



Universidade de Brasília - UnB  
Faculdade UnB Gama - FGA  
Engenharia Automotiva

# **Análise da viabilidade de adaptação de motores elétricos nos cubos de rodas traseiros de veículos de passeio.**

Autor: João Paulo Moreira Bento  
Orientador: Prof. Dr. Henrique Gomes de Moura  
Coorientador: Prof. Saleh Barbosa Khalil

Brasília, DF  
2015





João Paulo Moreira Bento

**Análise da viabilidade de adaptação de motores elétricos  
nos cubos de rodas traseiros de veículos de passeio.**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Automotiva da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Automotiva.

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Prof. Dr. Henrique Gomes de Moura

Coorientador: Prof. Saleh Barbosa Khalil

Brasília, DF

2015

---

João Paulo Moreira Bento

Análise da viabilidade de adaptação de motores elétricos nos cubos de rodas traseiros de veículos de passeio./ João Paulo Moreira Bento. – Brasília, DF, 2015-86 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Henrique Gomes de Moura  
Coorientador: Prof. Saleh Barbosa Khalil

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB  
Faculdade UnB Gama - FGA , 2015.

1. motor elétrico, motor a combustão interna, cubos de rodas, baterias. 2. Veículo híbrido elétrico. I. Prof. Dr. Henrique Gomes de Moura. II. Prof. Saleh Barbosa Khalil. III. Universidade de Brasília. IV. Faculdade UnB Gama. V. Análise da viabilidade de adaptação de motores elétricos nos cubos de rodas traseiros de veículos de passeio.

CDU 00:000:000.0

---

João Paulo Moreira Bento

## **Análise da viabilidade de adaptação de motores elétricos nos cubos de rodas traseiros de veículos de passeio.**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Automotiva da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Automotiva.

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 02/07/2015:

---

**Prof. Dr. Henrique Gomes de Moura**  
Orientador

---

**Prof. Saleh Barbosa Khalil**  
Coorientador

---

**Prof. Dr. Rudi Henri Van Els**  
Convidado 1

---

**Prof. Dr. Evandro Leonardo Silva  
Teixeira**  
Convidado 2

Brasília, DF  
2015



# Agradecimentos

Agradeço primeiramente aos meus pais pela educação e por me ensinar que sempre devemos batalhar por aquilo que queremos. Aos meus orientadores Prof. Dr. Henrique Gomes de Moura e Prof. Saleh Barbosa Khalil por contribuírem significativamente em minha formação e por sempre me incentivar a buscar o conhecimento. Ao Prof. Dr. Evandro Leonardo Silva Teixeira por me auxiliar sempre que possível .

Agradeço ao programa Ciência sem Fronteiras que me proporcionou uma grande experiência acadêmica e pessoal.

Tenho que agradecer aos meus amigos de Itumbiara que estiveram ao meu lado nos bons e maus momentos, sempre que precisei.

Agradeço a minha namorada pelo incentivo, carinho e atenção.

E principalmente tenho que agradecer aos amigos que fiz ao longo deste curso de engenharia pois tenho certeza que hoje estou aqui por conta do apoio de vocês.



*“Os que se encantam com a prática sem a ciência  
são como os timoneiros que entram no navio sem timão nem bússola,  
Nunca tendo certeza do seu destino.”  
(Leonardo da Vinci)*



# Resumo

Veículos híbridos elétricos são veículos que utilizam dois sistemas de propulsão, o primeiro sistema tem como fonte de energia um combustível derivado do petróleo ou etanol e como conversor o motor a combustão interna e o segundo sistema tem como fonte de energia a energia elétrica e como conversor o motor elétrico. Este tipo de veículo visa utilizar o melhor de cada sistema fazendo com que o mesmo tenha um bom desempenho. Este trabalho tem como proposta a análise e viabilidade de conversão de um veículo de passeio convencional em um veículo híbrido de configuração em paralelo, onde serão implementados motores elétricos nos cubos das rodas traseiras, sendo assim nenhuma modificação será feita no sistema de propulsão original do veículo. Análises de custo, consumo e manutenção serão feitas ao final do trabalho, e assim será apresentado se a proposta de implementação de motores elétricos nos cubos das rodas traseiras é viável ou não.

**Palavras-chaves:** veículo híbrido elétrico. motor no cubo da roda. motor elétrico. petróleo. rodas traseiras.



# Abstract

Hybrid electric vehicles are vehicles that use two propulsion systems: the first system has a fuel derived from petroleum or ethanol as an energy source and an internal combustion engine as a converter. On the other hand, the second system has electrical energy as an energy source and an electric motor as a converter. This type of vehicle aims to use the best of each system in order to have a better performance compared with each one separately. This work proposes a conversion of a conventional vehicle in a hybrid one with a parallel configuration. The electric motors are implemented in the rear wheels hubs and, therefore, no modifications had been made to the original propulsion system. Cost, consumption and maintenance analysis had been done at the last section concerning the system feasibility.

