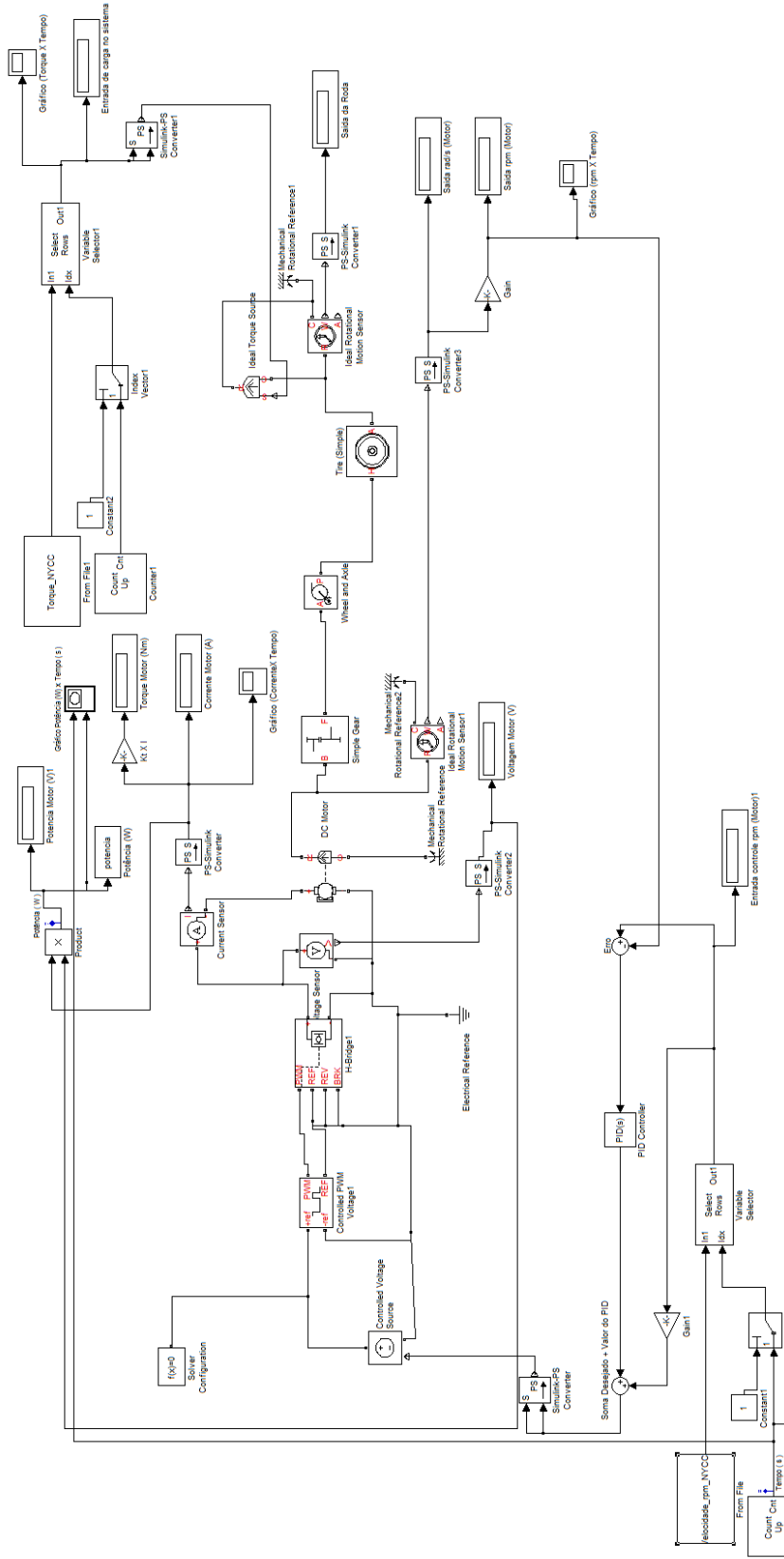


Figura 6-3 Diagrama de blocos da simulação em Simulink®

A figura 6-4 representa a simulação do ciclo de condução *EPA Highway Fuel Economy Test Driving Schedule* referente ao ciclo de condução de estrada.

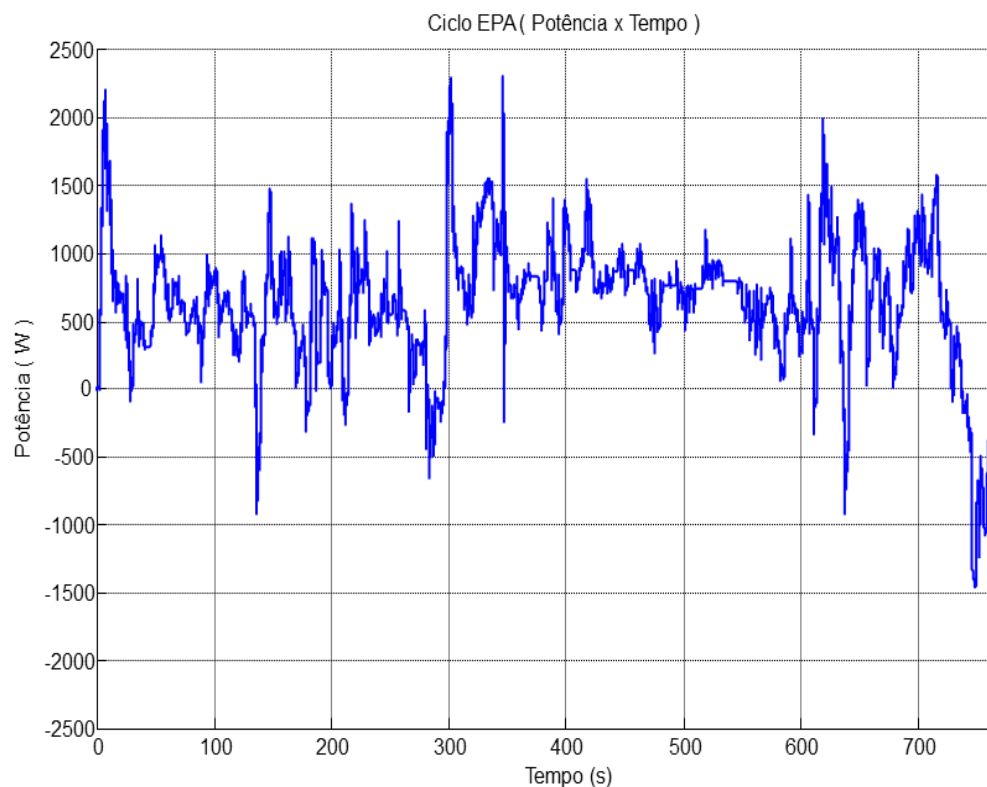


Figura 6-4 Gráfico Potência x Tempo ciclo EPA

Após a obtenção dos dados da simulação, utilizando as equações apresentadas na seção anterior, calcula-se a eficiência do sistema proposto. Para a simulação do ciclo de condução *EPA Highway Fuel Economy Test Driving Schedule*, a eficiência energética do sistema proposto (η_{ene}) = 82,32%. Comparando o resultado da simulação obtida com o resultado encontrado em teste real do mesmo ciclo por Fernando Zegarra [62], tem-se a eficiência energética do veículo de combustão interna (η_{ene}) = 17,01% [62].

A figura 6-5 representa a simulação do ciclo de condução *New York City Cycle – NYCC* referente ao ciclo de condução urbano.

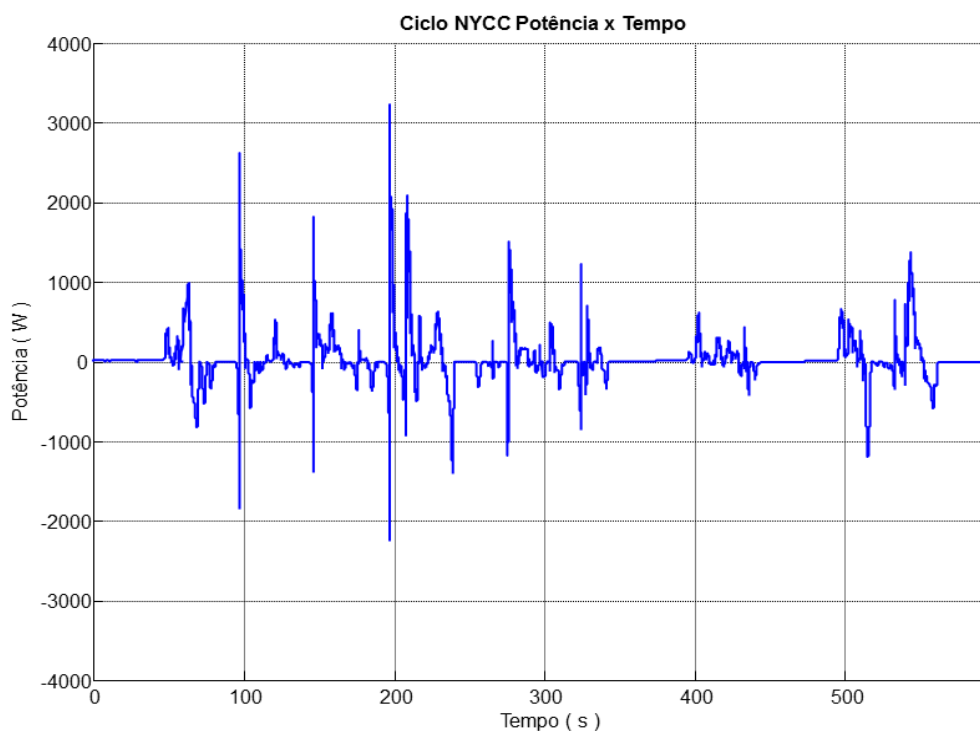


Figura 6-5 Gráfico Potência x Tempo ciclo NYCC

Finalmente, para a simulação do ciclo de condução *New York City Cycle* – *NYCC*, a eficiência energética do sistema proposto (η_{ene}) = 79,52%. Comparando o resultado da simulação obtida com o resultado encontrado em teste real do mesmo ciclo por Fernando Zegarra [62], tem-se eficiência energética do veículo de combustão interna (η_{ene}) = 12,64% [62].

O capítulo a seguir apresenta o experimento do sistema *In Wheel* proposto em bancada de testes.

7. Experimento em bancada de testes

Para confirmar os dados de eficiência energética obtidos nas simulações apresentadas no capítulo anterior, este capítulo apresenta o desenvolvimento de uma bancada de testes com um dinamômetro elétrico ativo, softwares utilizados e desenvolvidos, a metodologia do experimento, e a apresentação de seus respectivos resultados. O objetivo do experimento é repetir os ciclos de condução apresentados e mensurar a eficiência energética do sistema *In Wheel* proposto.