**Keywords:** hybrid electric vehicles. hub motors. electric motor. petroleum. rear wheels.



# Lista de ilustrações

Figura 1 – O primeiro veículo elétrico produzido pela GM - EV1, retirado de (EDELSTEIN, 2013). . . . .	26
Figura 2 – <i>Semper Vivus</i> o primeiro veículo híbrido elétrico funcional da história (JANISSE; ENGELMAN, 2011). . . . .	30
Figura 3 – Modelo conceitual do trem de força de um veículo híbrido, adaptado de (EHSANI et al., 2005). . . . .	33
Figura 4 – Classificação dos VHE's, adaptado de (EHSANI et al., 2005). . . . .	35
Figura 5 – Configuração de um VHE em paralelo com dois eixos motrizes , adaptado de (EHSANI et al., 2005). . . . .	36
Figura 6 – Posição longitudinal do CG, adaptado de (NICOLAZZI; LEAL; ROSA, 2008). . . . .	38
Figura 7 – Posição vertical do CG, adaptado de (NICOLAZZI; LEAL; ROSA, 2008). . . . .	38
Figura 8 – Cargas nos eixos de um veículo em uma rampa, adaptado de (NICOLAZZI; LEAL; ROSA, 2008). . . . .	39
Figura 9 – Cargas em um veículo em movimento, adaptado de (NICOLAZZI; LEAL; ROSA, 2008). . . . .	40
Figura 10 – Componentes do trem de força de um veículo com tração traseira, adaptado de (JAZAR, 2009). . . . .	45
Figura 11 – Entrada e saída de torque e velocidade angular de cada componente do trem de força de um sistema de MCI, adaptado de (JAZAR, 2009). . . . .	45
Figura 12 – Pneu com raio $R_w$ rolando no chão e se movendo com velocidade $V_x$ e velocidade angular $\omega_w$ , adaptado de (JAZAR, 2009). . . . .	46
Figura 13 – Interfaces de potência para escolha de um motor para VHE, adaptado de (BOTTURA; BARRETO, 1989) . . . . .	48
Figura 14 – Comportamento da potência e torque pela velocidade de um ME, adaptado de (ZERAOUlia; BENBOUZID; DIALLO, 2006) . . . . .	50
Figura 15 – Principais baterias utilizadas nos VE's e VHE's, adaptado de (TIE; TAN, 2013). . . . .	52
Figura 16 – Ciclo de condução utilizado para os cálculos. . . . .	54
Figura 17 – Veículo utilizado para estudo, retirado de (WEB, 2015). . . . .	55
Figura 18 – Torque x Rotação. . . . .	56
Figura 19 – Potência x Rotação. . . . .	57
Figura 20 – Torque x Velocidade. . . . .	57
Figura 21 – Diagrama de blocos. . . . .	59
Figura 22 – Diagrama QFD. . . . .	60
Figura 23 – Ciclo de condução utilizado e a faixa de operação do ME. . . . .	62

Figura 24 – Azul: Variação da rotação da roda em todo ciclo de condução, Vermelho: Variação da rotação da roda na atuação do ME no ciclo de condução. . . . .	63
Figura 25 – Azul: Variação do torque exigido ao longo do ciclo de condução, Vermelho: Variação do torque exigido dos ME's ao longo do ciclo de condução. . . . .	64
Figura 26 – Curva de potência do ME (Quanshun - QSM XX). . . . .	65
Figura 27 – Motor Elétrico selecionado para equipar o sistema proposto (Quanshun - QSM XX). . . . .	65
Figura 28 – Desenho técnico do ME modelado em CATIA. . . . .	66
Figura 29 – Controlador do ME selecionado para equipar o sistema proposto (Kelly - KEB 72101). . . . .	67
Figura 30 – Azul: Variação da potência exigida ao longo do ciclo de condução, Vermelho: Variação da potência exigida dos ME's ao longo do ciclo de condução. . . . .	68
Figura 31 – Bateria selecionada para equipar o sistema proposto (SL60DD). . . . .	69
Figura 32 – Modelo CAD apresentando a parte traseira do veículo utilizado. . . . .	70
Figura 33 – Modelo CAD apresentando a proposta do VHE com ME nos cubos de rodas. . . . .	71
Figura 34 – Modelo CAD apresentando o eixo com o ME em destaque. . . . .	71
Figura 35 – Modelo CAD apresentando o sistema já com o banco de baterias. . . . .	72
Figura 36 – Esquerda: Eixo original, Direita: Eixo com o corte para fixação do ME. . . . .	77
Figura 37 – Variação da energia consumida pelos ME's ao longo do ciclo de condução. . . . .	79
Figura 38 – Cronograma de Trabalho. . . . .	81

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Tabela de dados do veículo utilizado, retirado de (S.A., 1996-1999). . . . .	55
Tabela 2 – Tabela de características do MCI, retirado de (S.A., 1996-1999). . . . .	58
Tabela 3 – Tabela de características do motor elétrico escolhido. . . . .	64
Tabela 4 – Especificações do controlador KEB72101. . . . .	67
Tabela 5 – Tabela de comparação das características das baterias pesquisadas. . . . .	69
Tabela 6 – Tabela de desempenho do veículo. . . . .	73
Tabela 7 – Tabela de características dos pneus e rodas originais, retirado de (S.A., 1996-1999). . . . .	78
Tabela 8 – Tabela de características dos novos pneus e rodas. . . . .	78
Tabela 9 – Tabela de comparação do consumo de etanol entre os veículos. . . . .	79
Tabela 10 – Tabela de custo dos componentes utilizados na implementação do sistema elétrico. . . . .	80



# Lista de abreviaturas e siglas

ABS	Antilock Brake System
AFR	Razão ar-combustível
CA	<i>Corrente alternada</i>
CAD	Computer-Aided Design
CC	<i>Corrente contínua</i>
CD	Compact Disk
CG	Centro de Gravidade
DOF	Degree of Freedom
FTP	Federal Test Procedure
GM	<i>General Motors</i>
MCI	Motor a combustão interna
ME	Motor elétrico
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
NBR	Norma Brasileira
NR	Norma Regulamentadora
PWM	Pulse Width Modulation
QFD	Quality Function Deployment
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
UDDS	Urban Dynamometer Driving Schedule
VHE	Veículo híbrido elétrico
$a_c$	Desaceleração média [ $m/s^2$ ]
$a_I$	Distância do CG ao eixo dianteiro [ $m$ ]
$a_{II}$	Distância do CG ao eixo traseiro [ $m$ ]