7.1 Descrições dos componentes

Para o fornecimento de energia para o sistema, utilizam-se oito *packs* de baterias de NiCd 24V 3600mAh [65] apresentado na figura 7-1. Os *packs* são conectados dois a dois em série para obter 48V, e em seguida os quatro *packs* de 48V formados são conectados em paralelo, totalizando 14.400mAh de autonomia para o sistema.



Figura 7-1 Baterias NiCd 24 V 3600 mAh

Por medida de segurança para o experimento, devido à alta corrente e tensão aplicadas, utiliza-se para *ON/OFF* a chave de contato *MS-2 Switch* [66] representada na figura 7-2. Esta chave de contato suporta 175 A contínuos, 500 A por três minutos e 100 A por vinte e cinco segundos.



Figura 7-2 Chave de contato MS-2

Para controle do motor do sistema *In Wheel* proposto, utiliza-se o controlador de velocidade *AXE 7245* da *Alltrax*, representado na figura 7-3. Este controlador de velocidade suporta 450 A por trinta segundos, 350 A por cinco minutos e 200 A contínuos. Possui comunicação RS232 com o computador, onde é programável

via software próprio, possui controle de velocidade e controle de corrente. O controlador *AXE 7245* [67] possui sensor de corrente, sensor de tensão e sensor de temperatura. Não é possível descrever detalhadamente estes sensores, pois o fabricante não disponibiliza as informações.



Figura 7-3 Controlador de velocidade AXE 7245

Para o envio de dados dos ciclos para o controlador, é necessária a utilização de um módulo digital/analogico como o da *National Instruments*, pois a plataforma de desenvolvimento do software de controle utilizado é em *LabView®*. Assim, utiliza-se o módulo NI USB-6008 [68] representado na figura 7-4, com sinal de trabalho de 0 a 5V.



Figura 7-4 NI USB-6008

Utiliza-se no sistema In Wheel proposto o motor *LEM 200-127* [46] representado na figura 7-5. As simulações apresentadas no capítulo anterior foram realizadas com os dados deste mesmo motor. O *LEM 200-127* é um motor elétrico DC série, amplamente utilizado como motor de arranque em veículos de grande porte como escavadeiras e tratores. Sua tensão de trabalho é de 48V, possui um torque

nominal de 31,5 Nm, potência 16,08 kW ou 21,56 HP, e uma eficiência energética de 89%.



Figura 7-5 Motor LEM 200 -127

Com função de dinamômetro ativo, utiliza-se um motor WEG trifásico com gaiola cat N [69] representado na figura 7-6. Sua potência é de 7,5 HP, fator de potência $\cos \varphi = 0,88$, e quando energizado a 220V sua corrente máxima é de 25 A. O torque pode ser obtido por $\tau = i * \cos \varphi$, assim seu torque máximo é de 22 Nm.



Figura 7-6 Motor WEG trifásico

Para controle do motor WEG, foi utilizado o inversor de frequência *WEG CFW-11* [70] representado na figura 7-7. Via conexão USB, o inversor comunica com o computador por meio de software próprio, o *Super Drive G2®*.



Figura 7-7 Inversor de frequência WEG CFW-11

7.2 Descrição dos softwares

Esta seção se dedica à apresentação dos softwares que fazem parte do experimento. Utilizam-se três softwares: software próprio desenvolvido em *LabView*® para controle dos ciclos de condução; o *Super Drive G2*® para controle do dinamômetro; e o *AXE 39 ControllerPRO*® para programação do controlador *AXE 7245* e aquisição dos dados do experimento.

7.2.1 Software em *LabView*® para controle do experimento

Desenvolvido em *LabView*®, esse software tem como objetivo realizar o ciclo de condução de forma automática, lendo as entradas de um arquivo Excel, do mesmo modo que foi realizado nas simulações. A tela principal do software possui um modo manual onde o motor é controlado por uma escala modularizada e um modo automático para realização do ciclo de condução.

O controlador *AXE 7245* é configurado para receber como sinal de entrada um sinal modularizado de 0 a 5 V, sinal este enviado do software via NI USB-6008.

O modo manual existe para que se possam realizar testes rápidos do sistema, sem uma escala refinada de velocidade. Neste caso, cada 0.1 V de sinal corresponde a 52 RPM do motor. No modo automático, o software lê a entrada do ciclo de condução em velocidade angular (RPM) e realiza a conversão para sinal em nível de tensão. A modularização do sinal de saída do software pode ser descrita por

$$\text{Sinal Saída} = \frac{\text{RPM}_{\text{Desejado}} * 5}{2496} \quad (7.1)$$

onde o valor 2496 corresponde à rotação máxima do motor utilizando uma tensão de 48 V.

A figura 7-8 apresenta a tela principal do software de controle da bancada do experimento. Na figura podem-se observar o modo manual e o modo automático do software. No modo automático, existe um gráfico que apresenta em tempo real a velocidade angular em função do tempo. Existem também um conta giros para acompanhamento do experimento. Outra funcionalidade existente é uma tabela dinâmica que mostra as entradas do ciclo, e o sinal modularizado enviado para o controlador de velocidade AXE 7245.

A figura 7-9 mostra o diagrama de blocos do sistema. Através dele é possível visualizar todos os blocos utilizados no desenvolvimento do software.

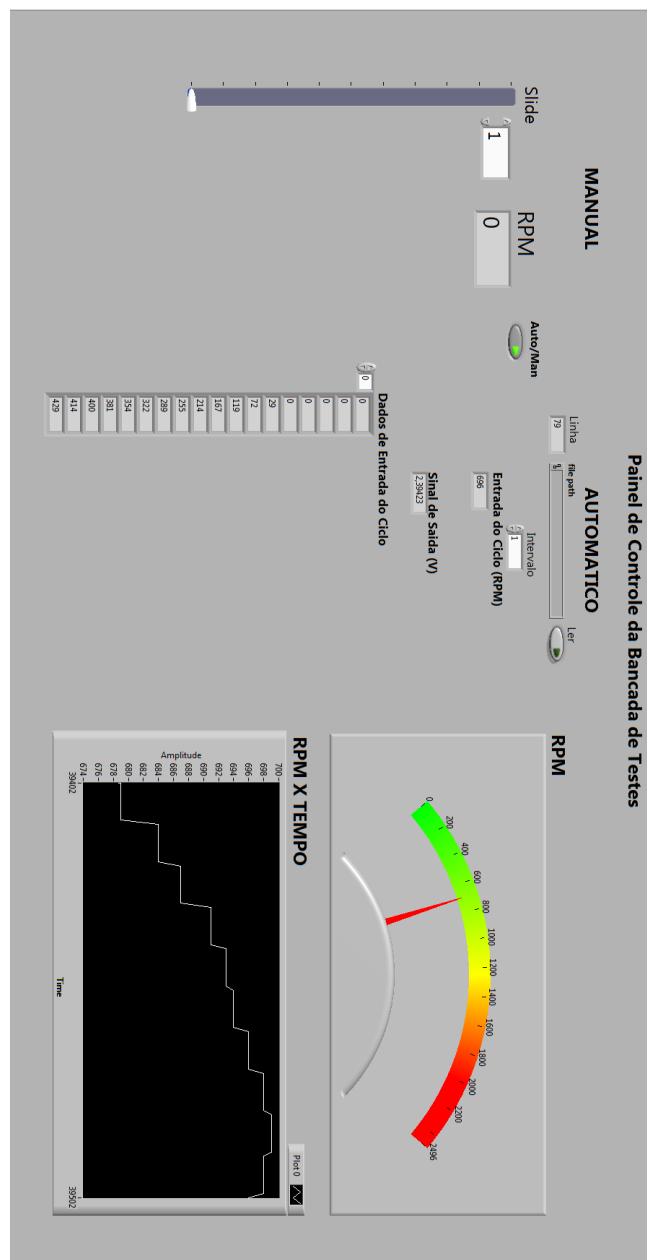


Figura 7-8 Tela principal do software em LabView® para o experimento

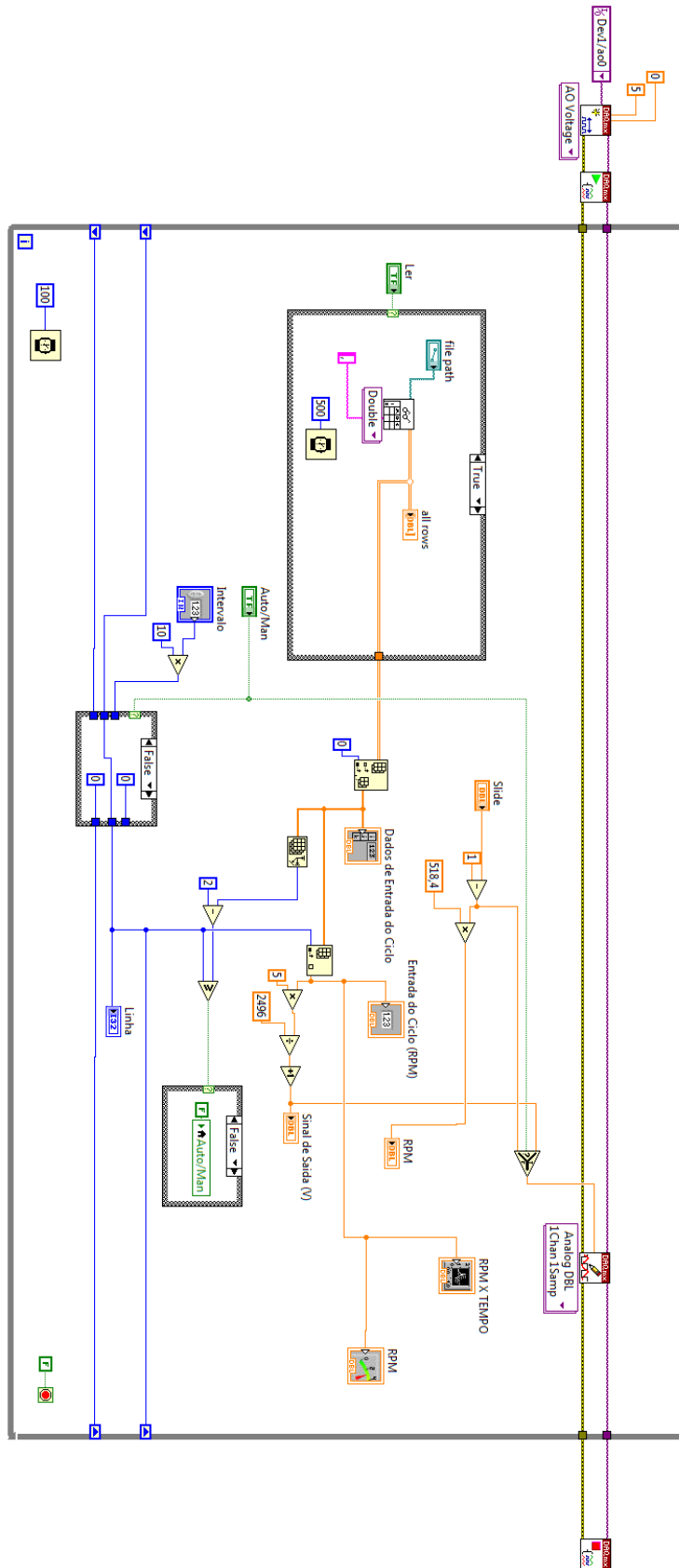


Figura 7-9 Diagrama de blocos do software em *LabView*® para o experimento

7.2.2 Super Drive G2 WEG

O *Super Drive G2*® mostrado na figura 7-10 é um software da WEG para controle de inversores. Sua comunicação com o computador é via USB, e por ele é possível configurar os parâmetros do inversor para o motor WEG desejado. O software é limitado, pois o único comando possível é de controle de velocidade angular. Ele possui uma área de monitoramento, porém não gera um log com os dados do teste. O software mostra na tela o gráfico em relação ao tempo do dado desejado em tempo real, porém não grava ao longo do tempo. A única opção de exportação de dados é uma figura de um instante desejado do experimento.

No experimento, o G2 é utilizado para controlar uma velocidade constante do dinamômetro e visualizar a corrente elétrica ao longo do experimento, dado que é utilizado para o cálculo de torque e potência consumidos pelo dinamômetro no experimento.

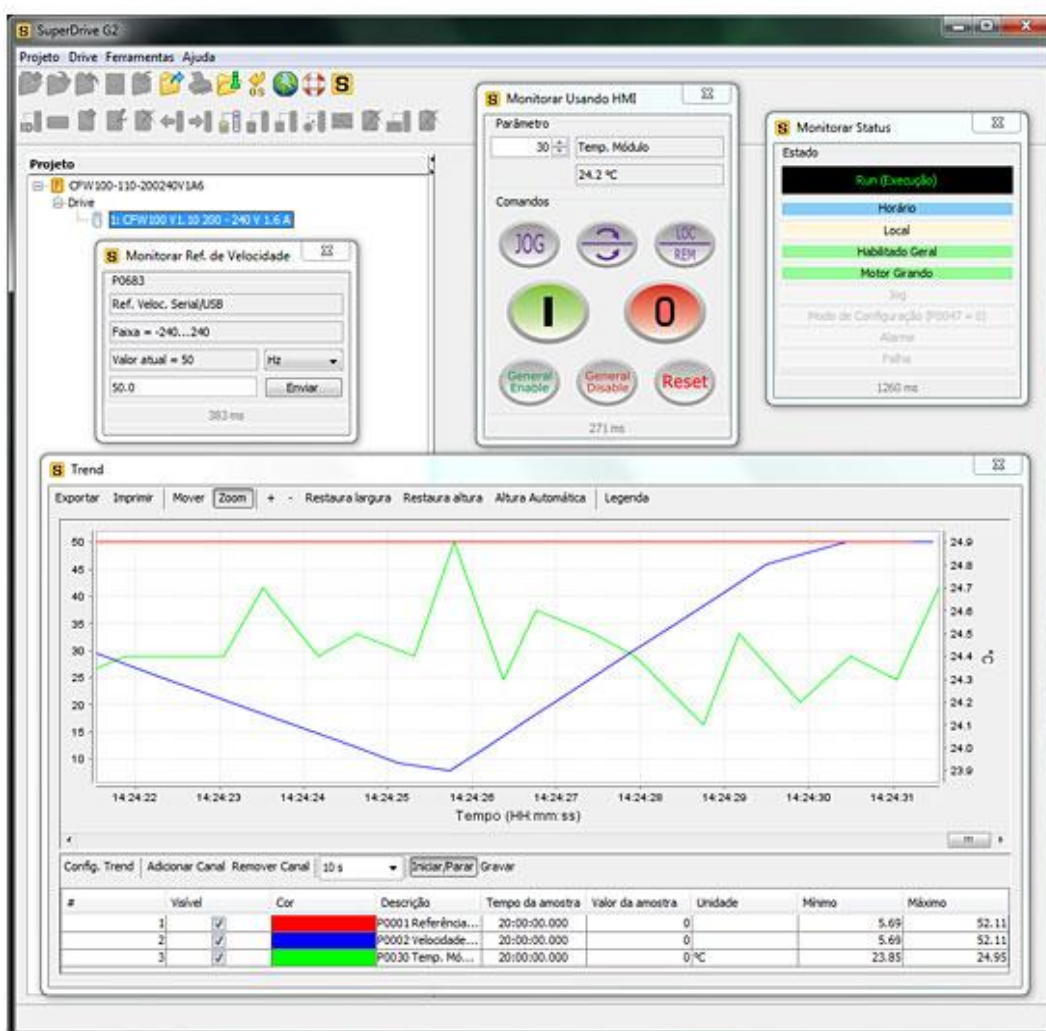


Figura 7-10 Tela do software Super Drive G2

7.2.3 AXE 39 ControllerPRO

Para configuração dos parâmetros do controlador e log dos dados do experimento, utiliza-se o software *AXE 39 ControllerPRO*. Suas janelas são simples e intuitivas, onde é possível realizar as configurações desejadas e obter os dados do experimento via arquivo de texto que pode ser convertido para Excel para geração de gráficos. As figuras 7-11, 7-12 e 7-13 mostram as três telas do software, sendo as duas primeiras de configurações e a terceira de monitoramento e geração de *datalog*.

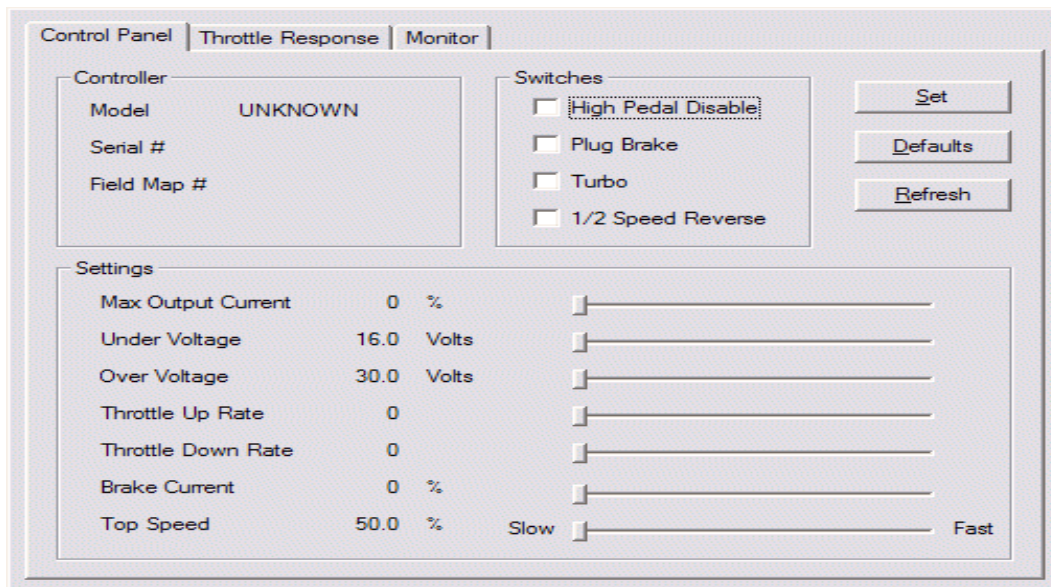


Figura 7-11 Tela de configuração de parâmetros para o motor do software AXE 39 ControllerPRO

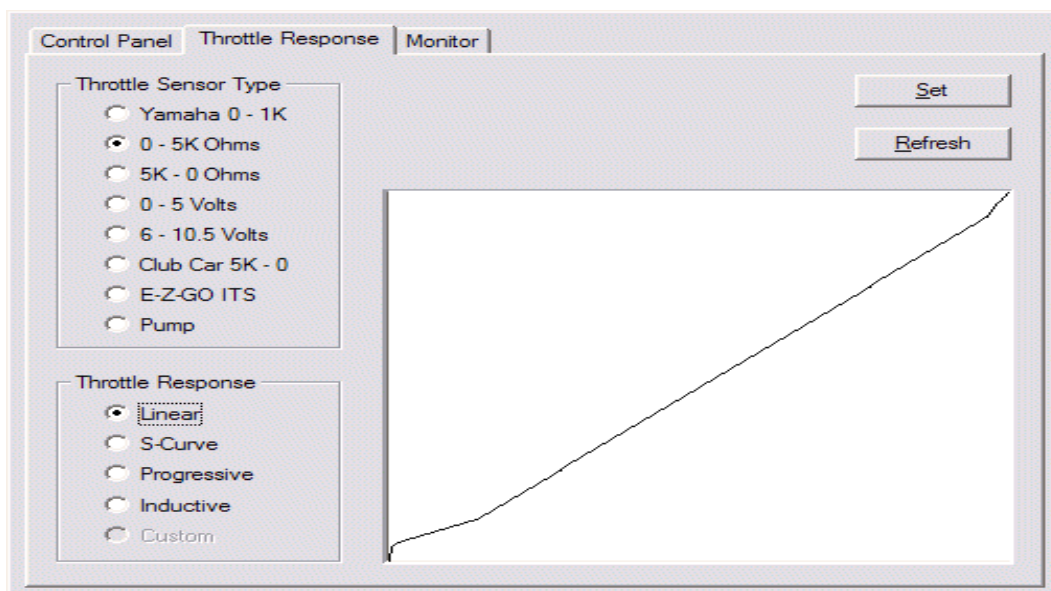


Figura 7-12 Tela de configuração de parâmetros de sinal de entrada do software AXE 39 ControllerPRO