$a_{m\acute{a}x}^I$	Aceleração máxima para veiculo com tração dianteira [ $m/s^2$ ]
$a_{m\acute{a}x}^{II}$	Aceleração máxima para veiculo com tração traseira [ $m/s^2$ ]
$a_{m\acute{a}x}^m$	Aceleração máxima para veiculo com tração integral [ $m/s^2$ ]
$f$	Coefficiente de atrito de rolamento
$F_{cilindro}$	Força aplicada no cilindro mestre [ $N$ ]
$F_D$	Força aplicada no disco [ $N$ ]
$F_m$	Força motriz total [ $N$ ]
$F_{mI}$	Força motriz no eixo dianteiro [ $N$ ]
$F_{mII}$	Força motriz no eixo traseiro [ $N$ ]
$F_{mI}^{m\acute{a}x}$	Força motriz máxima em um veiculo com tração dianteira [ $N$ ]
$F_{mII}^{m\acute{a}x}$	Força motriz máxima em um veiculo com tração traseira [ $N$ ]
$F_m^{m\acute{a}x}$	Força motriz máxima em um veiculo com tração integral [ $N$ ]
$F_p$	Força aplicada na roda dianteira [ $N$ ]
$F_{pastilha}$	Força aplicada na pastilha [ $N$ ]
$g$	Aceleração gravitacional [ $m/s^2$ ]
$G$	Força peso total do veiculo [ $N=Kg \cdot m/s^2$ ]
$h$	Altura do CG [ $m$ ]
$l$	Distância do entre-eixos [ $m$ ]
$\dot{m}_a$	Taxa de fluxo de massa de ar [ $Kg/s$ ]
$\dot{m}_f$	Taxa de fluxo de massa de combustível queimado [ $Kg/s$ ]
$M_{fP}$	Momento aplicado no disco da roda dianteira [ $N$ ]
$M_{rP}$	Momento aplicado no disco da roda traseira [ $N$ ]
$n$	Número de cilindros
$N_c$	Número de ciclos mecânicos de operação por segundo
$n_i$	Relação de transmissão (1 <sup>a</sup> a 5 <sup>a</sup> marcha)
$n_d$	Relação do diferencial

$P$	Pressão de injeção de combustível [ $P_a$ ]
$P_{sistema}$	Pressão no sistema [ $Pa$ ]
$P_1$	Coefficiente da equação <i>Função de desempenho de potência</i> [ $W \cdot s$ ]
$P_2$	Coefficiente da equação <i>Função de desempenho de potência</i> [ $W \cdot s^2$ ]
$P_3$	Coefficiente da equação <i>Função de desempenho de potência</i> [ $W \cdot s^3$ ]
$P_w$	Potência na roda [ $W$ ]
$P_m$	Potência Máxima do Motor [ $W$ ]
$P_e$	Máxima potência possível de um MCI [ $W$ ]
$Q_s$	Resistência ao aclave [ $N$ ]
$Q_a$	Resistência aerodinâmica [ $N$ ]
$Q_r$	Resistência de rolamento total [ $N$ ]
$Q_{rI}$	Resistência ao rolamento do eixo dianteiro [ $N$ ]
$Q_{rII}$	Resistência ao rolamento do eixo traseiro [ $N$ ]
$Q_i$	Resistência de inércia [ $N$ ]
$R_a$	Constante dos gases ideais para o ar [ $J/Kg \cdot K$ ]
$R_{0I}$	Reação sobre o eixo dianteiro de um veículo no plano [ $N$ ]
$R_{0II}$	Reação sobre o eixo traseiro de um veículo no plano [ $N$ ]
$R'_I$	Reação vertical do eixo dianteiro medido com o carro na rampa [ $N$ ]
$R_I$	Reação sobre o eixo dianteiro de um veículo parado em aclave [ $N$ ]
$R_{II}$	Reação sobre o eixo traseiro de um veículo parado em aclave [ $N$ ]
$R_{Id}$	Reação sobre o eixo dianteiro de um veículo em movimento [ $N$ ]
$R_{II d}$	Reação sobre o eixo traseiro de um veículo em movimento [ $N$ ]
$R_{Irb}$	Reação sobre o eixo dianteiro de um veículo em rampa apontado para baixo [ $N$ ]
$R_{IIrb}$	Reação sobre o eixo traseiro de um veículo em rampa apontado para baixo [ $N$ ]

$R_{Irc}$	Reação sobre o eixo dianteiro de um veículo em rampa apontado para cima [ $N$ ]
$R_{IIrc}$	Reação sobre o eixo traseiro de um veículo em rampa apontado para cima [ $N$ ]
$R_{Itd}$	Reação sobre o eixo dianteiro de um veículo com tração dianteira [ $N$ ]
$R_{IItd}$	Reação sobre o eixo traseiro de um veículo com tração dianteira [ $N$ ]
$R_{Itr}$	Reação sobre o eixo dianteiro de um veículo com tração traseira [ $N$ ]
$R_{IItr}$	Reação sobre o eixo traseiro de um veículo com tração traseira [ $N$ ]
$R_w$	Raio efetivo do conjunto roda/pneu [ $m$ ]
$\tan \alpha \left _{máx}^I\right.$	Aclive máximo para veículo com tração dianteira
$\tan \alpha \left _{máx}^{II}\right.$	Aclive máximo para veículo com tração traseira
$\tan \alpha \left _{máx}^m\right.$	Aclive máximo para veículo com tração integral
T	Temperatura [ $K$ ]
$T_e$	Torque de condução [ $N \cdot m$ ]
$T_m$	Torque Máximo do motor [ $N \cdot m$ ]
$T_w$	Torque na roda [ $N \cdot m$ ]
$V_s$	Cilindrada do motor [ $cm^3$ ]
$V_x$	Velocidade para frente na roda [ $m/s$ ]
W	Peso máximo do veículo [ $N$ ]
$W_f$	Transferência de carga dinâmica para o eixo dianteiro [ $N$ ]
$W_{fs}$	Peso sobre o eixo dianteiro [ $N$ ]
$W_r$	Transferência de carga dinâmica resultante no eixo traseiro [ $N$ ]
$W_{rs}$	Peso sobre o eixo traseiro [ $N$ ]
$x$	Parcela de carga sobre o eixo traseiro
$\alpha$	Aclive da pista [ $graus$ ]
$\alpha_{máxrc}$	Aclive máximo da pista para veículo apontado para cima [ $graus$ ]
$\alpha_{máxrb}$	Aclive máximo da pista para veículo apontado para baixo [ $graus$ ]

$\delta$	Inércia de translação equivalente a de rotação
$\Delta G_{td}$	Transferência de carga de um veículo com tração dianteira [ $N$ ]
$\Delta G_{tt}$	Transferência de carga de um veículo com tração traseira [ $N$ ]
$\eta$	Eficiência global do sistema de transmissão
$\eta_v$	Eficiência volumétrica do MCI
$\mu$	Coefficiente de atrito entre pneu e pista
$\mu_{freio}$	Coefficiente de atrito entre as pastilhas e o disco
$\omega_m$	Máxima velocidade angular quando se tem máxima potência [ $rad/s$ ]
$\omega_e$	Máxima velocidade angular quando se atinge o torque máximo [ $rad/s$ ]
$Ah$	<i>Ampere-hora</i>
$CV$	<i>Cavalo Vapor</i>
$HP$	<i>Horse Power</i>
$J/Kg \cdot K$	<i>Joule/quilograma·kelvin</i>
$K$	<i>kelvin</i>
$Kg/s$	<i>Quilogramas/segundo</i>
$Km/h$	<i>Quilômetros/hora</i>
$KW/Kg$	<i>Kilo Watt/Kilogramo</i>
$m$	<i>metro</i>
$cm^3$	<i>centímetro ao cubo</i>
$mm$	<i>milímetro</i>
$mm^2$	<i>milímetro ao quadrado</i>
$m/s$	<i>metros/segundo</i>
$m/s^2$	<i>metros/segundo ao quadrado</i>
$MPH$	<i>Milha por hora</i>
$N$	<i>Newton</i>
$N \cdot m$	<i>Newton·metro</i>

$P_a$	<i>Pascal</i>
$pol$	<i>polegada</i>
$rad/s$	<i>radianos/segundo</i>
$RPM$	<i>rotações por minuto</i>
$V$	<i>Volt</i>
$W$	<i>Watt</i>
$W \cdot s$	<i>Watt·segundo</i>
$W \cdot s^2$	<i>Watt·segundo ao quadrado</i>
$W \cdot s^3$	<i>Watt·segundo ao cubo</i>
$Wh$	<i>Watt-hora</i>

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>25</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos</b>	<b>26</b>
1.1.1	Objetivos Específicos	27
<b>1.2</b>	<b>Estrutura do trabalho</b>	<b>27</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>29</b>
<b>2.1</b>	<b>História dos veículos híbridos</b>	<b>29</b>
<b>2.2</b>	<b>Arquitetura do sistema e teorias</b>	<b>31</b>
2.2.1	Veículos híbridos elétricos	32
2.2.2	Arquitetura dos trens de força de um veículo híbrido elétrico	32
<b>2.3</b>	<b>Dinâmica do veículo</b>	<b>37</b>
2.3.1	Distribuição de Forças e Modelagem do desempenho do veículo	37
2.3.2	Dinâmica da linha propulsora	43
<b>2.4</b>	<b>Motor Elétrico</b>	<b>47</b>
<b>2.5</b>	<b>Acionamento do Motor Elétrico</b>	<b>50</b>
<b>2.6</b>	<b>Baterias e Ultracapacitores</b>	<b>51</b>
<b>2.7</b>	<b>Ciclos de Condução</b>	<b>53</b>
<b>3</b>	<b>ESTUDO DE CASO</b>	<b>55</b>
<b>3.1</b>	<b>Veículo a Ser Utilizado</b>	<b>55</b>
<b>3.2</b>	<b>Parâmetros a Serem Testados</b>	<b>58</b>
<b>4</b>	<b>SISTEMA PROPOSTO</b>	<b>59</b>
<b>4.1</b>	<b>Diagrama de Blocos</b>	<b>59</b>
<b>4.2</b>	<b>Funcionamento do Sistema</b>	<b>60</b>
<b>4.3</b>	<b>Ciclo de Condução utilizado</b>	<b>62</b>
<b>4.4</b>	<b>Motor Elétrico e seu Controlador</b>	<b>62</b>
<b>4.5</b>	<b>Dimensionamento do Banco de Baterias</b>	<b>67</b>
<b>4.6</b>	<b>Modelo CAD</b>	<b>70</b>
<b>4.7</b>	<b>Manutenção</b>	<b>70</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>73</b>
<b>5.1</b>	<b>Modificações feitas</b>	<b>74</b>
5.1.1	Freios traseiros	74
5.1.2	Molas traseiras	76
5.1.3	Eixo traseiro	77

5.1.4	Rodas e pneus . . . . .	77
5.2	<b>Consumo MCI . . . . .</b>	<b>78</b>
5.3	<b>Consumo ME . . . . .</b>	<b>78</b>
5.4	<b>Comparação entre os consumos do MCI e ME . . . . .</b>	<b>79</b>
5.5	<b>Custos de aplicação do sistema híbrido . . . . .</b>	<b>80</b>
5.6	<b>Cronograma de Trabalho . . . . .</b>	<b>80</b>
6	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS . . . . .</b>	<b>83</b>
	<b>Referências . . . . .</b>	<b>85</b>

# 1 Introdução

O Brasil têm uma imensa frota de veículos automotores distribuídos em 21 categorias que são: automóvel, bonde, caminhão, caminhão-trator, caminhonete, camioneta, chassi plataforma, ciclomotor, microônibus, motocicleta, motoneta, ônibus, quadriciclo, reboque, semi-reboque, side-car, outros, trator-esteira, trator-rodas, triciclo e utilitário. De acordo com os dados de Agosto de 2014 que foram retirados do (DENATRAN, 2014), atualmente a frota de veículos que circulam no Brasil é de quase 85 milhões, houve um crescimento de aproximadamente 6,5% se comparada com os dados de Agosto de 2013. Destes 85 milhões de veículos, cerca de apenas 0,01% são veículos híbridos e elétricos.

Estes veículos em sua grande maioria utilizam principalmente como combustível os derivados de petróleo, e são responsáveis por grande parte das emissões de poluentes como monóxido de carbono, óxido de nitrogênio, hidrocarbonetos, entre outros que são prejudiciais para a saúde e afetam diretamente as mudanças climáticas que estamos vivenciando. A temperatura média global poderá aumentar entre 0,6 a 2,5°C nos próximos cinco anos e de 1,4 a 5,8°C até o próximo século. Visando reduzir essa transformação climática, com consequências drásticas ao meio ambiente e ao homem, essas emissões de gases poluentes devem ser reduzidas (PEREIRA, 2007). Pensando nesses fatores, é imprescindível então desenvolver veículos menos poluentes, mais eficientes e que possam utilizar fontes de energia renovável.