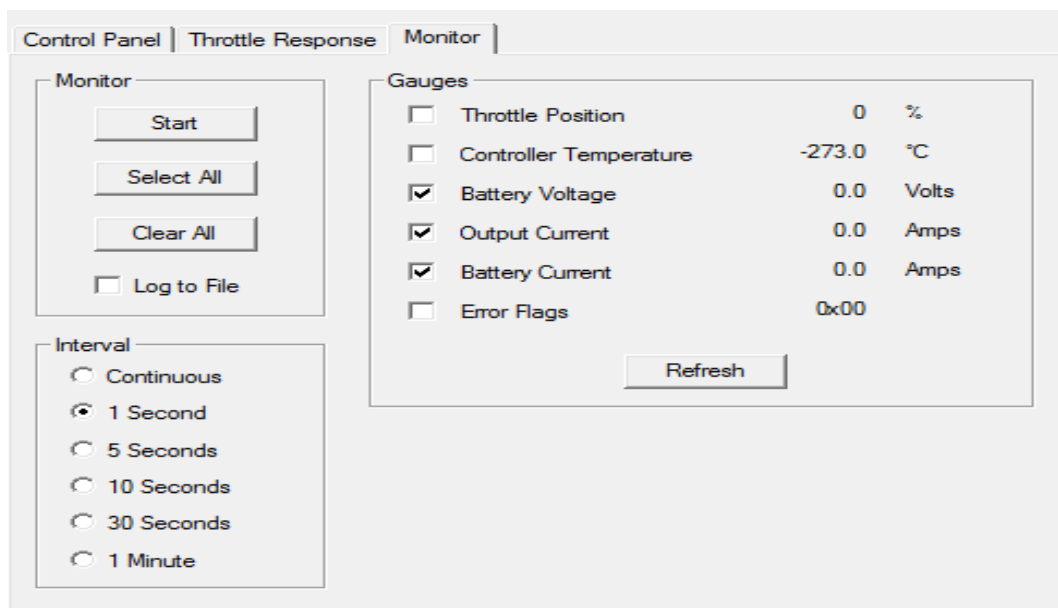


Figura 7-13 Tela de configuração do *datalog* do software AXE 39 ControllerPRO

7.3 Descrição do experimento

O objetivo do experimento é repetir os ciclos de condução realizados nas simulações. Quando iniciaram-se os testes de frenagem do veículo, aplicou-se no dinamômetro um torque negativo. Deste modo, o dinamômetro passa a girar o motor em teste, o qual passa a se comportar como gerador. Na realização de teste ocorreu o fenômeno de *Charge Pump*, que consiste em um pulso de uma tensão elevada gerado pelo motor no momento em que se transforma em gerador.

Para que o fenômeno de *Charge Pump* não afete o controlador, deve-se utilizar um circuito de proteção para controle de corrente e pulsos de tensão. Este tipo de circuito é utilizado em sistemas de recuperação de energia em frenagem.

Um limitador do experimento é o software Super Drive G2 utilizado para controlar o dinamômetro. Ele possui somente a opção de controle da velocidade angular, controle este que não é dinâmico, não podendo variar com o tempo. Sendo assim, a realização do experimento dos ciclos de condução ocorre com a aplicação de torques constantes durante cada ciclo.

Com os componentes descritos anteriormente, monta-se a bancada de testes para o experimento. A figura 7-14 apresenta o diagrama de montagem da bancada de testes.

DIAGRAMA DE MONTAGEM BANCADA DE TESTES

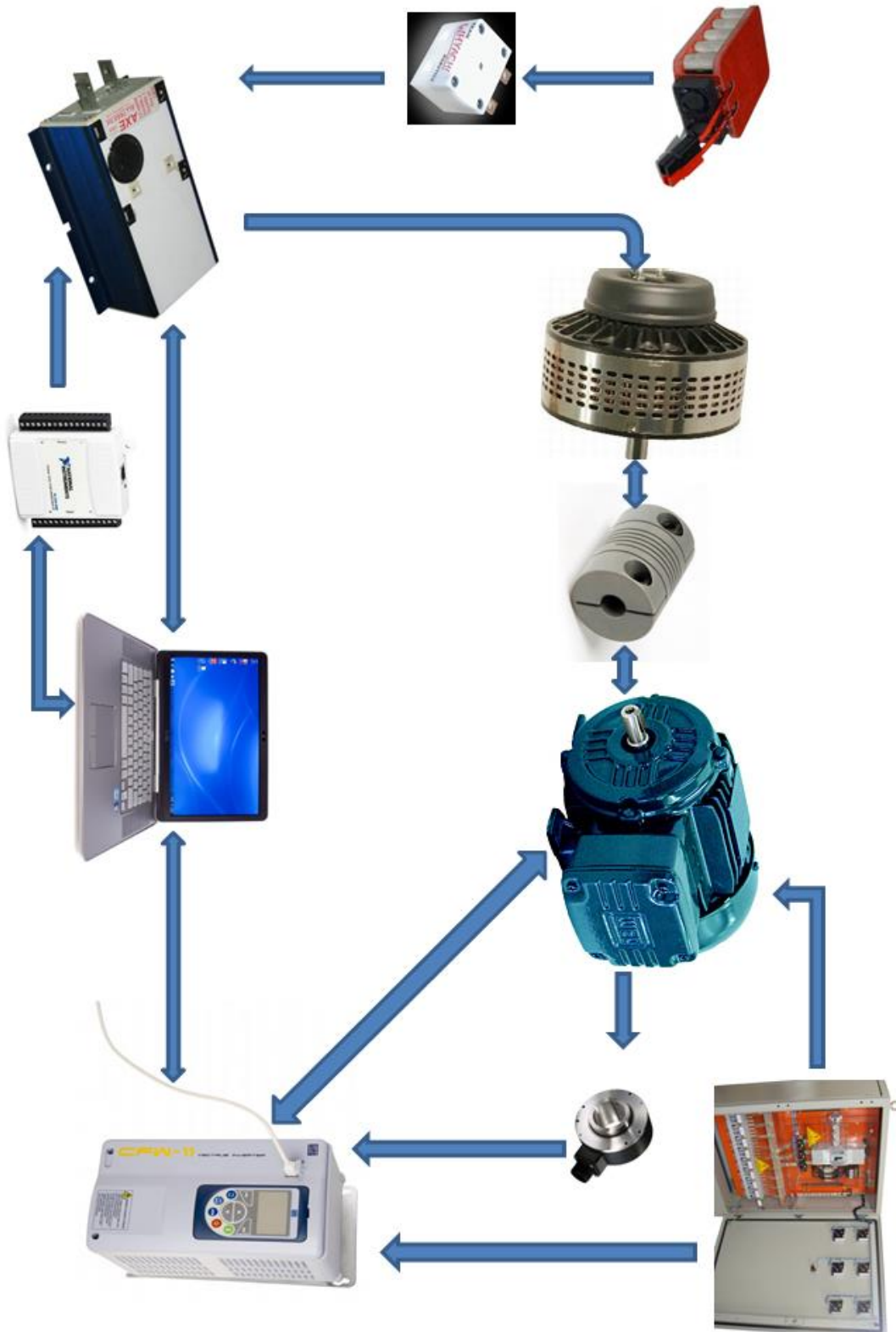


Figura 7-14 Diagrama de montagem da bancada de testes

As figuras 7-15 e 7-16 apresentam a bancada de testes do experimento.



Figura 7-15 Bancada de testes do experimento



Figura 7-16 Outra vista da bancada do experimento

Após a detecção das limitações descritas acima, cada ciclo é experimentado com três valores de torque diferentes, todos positivos. A escolha dos valores de torque aplicados é decorrente da análise dos torques originalmente aplicados nos ciclos de condução durante as simulações. O torque mínimo aplicado teve influência do sensor de corrente utilizado pelo controlador *AXE 7245*, pois o mesmo não consegue gerar dados de corrente com torque aplicado inferior a 9,5Nm. Esta informação foi conseguida experimentalmente, pois o fabricante não disponibiliza as informações sobre o sensor utilizado.

Os valores de torque escolhidos para o experimento foram 9,5Nm, 13,2Nm e 20,23Nm. O torque de 9,5Nm foi utilizado, pois é o valor mínimo que gera uma corrente sensível ao sensor de corrente do controlador. Como o dinamômetro possui somente a opção de controle de velocidade angular, experimentalmente utilizando o monitor de corrente do software *Super Drive G2*, analisaram-se as correntes correspondentes a cada velocidade angular. O torque pode ser definido por $\tau = i * \cos \varphi$, assim encontram-se as velocidades angulares correspondentes aos valores de torque desejados.

Apesar de o dinamômetro possuir um encoder, este somente realimenta o controle do inversor. Por não possuir acesso aos dados do encoder do dinamômetro o experimento é realizado em malha aberta.

Após cada experimento, utilizando o software *AXE 39 ControllerPRO*, aquisitam-se os datalogs referentes à tensão fornecida e a corrente fornecida ao motor em teste. A potência fornecida, definida por $P = V * i$, é então calculada. Como é conhecido o valor do torque aplicado pelo dinamômetro e sua velocidade angular, tem-se que $P = \tau * \omega$. Assim, calcula-se a potência consumida.

A partir das potências fornecidas e consumidas, encontra-se a eficiência para cada experimento. Outro ponto destacado é que na simulação é utilizado o modelo de uma redução da Apex Dynamics com relação de 3:1 com eficiência de 98%, assim a eficiência real do sistema é a eficiência encontrada no experimento subtraído em 2%.

7.4 Resultados

As figuras 7-17 a 7-28 apresentam os gráficos dos resultados do experimento, assim como os cálculos de eficiência energética para cada experimento realizado.