Os veículos elétricos e os veículos híbridos são alternativas reais que tem cada dia mais aceitação dos consumidores. O primeiro veículo elétrico foi construído pelo francês *Gustave Trouvé* em 1881 (EHSANI et al., 2005). Era um triciclo que utilizava um motor *DC* e era alimentado por baterias chumbo-ácido. O veículo e o passageiro juntos pesavam aproximadamente 160Kg. Nos 20 anos seguintes o interesse neste tipo de veículo aumentou, e foi a partir desta época que o veículos que utilizavam motor a combustão interna começaram a competir com os veículos elétricos. Desde então o aprimoramento dos veículos com MCI foi crescente o que resultou em motores com maior potência e maior autonomia se comparado com os veículos elétricos, fazendo com que os veículos elétricos comessem a desaparecer. Somente nos anos 70 a preocupação com o meio ambiente reiniciou as pesquisas sobre os veículo elétricos, porém mesmo com os avanços tecnológicos feitos sobre as baterias e a eletrônica, a autonomia e desempenho ainda eram um empecilho (EHSANI et al., 2005).

Em 1996, foi lançado um veículo elétrico que poderia mudar este cenário e colocar novamente os veículos elétricos nas ruas. A *General Motors* lançou o *EV1*, este veículo possuía um motor elétrico de aproximadamente 137CV, que era alimentado por baterias

de chumbo-ácido, possuía autonomia de 90 a 150Km dependendo do seu uso, com desempenho de 0 a 100Km/h era próximo de 9 segundos, e a velocidade máxima era limitada em 130Km/h, carregava somente o motorista e um passageiro, trazia de série trio elétrico, ar-condicionado, CD player, ABS, controle de tração, e air bags dianteiros, todos de funcionamento 100% elétrico. Possuía o sistema de frenagem regenerativa e não emitia poluentes (EDELSTEIN, 2013). Em 2003 a *General Motors* retirou todos os carros que eram cedidos via *leasing* do mercado e a grande maioria destes veículos foram destruídos. Há controvérsias sobre a verdadeira causa deste acontecimento, segundo a montadora não havia como garantir peças sobressalentes e assistência técnica, mas de acordo com o documentário de (PAINÉ, 2006) há dúvidas se não foram feitas conspirações formada por montadoras e companhias petrolíferas contra o carro elétrico.

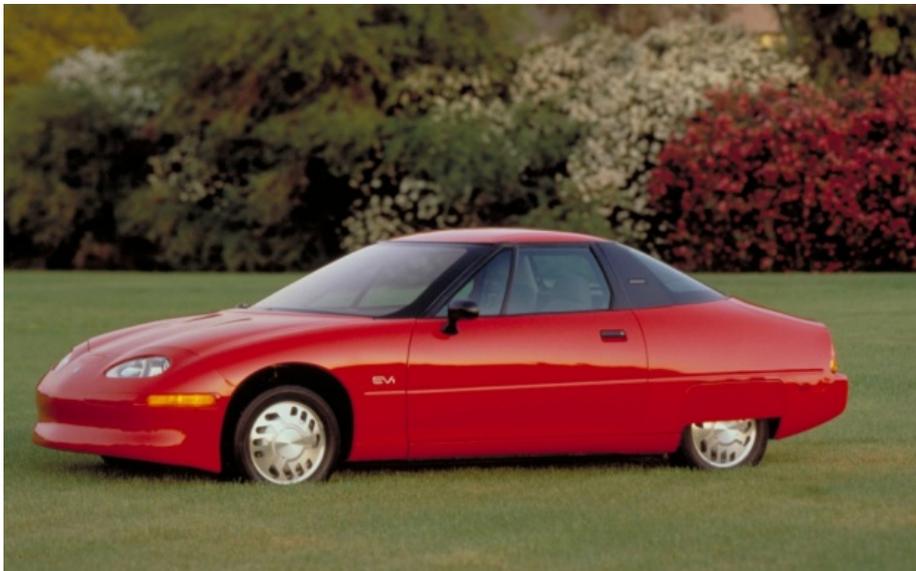


Figura 1 – O primeiro veículo elétrico produzido pela GM - EV1, retirado de (EDELSTEIN, 2013).

O preço médio da gasolina em Brasília em 2003 era R\$ 2,09 hoje após o aumento anunciado pela *Petrobrás* no último dia 06/11/14 a gasolina passou a ter um valor médio de aproximadamente R\$ 3,24. Isso representa que em 11 anos a gasolina teve um aumento de 64,5%. A preocupação com o meio ambiente, os altos valores do preço dos combustíveis, estão impulsionando o desenvolvimento de tecnologias favoráveis aos veículos híbridos e elétricos.

## 1.1 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo apresentar um estudo teórico da implementação de motores elétricos nos cubos das rodas traseiras de veículos de passeio, e estes serão utilizados para iniciar o movimento do veículo. Para este estudo será proposto au-

mentar o mínimo possível da massa do veículo, pois quanto maior a massa, maior gasto com energia será necessário, comparações entre o consumo do veículo somente com o MCI e do veículo com o sistema híbrido e a comparação entre os custos relacionados a manutenção e aplicação do sistema proposto.

### 1.1.1 Objetivos Específicos

Ao final deste trabalho têm-se como proposta concluir os seguintes objetivos específicos:

- cálculos da dinâmica do veículo;
- cálculos sobre as curvas do motor;
- cálculos sobre o gasto de combustível (etanol);
- seleção do ME;
- seleção do controlador do ME;
- projeto do banco de baterias;
- expor quais mudanças dos componentes do veículo serão necessárias para a conversão do mesmo;
- cálculo dos custos de aplicação e manutenção;
- cálculo do consumo do ME;
- comparação entre os consumos;

## 1.2 Estrutura do trabalho

De modo a facilitar o entendimento deste trabalho, será apresentado uma breve descrição dos capítulos posteriores.

O capítulo 2 introduz uma breve revisão sobre a história dos veículos híbridos e a respeito dos principais conceitos utilizados para o desenvolvimento deste trabalho, como a arquitetura dos trens de força utilizados pelos VHE's, onde será exposto os principais tipos utilizados e suas características, sobre a dinâmica do veículo fazendo referência a distribuição de forças em um automóvel e a dinâmica da linha propulsora, uma breve apresentação sobre os componentes elétricos utilizados na conversão para um VHE (ME, controlador do ME, baterias e ultracapacitores) e também será relatado sobre os ciclos de condução.

O capítulo 3 vem com o escopo de apresentar algumas características do veículo utilizado, quais parâmetros serão simulados, os elementos que serão utilizados nesta implementação.

O capítulo 4 tem como propósito descrever com detalhes o sistema que está sendo proposto e ao final deste capítulo é divulgado o modelo final do CAD do sistema proposto já com todas as modificações necessárias ao veículo.

O capítulo 5 mostra as comparações feitas a respeito dos consumos de ambos os motores e exibe o cronograma de trabalho adotado para a realização deste projeto.

E finalizando com o capítulo 6 é elucidado as conclusões e os trabalhos futuros propostos.

## 2 Revisão Bibliográfica

### 2.1 História dos veículos híbridos

Surpreendentemente, o conceito do veículo híbrido elétrico é quase tão antigo quanto o próprio automóvel. O objetivo principal, no entanto não foi para baixar o consumo de combustível, mas sim para auxiliar o motor de combustão interna para fornecer um aceitável nível de desempenho. De fato, no início, a engenharia do MCI era menos avançada que a engenharia do motor elétrico ([EHSANI et al., 2005](#)).

Os primeiros protótipos de veículos híbridos relatados foram apresentados no Salão de Paris de 1899. Eles foram construídos pelos *Estabelecimentos Pieper de Liège*, da Bélgica e pela companhia *Vendovelli and Priestly Electric Carriage*, da França. O protótipo da *Pieper* era um veículo de configuração híbrida paralela, com um pequeno motor a gasolina refrigerado a ar e este era auxiliado por um ME que era alimentado por baterias de chumbo-ácido. Foi relatado que as baterias eram carregadas pelo MCI quando o veículo estava em ponto morto ou parado. Quando a potência de acionamento necessária era maior do que a potência fornecida pelo MCI, o ME fornecia esta potência adicional. Além de ser um dos dois primeiros veículos híbridos, sendo o primeiro veículo híbrido com a configuração em paralela, o *Pieper* foi sem dúvidas o primeiro a ter o arranque elétrico. O outro veículo híbrido introduzido no Salão de Paris de 1899 foi o primeiro veículo híbrido elétrico de configuração em série e foi derivado de um veículo elétrico puro comercialmente construído pela empresa francesa *Vendovelli and Priestly*. Este veículo era um triciclo, com as duas rodas traseiras alimentadas por motores independentes. No caso do veículo francês, o projeto da hibridização foi utilizado para ampliar a distância percorrida pelo veículo elétrico e não para fornecer potência adicional a um MCI menos potente ([WAKEFIELD, 1998](#)).

Em 1900 o professor, Ferdinand Porsche revelou seu *Lohner Porsche*, um veículo elétrico que possuía os MEs nos cubos das rodas dianteiras. Logo depois, o carro apresentava os MEs em todas as rodas e também freio nas 4 rodas, este foi primeiro veículo no mundo a ter este sistema. Um dos destaques de seus primeiros anos como projetista automotivo foi o *Lohner – Porsche Semper Vivus* que entrou para a história como sendo o primeiro veículo híbrido funcional feito a 114 anos atrás ([JANISSE; ENGELMAN, 2011](#)).

O francês *Camille Jenatzy* apresentou um veículo híbrido em paralelo no Salão de Paris de 1903. Este veículo tinha uma combinação de um MCI a gasolina de 6 HP com um ME de 14 HP que poderia ou carregar as baterias do motor ou auxiliá-lo depois. Outro francês *H.Krieger*, construiu o segundo veículo híbrido elétrico em série que se tem



Figura 2 – *Semper Vivus* o primeiro veículo híbrido elétrico funcional da história (JANNISSE; ENGELMAN, 2011).

notícias em 1902. Seu projeto usou dois ME's CC independentes nas rodas dianteiras. Eles eram alimentados a partir de 44 células de chumbo-ácido, que eram recarregadas por um motor de ignição por centelha, a álcool de 4.5 HP acoplado a um gerador CC (EHSANI et al., 2005).

Os primeiros veículos híbridos foram construídos utilizando MCI de potência reduzida para auxiliar ou para melhorar a gama dos VE's. Eles fizeram uso das tecnologias elétricas básicas que estavam então disponíveis. Apesar da grande criatividade que presidiu na sua concepção, após a primeira guerra mundial os MCI melhoraram muito, e então os primeiros veículos híbridos já não podiam mais competir com estes motores. Os MCI receberam enormes melhorias em termos de potência, os motores se tornaram menores e mais eficientes, e não havia mais a necessidade de ajudá-los com os motores elétricos. O custo adicional de ter um motor elétrico e os riscos associados com as baterias ácidas foram fatores-chave no desaparecimento de veículos híbridos do mercado após a primeira guerra mundial. O maior problema que esses primeiros projetos tiveram que lidar foi a dificuldade de controlar o ME. A eletrônica de potência não se tornou disponível até meados dos anos 1960 e no início os motores elétricos eram controlados por interruptores mecânicos e resistores. Eles tinham um raio de ação limitado que era incompatível com uma operação eficiente (EHSANI et al., 2005).