Experimento 1: Ciclo EPA com torque constante no dinamômetro de 9,5Nm

Gráfico de Potência Fornecida (kW) x Tempo (s)

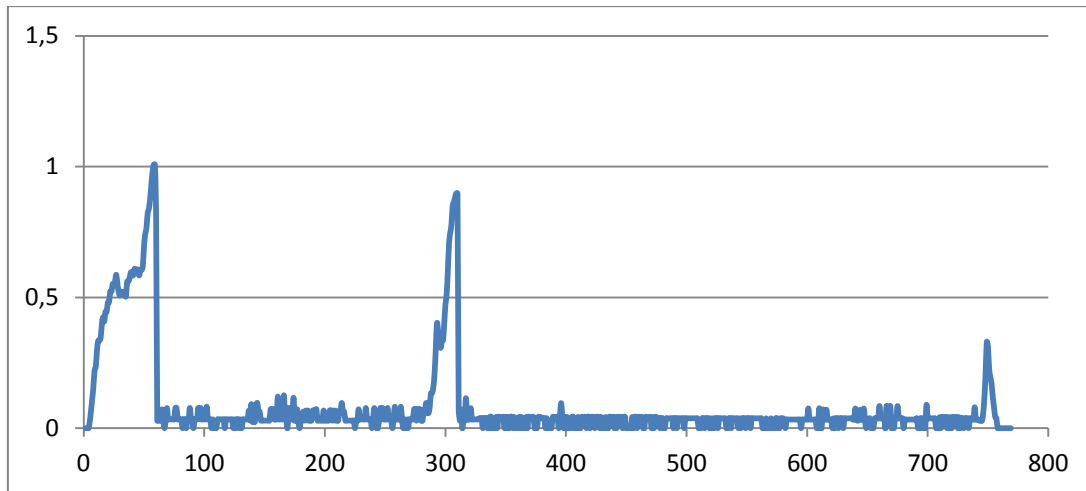


Figura 7-17 Experimento 1 gráfico de Potência Fornecida (kW) x Tempo (s)

Gráfico de Potência Consumida (kW) x Tempo (s)

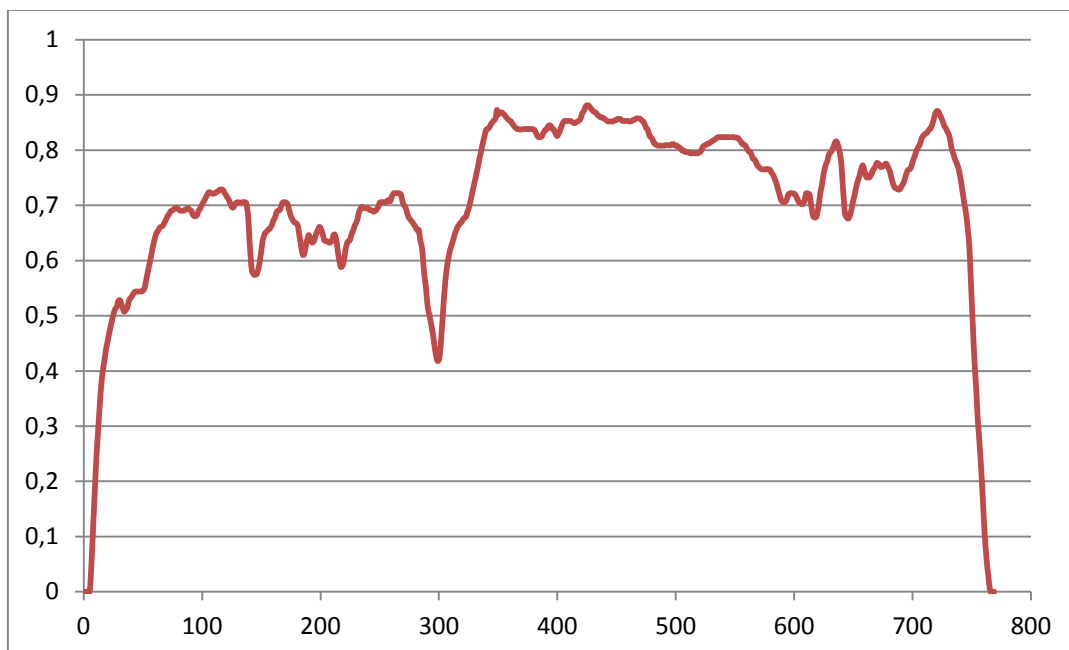


Figura 7-18 Experimento 1 gráfico de Potência Consumida (kW) x Tempo (s)

Potência Fornecida = 656,06 kW

Potência Consumida = 543,11 kW

$(\eta_{ene}) = 82,78\%$

Retirando 2% de perda da caixa de redução $(\eta_{ene}) = 81,12\%$

Experimento 2: Ciclo EPA com torque constante no dinamômetro de 13,2Nm

Gráfico de Potência Fornecida (kW) x Tempo (s)

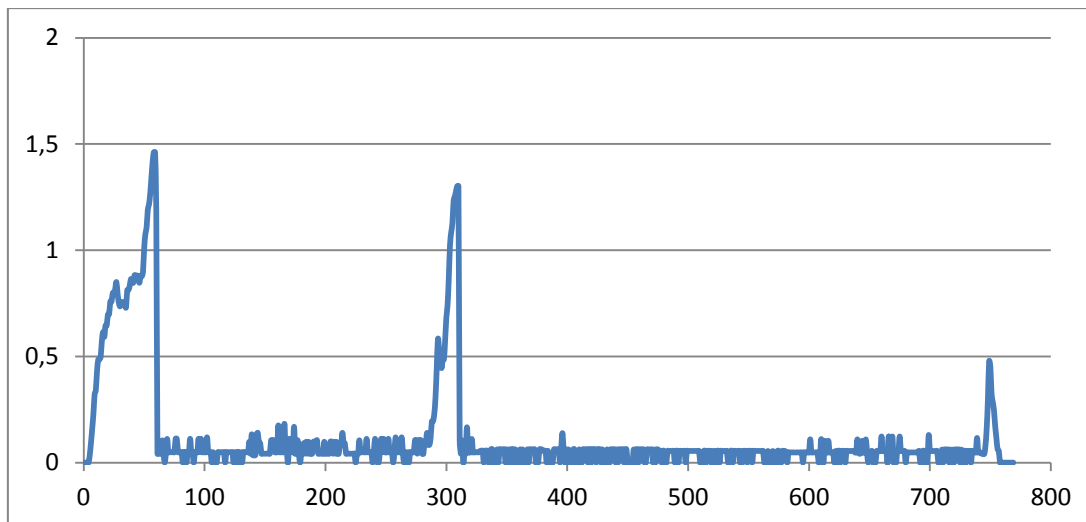


Figura 7-19 Experimento 2 gráfico de Potência Fornecida (kW) x Tempo (s)

Gráfico de Potência Consumida (kW) x Tempo (s)

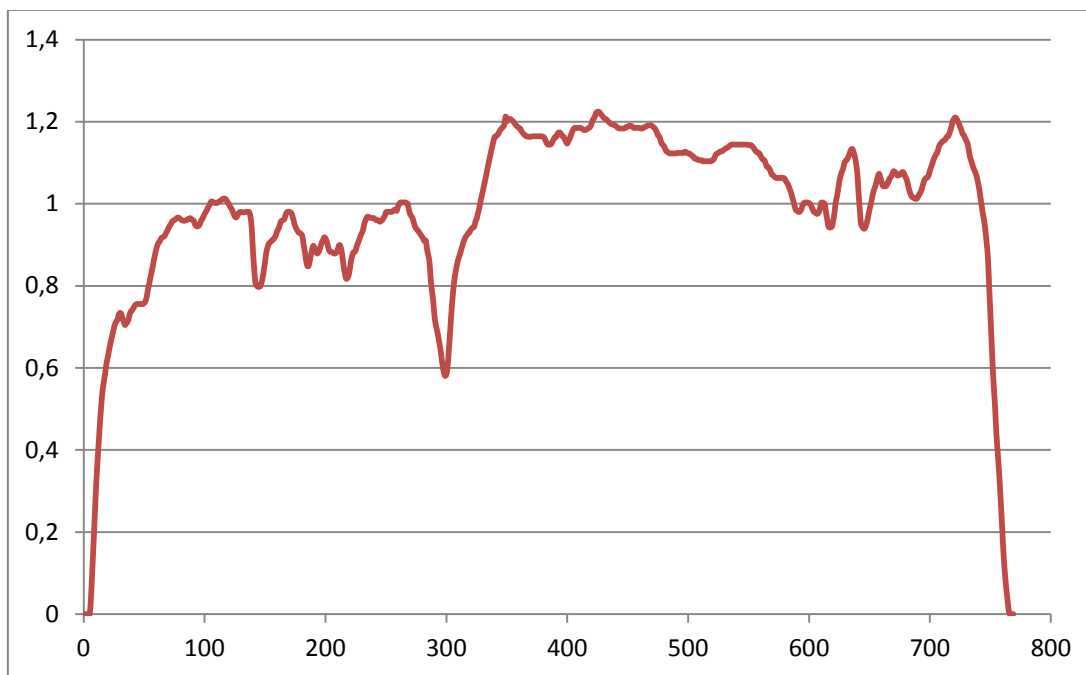


Figura 7-20 Experimento 2 gráfico de Potência Consumida (kW) x Tempo (s)

Potência Fornecida = 969,95 kW

Potência Consumida = 754,63 kW

$(\eta_{ene}) = 77,80\%$

Retirando 2% de perda da caixa de redução $(\eta_{ene}) = 76,24\%$

Experimento 3: Ciclo EPA com torque constante no dinamômetro de 20,23Nm

Gráfico de Potência Fornecida (kW) x Tempo (s)

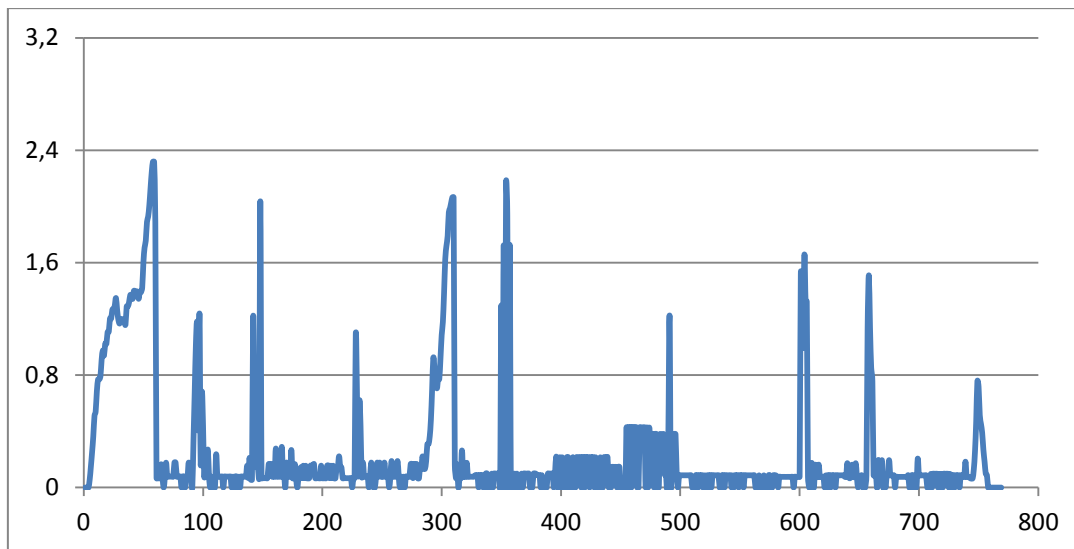


Figura 7-21 Experimento 3 gráfico de Potência Fornecida (kW) x Tempo (s)