O projeto do veículo híbrido em série foi revivido pelo *Dr. Ernest H. Wakefield* em 1967, quando trabalhava para *Linear Alpha Inc.*. O *Dr. Victor Wouk* é reconhecido como o moderno pesquisador do movimento do veículo híbrido elétrico. Em 1975, junto com seus colegas, ele construiu uma versão híbrida de um *Buick Skylark*. O motor era um motor rotativo da Mazda, acoplado a uma transmissão manual. Ele era auxiliado por um ME DC de 15 HP, localizado na frente da transmissão. Oito baterias automotivas de 12 V foram utilizadas para armazenamento de energia. Uma velocidade máxima de 80 MPH (129Km/h) foi obtida (WAKEFIELD, 1998).

Apesar das duas crises de petróleo em 1973 e em 1977, e das crescentes preocupações ambientais, nenhum VHE chegou ao mercado. O foco dos pesquisadores foi atraído pelos VE's, dos quais muitos protótipos foram construídos na década de 1980. A falta de interesse nos VHE's, durante este período pode ser atribuída à falta de eletrônica de potência, de modernos motores elétricos e tecnologias de baterias. A década de 1980 testemunhou uma redução no tamanho dos veículos convencionais movidos a MCI, a introdução de conversores catalíticos, e a generalização da injeção de combustível (EHSANI et al., 2005).

O conceito de veículo híbrido elétrico atraiu grande interesse durante a década de 1990, quando ficou claro que os VE's dificilmente iriam atingir o objetivo de poupar energia. A *Ford Motor Corporation* iniciou o desafio *Ford Hybrid Electric Vehicle*, que reuniu esforços de universidades para o desenvolvimento de versões híbridas para a produção de carros (EHSANI et al., 2005). Os fabricantes de automóveis de todo o mundo construíram protótipos que obtiveram enormes melhorias na economia de combustível comparadas aos seus respectivos sistemas que tinha apenas o MCI como sistema de propulsão. O esforço mais significativo no desenvolvimento e comercialização dos VHE's foi feito pelos fabricantes japoneses. Em 1997, a *Toyota* lançou o *Prius sedan* no Japão. A *Honda* também lançou o *Insight* e o *Civic híbrido*. O *Toyota Prius* e o *Honda Insight* tem um valor histórico, pois eles foram os primeiros VHEs comercializados na era moderna para responder ao problema do consumo de combustível de veículos pessoais.

## 2.2 Arquitetura do sistema e teorias

O Comitê técnico 69 de veículos elétricos de estrada da Comissão Eletrotécnica Internacional propõe que um veículo rodoviário híbrido é aquele em que a energia de propulsão durante missões operacionais especificadas é disponível a partir de duas ou mais espécies ou tipos de armazenamento de energia, fontes ou conversores, dos quais pelo menos um armazenador ou conversor deve estar a bordo (HUSAIN, 2005).

Basicamente, para qualquer trem de força de um veículo é necessário:

- desenvolver potência suficiente para atender as demandas de desempenho do veículo;
- carregar a energia suficiente a bordo para apoiar a condução do veículo no intervalo dado;
- demonstrar alta eficiência (baixo consumo de combustível em uma certa faixa de trabalho);
- emitir poucos poluentes ambientais;

Em termos gerais, o veículo pode ter mais do que uma fonte de energia e um

conversor de energia. O veículo que possui duas ou mais fontes de energia e conversores de energia são chamados de veículos híbridos. Um veículo híbrido com um sistema de propulsão elétrico (fonte de energia e conversor de energia) é chamado de Veículo Híbrido Elétrico (VHE). Geralmente são utilizados como conversores de energia nestes veículos o MCI e o ME. As fontes de energia para um sistema de MCI podem ser: a gasolina, o etanol ou o diesel, e as fontes de energia para um sistema de ME podem ser: as células a combustível de hidrogênio, as baterias ou os ultracapacitores (EHSANI et al., 2005).

### 2.2.1 Veículos híbridos elétricos

Os veículos convencionais com MCI fornecem um bom desempenho e uma longa faixa de operação utilizando as vantagens da alta densidade-energética dos combustíveis derivados do petróleo. Entretanto, os veículos com MCI tem uma série de desvantagens entre elas está sua baixa economia de combustível e a poluição ambiental. Os veículos elétricos movidos a bateria, por outro lado possuem algumas vantagens sobre os veículos convencionais com MCI, tais como elevada eficiência energética e a baixa poluição ambiental. Apesar disso, quanto ao desempenho, especialmente na faixa de operação por carga das baterias, é muito menos competitivo que os veículos com MCI, devido ao índice de energia das baterias ser menor que o índice de energia da gasolina. (EHSANI et al., 2005).

O VHE é um veículo no qual pelo menos uma das fontes de energia ou um dos conversores pode fornecer energia elétrica (HUSAIN, 2005). Visando então unir as vantagens dos dois sistemas de propulsão criou-se os VHE's, que utilizam duas fontes de energia – um fonte de energia primária (combustível) e uma fonte de energia secundária (eletricidade) – que vão alimentar os dois sistemas de propulsão.

### 2.2.2 Arquitetura dos trens de força de um veículo híbrido elétrico

A arquitetura de um VHE pode ser brevemente descrita como a ligação entre os componentes que definem os percursos de fluxo de energia e as portas de controle. A Figura 3 ilustra conceitualmente as possíveis formas de funcionamento do trem de força de um VHE.

No caso, utiliza-se como trem de força 1 um sistema com MCI e como trem de força 2 um sistema com ME. A seguir será apresentado uma breve descrição de cada modo de operação do VHE (EHSANI et al., 2005).

- O trem de força 1 fornecerá sozinho potência para a carga. Pode ser utilizado quando as baterias estão quase sem carga e o MCI não tem potência suficiente para recarregar as baterias, ou quando as baterias foram totalmente carregadas e o MCI é capaz de fornecer potência suficiente para atender a demanda de potência do veículo.