Gráfico de Potência Consumida (kW) x Tempo (s)

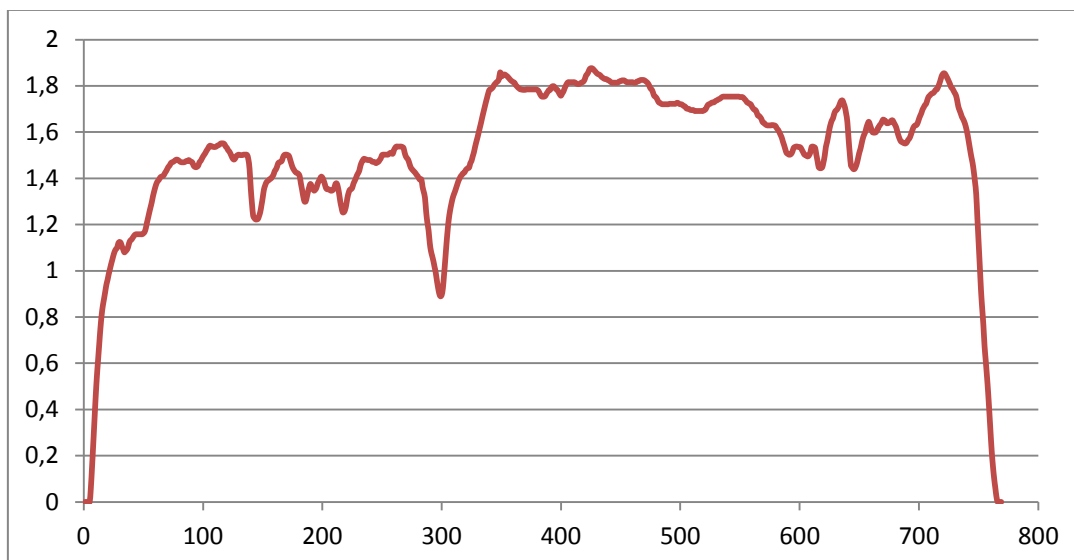


Figura 7-22 Experimento 3 gráfico de Potência Consumida (kW) x Tempo (s)

Potência Fornecida = 1950,05 kW

Potência Consumida = 1156,33 kW

$(\eta_{ene}) = 59,31\%$

Retirando 2% de perda da caixa de redução $(\eta_{ene}) = 58,12\%$

Experimento 4: Ciclo NYCC com torque constante no dinamômetro de 9,5Nm

Gráfico de Potência Fornecida (kW) x Tempo (s)

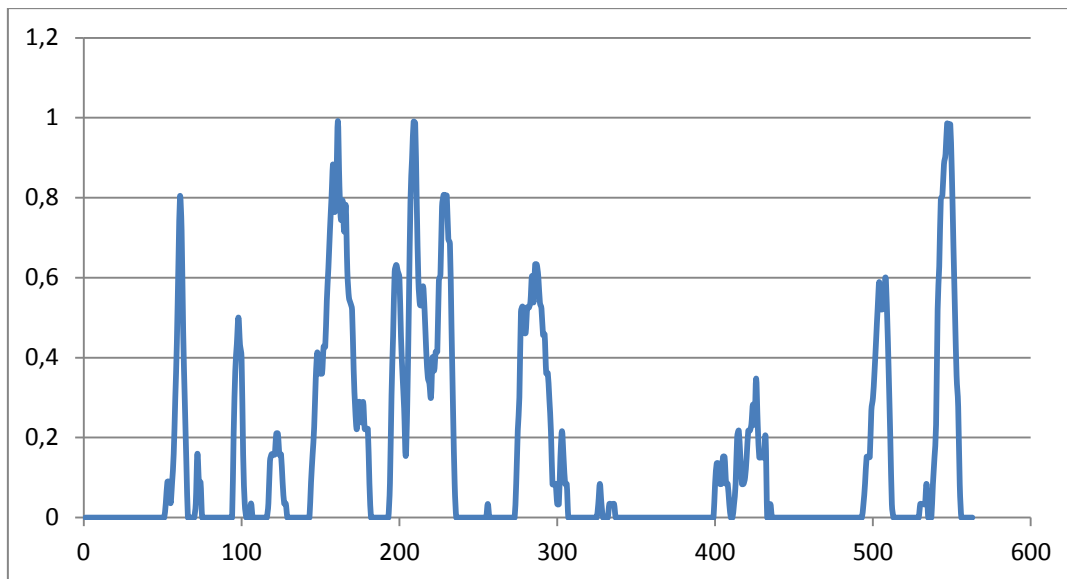


Figura 7-23 Experimento 4 gráfico de Potência Fornecida (kW) x Tempo (s)

Gráfico de Potência Consumida (kW) x Tempo (s)

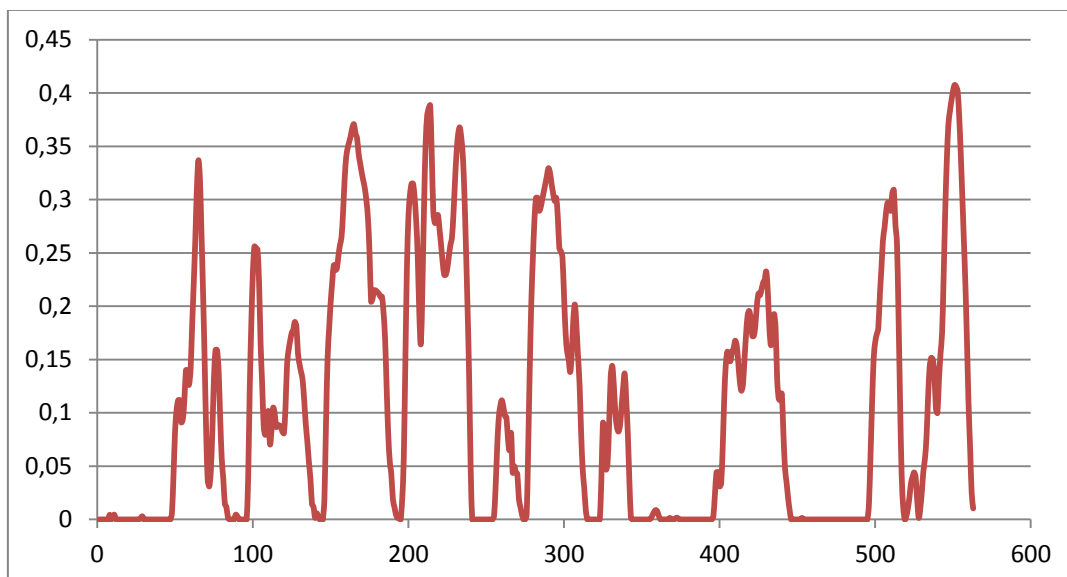


Figura 7-24 Experimento 4 gráfico de Potência Consumida (kW) x Tempo (s)

Potência Fornecida = 82,81 kW

Potência Consumida = 62,46 kW

$(\eta_{ene}) = 75,43\%$

Retirando 2% de perda da caixa de redução $(\eta_{ene}) = 73,92\%$

Experimento 5: Ciclo NYCC com torque constante no dinamômetro de 13,2Nm

Gráfico de Potência Fornecida (kW) x Tempo (s)

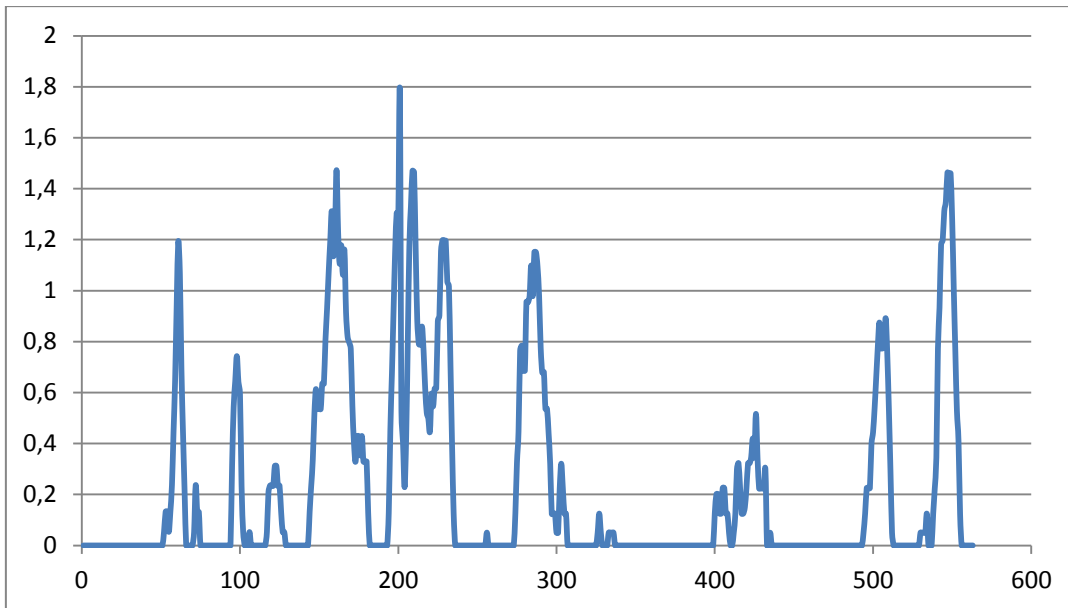


Figura 7-25 Experimento 5 gráfico de Potência Fornecida (kW) x Tempo (s)

Gráfico de Potência Consumida (kW) x Tempo (s)

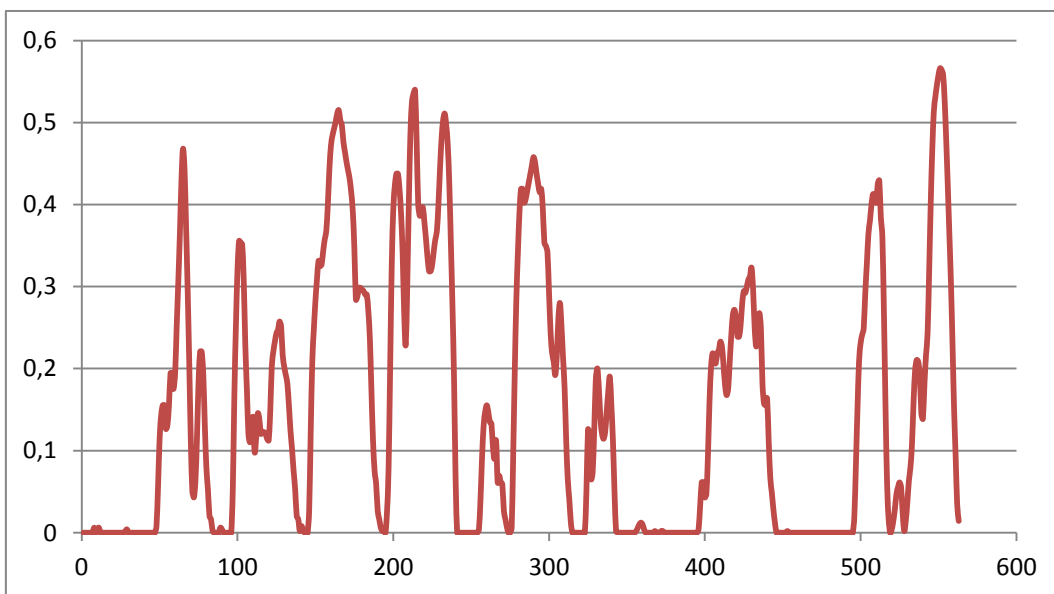


Figura 7-26 Experimento 5 gráfico de Potência Consumida (kW) x Tempo (s)

Potência Fornecida = 126,76 kW

Potência Consumida = 86,79 kW

$(\eta_{ene}) = 68,47\%$

Retirando 2% de perda da caixa de redução $(\eta_{ene}) = 67,10\%$

Experimento 6: Ciclo NYCC com torque constante no dinamômetro de 20,23Nm

Gráfico de Potência Fornecida (kW) x Tempo (s)

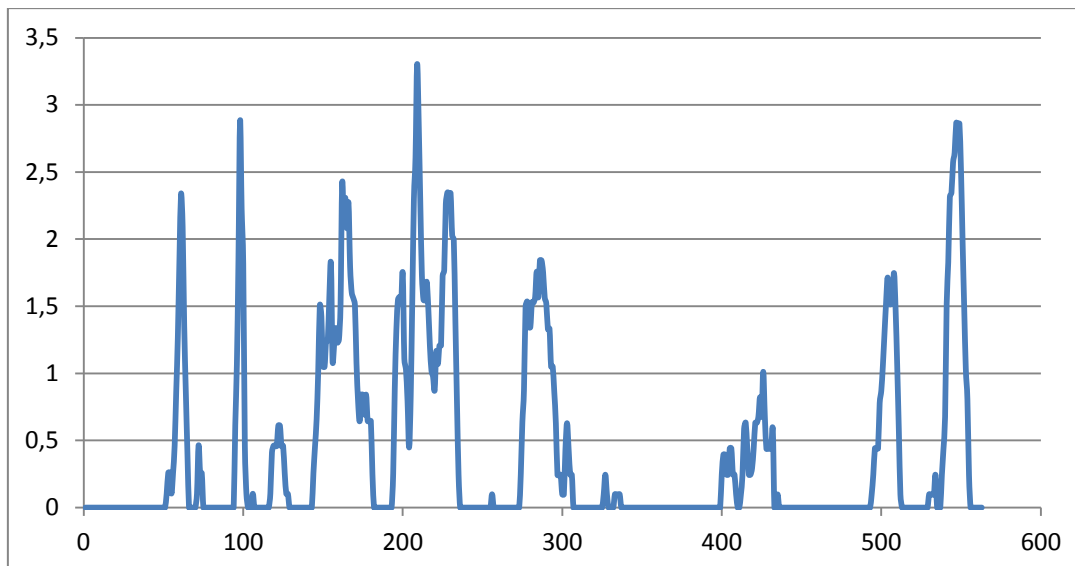


Figura 7-27 Experimento 6 gráfico de Potência Fornecida (kW) x Tempo (s)

Gráfico de Potência Consumida (kW) x Tempo (s)

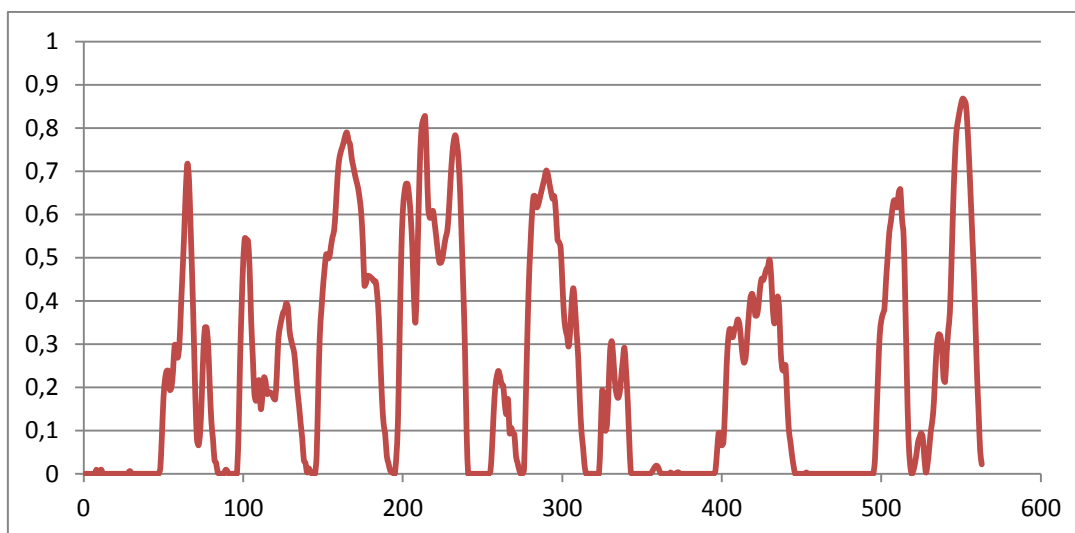


Figura 7-28 Experimento 6 gráfico de Potência Consumida (kW) x Tempo (s)

Potência Fornecida = 237,76 kW

Potência Consumida = 133,02 kW

$(\eta_{ene}) = 55,95\%$

Retirando 2% de perda da caixa de redução $(\eta_{ene}) = 54,83\%$

A tabela a seguir condensa os resultados obtidos nos experimentos apresentados anteriormente.

	Potência Fornecida	Potência Fornecida	η_{ene}
Experimento 1	656,06 kW	543,11 kW	81,12%
Experimento 2	969,95 kW	754,63 kW	76,24%
Experimento 3	1950,05 kW	1156,33 kW	58,12%
Experimento 4	82,81 kW	62,46 kW	73,92%
Experimento 5	126,76 kW	86,79 kW	67,10%
Experimento 6	237,76 kW	133,02 kW	54,83%

O capítulo a seguir apresenta as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

8. Conclusões

Os resultados encontrados nas simulações realizadas foram excelentes em termos de eficiência energética: no ciclo de estrada “EPA” conseguiu-se obter 82,32% de eficiência, e no ciclo urbano “NYCC” 79,52%. Um dos fatores que explicam esses resultados é a aplicação do controle de velocidade no sistema.

O experimento, apesar de não ter sido realizado de forma ótima devido à limitação dos equipamentos e softwares disponíveis, também apresentou bons resultados. O maior fator limitador deve-se ao experimento ter sido realizado em malha aberta, devido a limitações dos controladores disponíveis.

Analisando os experimentos 1 e 4, esses realizados com o menor valor de torque no dinamômetro, temos 81,12% de eficiência no ciclo “EPA” e 73,92% no ciclo “NYCC”. Estes resultados demonstram que, mesmo com o sistema em malha aberta, ele se mostra eficiente em torques relativamente baixos, com valores muito próximos dos encontrados nas simulações.

Quando é aplicado um torque intermediário no dinamômetro, a eficiência começa a baixar, porém ainda sendo relativamente alta. Os experimentos 2 e 5 demonstram esse comportamento, com 76,24% de eficiência no ciclo “EPA” e 67,10% no ciclo “NYCC”.

Nos experimentos 3 e 6, onde são aplicados torques elevados, a eficiência encontrada para veículos elétricos é baixa, resultado esse mais uma vez devido à malha aberta. Os dados de eficiência energética foram de 58,12% no ciclo “EPA” e 54,83% no ciclo “NYCC”. Porém, quando comparado a veículos convencionais de combustão interna com os mesmos ciclos, Zegarra [62] em seu experimento em dinamômetro encontrou 17,01% de eficiência no ciclo “EPA” e 12,64% no ciclo “NYCC”. Sendo assim, mesmo com o sistema em malha aberta e submetido a torques elevados, sua eficiência energética é muito superior à de um veículo

convencional com motor de combustão interna. O sistema se mostrou eficiente energeticamente e viável para sua implementação em um veículo.

As simulações do sistema de frenagem ABS elétrico também apresentaram resultados satisfatórios, realizando a frenagem do sistema sem que haja travamento das rodas do veículo, e em uma distância significativamente menor que sem o ABS. Uma sugestão como trabalho futuro seria a implementação experimental no sistema desenvolvido.

Como sugestão de trabalhos futuros, o primeiro ponto seria a realização dos experimentos mostrados neste trabalho em malha fechada e com o sistema de recuperação de energia, para que possam ser avaliados os ciclos de condução completos, com torque negativo e sem que ocorra o fenômeno de *Charge Pump*.

Após a realização dos experimentos com o sistema completo, outra sugestão é que se construa o sistema mecânico e o acople a um veículo. Podem-se realizar novamente os ciclos em um dinamômetro de rolo para comprovar os valores de eficiência energética encontrados.

Referências Bibliográficas

- [1] E. D. P. E. -. EPE, **Balço Energético Nacional**, Ministério de Minas e Energia, Rio de Janeiro, 2014.
- [2] I. E. Agency, **Energy Efficiency Indicators: Fundamentals on Statistics**, Paris: IEA PUBLICATIONS, 2014.
- [3] Denatran, **Anuário Frota de veículos**, Brasília-DF, 2014 Disponível em: <<http://www.denatran.gov.br/frota.htm>>.
- [4] USEPA, United States Environmental Protection Agency. AP-42: **Compilation of Air Pollutant Emission Factors**, Boston, 2010, Disponível em: <<http://www.epa.gov/otaq/ap42.htm>>.
- [5] E. U. E. I. Administration, **Crude Oil Price History Chart** , 2015, Disponível em:<<http://www.macrotrends.net/1369/crude-oil-price-history-chart>>.
- [6] S. P. S. e. R. S. K. Kobayashi, **Energy efficiency technologies for road**, *Energy efficiency technologies for road*, Springer, 2009, pp. v. 2, pp. 125-137..
- [7] M. N. Ralston, **Plug-in Electric Vehicles**, *Center for climate and energy solutions* , Arlington-VA, 2011.
- [8] Wikipédia, **Ányos Jedlik**, 2015, Disponível em: <http://en.wikipedia.org/wiki/%C3%81nyos_Jedlik>.
- [9] Wikipédia, **Robert Anderson**, 2013, Disponível em: <[http://en.wikipedia.org/wiki/Robert_Anderson_\(inventor\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Robert_Anderson_(inventor))>.
- [10] A. money, **History of Electric Vehicles**, 2015, Disponível em:<<http://inventors.about.com/od/estartinventions/a/History-Of-Electric-Vehicles.htm>>.
- [11] K. G. Hoyer, **The History of alternative Fuels in Transportation: The Case of Electric and Hybrid Cars**, *Utilities Policy*, v. 16., 2008.
- [12] B. P. M., **Engine**, Wikimedia Commons , 2015, Disponível em: <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Benz_Patent_Motorwagen_Engine.jpg#mediaviewer/File:Benz_Patent_Motorwagen_Engine.jpg>.

- [13] h. cars, **History of Hybrid Vehicles**, 2011, Disponível em: <<http://www.hybridcars.com/history-of-hybrid-vehicles/>>.
- [14] Wikipédia, **Ferdinand Porsche**, 2015, Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Ferdinand_Porsche>.
- [15] T. P. Museum, **The first Porsche in the world – the return of the P1**, 2014, Disponível em: <<http://press.porsche.com/news/release.php?id=842>>.
- [16] R. H. S. Cowan, **Escaping Lock-in: The Case of Electric Vehicle**, Technological Forecasting and Social Change, v. 53, pp. 61-79., 1996.
- [17] Wikipédia, **Le Jamais Contente**, 2014, Disponível em: <http://en.wikipedia.org/wiki/La_Jamais_Contente>.
- [18] J. S. J. D. Struben, **Transition Challenges for Alternative Fuel Vehicle and, Environment and Planning B: Planning and Design**, v. 35 n. 6, pp., 2006.
- [19] E. I. Administration, **Emissions of Greenhouse Gases in United States**, Washington - DC: EIA, 2009.
- [20] B. K. e. H. R. F. Sovacool, **Beyond Batteries: An Examination of the Benefits and Barriers to Plug-in Hybrid Electric Vehicles (PHEVs) and a Vehicle-to-grid (V2G) Transition**, Energy Policy v. 37 n. 3, pp. 1093-1103., 2008.
- [21] Toyota, **Prius**, 2015, Disponível em: <<http://www.toyota.com/prius/>>.
- [22] J. Klein, **Topline Strategy Group**, 2008.
- [23] chevrolet, **Volt**, 2015, Disponível em: <<http://www.chevrolet.com/volt-electric-car.html>>.
- [24] Nissan, **Leaf**, 2015, Disponível em: <<http://www.nissan.pt/PT/pt/vehicle/electric-vehicles/leaf.html>>.
- [25] Wikipédia, **Tesla Motors**, 2015, Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Tesla_Motors>.
- [26] Renault, **Zoe e twizy**, 2015, Disponível em: <<http://www.renault.pt/gama/veiculos-eletricos/>>.

- [27] Mercedes-Benz, **SLS AMG Coupé**, 2015, Disponível em: <http://www.mercedes-amg.com/webspecial/sls_e-drive/eng.php>.
- [28] H. L. L. B. MacLean, **Evaluating Automobile Fuel/Propulsion System**, Progress in Energy and Combustion Science, Volume 29, pp. 1-69., 2003.
- [29] G. P. P. S. Z. Fontaras, **Experimental evaluation of hybrid vehicle fuel economy and pollutant emissions over real-world simulation driving cycles**, Atmospheric Environment, v. 42, pp. 4023–4035., 2008.
- [30] D. Bank, **Electric Cars: Plugged In**. Deutsche Bank Securities, Inc., 2008.
- [31] E. Coalition, **Electrification Roadmap - Revolutionizing Transportation**, Washington, DC: and Achieving Energy Security. Electrification Coalition, 2009.
- [32] EPA, **Light-Duty Automotive Technology**, Carbon Dioxide Emissions, and Fuel Economy Trends: 1975 Through 2011, 2012.
- [33] J. B. A. e. K. K. Axsen, **Batteries for Plug-in Hybrid Electric Vehicles (PHEVs): Goals and the State of Technology circa 2008**, Davis, CA.: Institute of Transportation Studies, University of California, 2008.
- [34] P. Raksincharoensak, R. Matsumi e M. Nagai, **PREVENTING INTERSECTION COLLISION ACCIDENTS BY INTELLIGENT MOTION CONTROL OF IN-WHEEL-MOTOR ELECTRIC VEHICLES**, SAE Technical Paper 2011-39-7203, 2011.
- [35] W. Adams e A. E. Company, **Electric Motor**, Estados Unidos da América, n.º 300827, 1884.
- [36] A. Parcelle, **ELECTRIC-MOTOR TRACTION-WHEEL**, Florence Motor Company of Maine, nº 320690, 1889.
- [37] Michelin, **Active Wheel**, 2008, Disponível em: <<http://www.michelin.com/corporate/EN/news/article?articleID=N24524>>.
- [38] Siemens, **e-corner VDO**, 2007, Disponível em: <http://www.siemens.com/innovation/en/publikationen/publications_pof/pof_spring_2007/technology_for_the_environment/green_transpor

tation.htm>.

- [39] Bridgestone, **Dynamic-Damping In-wheel Motor Drive System**, 2015, Disponível em: < http://www.ingenuitysystems.com/files/In-Wheel_Motor.pdf >.
- [40] M. Motors, **MIEV**, 2005, Disponível em: < <http://www.mitsubishi-motors.com/en/corporate/pressrelease/corporate/detail1321.html> >.
- [41] Protean, **In-wheel motor technology**, 2015, Disponível em: < <http://www.proteanelectric.com/en/> >.
- [42] S. C. P. W. W. C. D, **Lyshevski, Advanced Hybrid-Electric Vehicle Propulsion Systems With Individual Wheel Brushless Traction Motors**, SAE Technical Paper 2000-01-3110, 2000.
- [43] S. Murata, **Vehicle Dynamics Innovation with In-Wheel Motor**, SAE Technical Paper 2011-39-7204, 2011.
- [44] Wikipedia, **Motor elétrico**, 2014, Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Motor_el%C3%A9trico >.
- [45] M. A. Meggiolaro, **Tutorial em Combate de Robôs**, Rio de Janeiro, 2006, Disponível em: <http://www.riobotz.com.br/tutorial_riobotz.pdf >.
- [46] LMC, **LEM 200-127**, 2015, Disponível em: <<http://lynchmotors.co.uk/pdfs/lmc-lem-200.pdf> >.
- [47] Wikipedia, **Motor DC Brushless**, 2014, Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Motor_de_corrente_cont%C3%ADnua_s em_escovas>.
- [48] U. o. M. Tennessee, **MTSU Wheel Hub Motor Retrofit Kit**, 2012, Disponível em: <<http://www.alt-energy.info/hybrid-electric-cars/turn-your-car-into-a-plug-in-hybrid/>>.
- [49] M.I.T., **Ultracaps Could Boors Hybrid Efficiency**, Technologic Review, 2009, Disponível em: <<http://www.technologyreview.com/news/414979/ultracaps-could-boost-hybrid-efficiency/>>.
- [50] M. r. r. N. K. A. a. M. n. s. I. Pottabattini naveen, **Kinetic Energy Recovery System**, International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 5, Issue 1, January-2014 1860, 2014.

- [51] C. Afonso, **Termodinâmica para Engenharia**, FEUP edições, 1 de out de 2012, 2012.
- [52] F. B. FERREIRA, **A EVOLUÇÃO AUTOMOBILÍSTICA E APLICAÇÃO DE SMART GRID PARA UTILIZAÇÃO DE ENERGIA RENOVÁVEL**, UNIVERSIDADE SÃO FRANCISCO, 2012.
- [53] H. D. Anderson M., **Unsprung Mass with In-Wheel Motors - Myths and Realities**, 2011.
- [54] D. J. K. M. J. Schalkwyk, **Effect of the Hub Motor Mass on Stability and Conforto f Electric Vehicles**, University of Stellenbosch, África do Sul, 2007.
- [55] M. J. B. P. B. S. P. Calle, **Dynamic Shock Absorber**, Worcester Massachusetts, U.S.A.: Worcester Polytechnic Institute, 2009.
- [56] R. N. Jazar, **Vehicle Dynamics:Theory and Applications**, Springer Science+Business Media, LLC, 2008.
- [57] K. Ogata, **Engenharia de Controle Moderno**, 5ª Ed. 2011.
- [58] mathworks, **MatLab**, 2015, Disponível em:
<<http://www.mathworks.com/help/simulink/modeling.htm>>.
- [59] Alltraxinc, **AXE 7245**, 2015, Disponível em:
<http://www.alltraxinc.com/Products_AXE.html >.
- [60] J. a. N. N. B. Ziegler, **Optimum settings for automatic controllers**, 1942.
- [61] H. a. B. E. Pacejka, **The Magic Formulae tire model**, Delft (WE): Proceedings 1st Int. Colloquium on Tire Models for Vehicle Dynamics Analysis, 1991.
- [62] F. Z. Sánchez, **Eficiência Energética de Veículos Elétricos Híbridos em Série**, Rio de Janeiro: Departamento de Engenharia Mecânica da PUC - RIO, 2012.
- [63] U. E. E. P. AGENCY, **Testing and Measuring Emissions**, 2010, Disponível em:
<<http://www.epa.gov/nvfel/testing/dynamometer.htm>>.
- [64] M. EHSANI, Y. GAO e A. EMADI, **Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles**, Press Taylor and Francis Group, 2009.

- [65] R. combat, **BATTLEPACK ULTRAPACKS BATTERY PACKS**, 2015, Disponível em:
<http://www.robotcombat.com/store_battlepacks.html>.
- [66] T. whyachi., **MS-2 Switch**, 2015, Disponível em:
<<http://www.teamwhyachi.com/ms1.htm>>.
- [67] N. Instruments, **NI USB-6008/6009**, 2015, Disponível em:
<<http://www.ni.com/pdf/manuals/371303m.pdf>>.
- [68] WEG, **Motor Trifásico com Gaiola Cat N 7,5 HP**, 2015, Disponível em: <http://ecatalog.weg.net/tec_cat/tech_motor_sel_web.asp#>.
- [69] W. INV, **WEG CFW-11**, 2015, Disponível em:
<<http://www.weg.net/br/Produtos-e-Servicos/Drives/Inversores-de-Frequencia/CFW11>>.