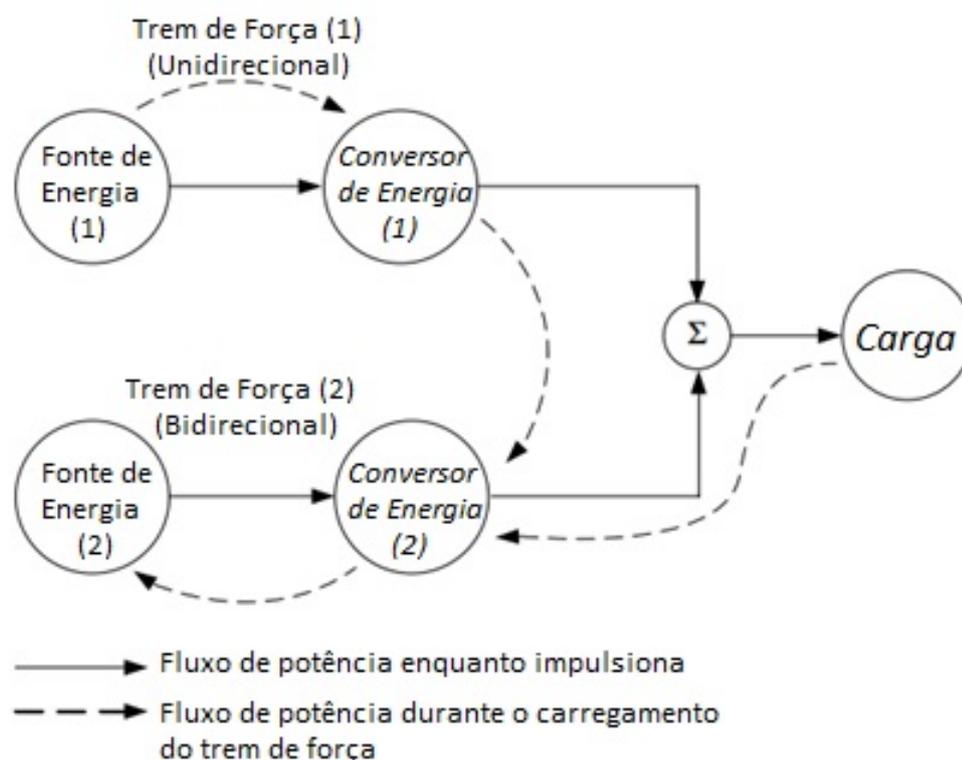


Figura 3 – Modelo conceitual do trem de força de um veículo híbrido, adaptado de (EHSANI et al., 2005).

- O trem de força 2 fornecerá sozinho potência para a carga. Este modo pode ser utilizado em situações quando o MCI não pode operar de forma eficaz, tais como em velocidades baixas, ou em áreas onde as emissões são estritamente proibidas.

- Ambos os trens de força 1 e 2 fornecerão potência para a carga. É utilizado quando o veículo necessita de uma grande quantidade de potência, como durante uma forte aceleração ou subidas íngremes.

- O trem de força 2 obterá potência da própria carga através do freio regenerativo. Neste modo parte da energia cinética que seria convertida em energia térmica durante a frenagem será transformada em energia elétrica pelos ME's que neste modo trabalham como geradores. A energia recuperada é armazenada nas baterias e reutilizada posteriormente.

- O trem de força 2 obterá potência do trem de força 1. O MCI carrega as baterias enquanto o veículo está em repouso ou descendo uma ladeira, no qual nenhuma potência é requerida pela carga.

- O trem de força 2 obterá potência do trem de força 1 e da carga ao mesmo tempo. Modo no qual o freio regenerativo e o MCI recarregam as baterias simultaneamente.

- O trem de força 1 forneceu potência para a carga e para o trem de força 2 ao mesmo tempo. Neste modo o MCI impulsiona o veículo e recarrega as baterias simultaneamente.

- O trem de força 1 fornecerá potência para o trem de força 2 e este fornecerá potência para a carga. Modo no qual o MCI fornece potência para as baterias, e as mesmas fornecem potência para a carga.

- O trem de força 1 fornecerá potência para a carga e a carga fornecerá potência para o trem de força 2. Neste modo a potência flui para as baterias a partir do MCI através carga. Uma típica configuração deste modelo são dois trens de força construídos separadamente nos eixos dianteiro e traseiro do VHE.

A grande variedade nos modos de operação de um VHE criaram uma grande flexibilidade sobre um veículo de um único trem de força. Com uma configuração e controle adequados, aplicando um específico modo para cada condição de operação pode-se aperfeiçoar o desempenho global, a eficiência e as emissões de gases poluentes. Todavia, em um projeto prático decidir qual modo deve ser aplicado, deve-se levar em conta diversos fatores, tais como a configuração física do trem de força, a eficiência do trem de força, etc. Operar cada trem de força em sua região de máxima eficiência é essencial para a eficiência global do veículo (EHSANI et al., 2005).

Atualmente os VHE's são classificados em quatro tipos principais: série, paralelo, série-paralelo, complexo. Na Figura 4 o tanque de combustível do MCI e as baterias do ME são mostradas como fontes primárias e secundárias de energia respectivamente (EHSANI et al., 2005).

Nos VHEs com a arquitetura em série, o motor de tração será sempre o ME. O que vale ressaltar é que a energia necessária para acionar este motor é o resultado da combinação de duas ou mais fontes de energia independentes. Um reservatório de combustível (gasolina/etanol ou diesel) é utilizado para armazenar a energia química, e esta aciona o sistema de geração de energia elétrica, composto por um MCI que aciona o gerador elétrico. A energia elétrica produzida por este sistema de geração pode seguir dois caminhos distintos - ir diretamente para alimentar o controlador do ME que o aciona ou ir diretamente para as baterias a bordo, recarregando as mesmas (SÁNCHEZ, 2012). O veículo pode ter um modo de funcionamento em que só o MCI fornece energia para o ME ou somente as baterias fornecem energia para o ME. Quando uma alta demanda de potência é necessária, utiliza-se as baterias e o MCI para fornecer a potência requerida pelo ME. O MCI pode ainda fornecer potência ao ME e recarregar as baterias ao mesmo tempo. Vale ressaltar que os freios regenerativos também auxiliam no recarregamento das baterias, a partir do momento que o freio é acionado o ME opera como um gerador e envia a potência gerada para as baterias (EHSANI et al., 2005).

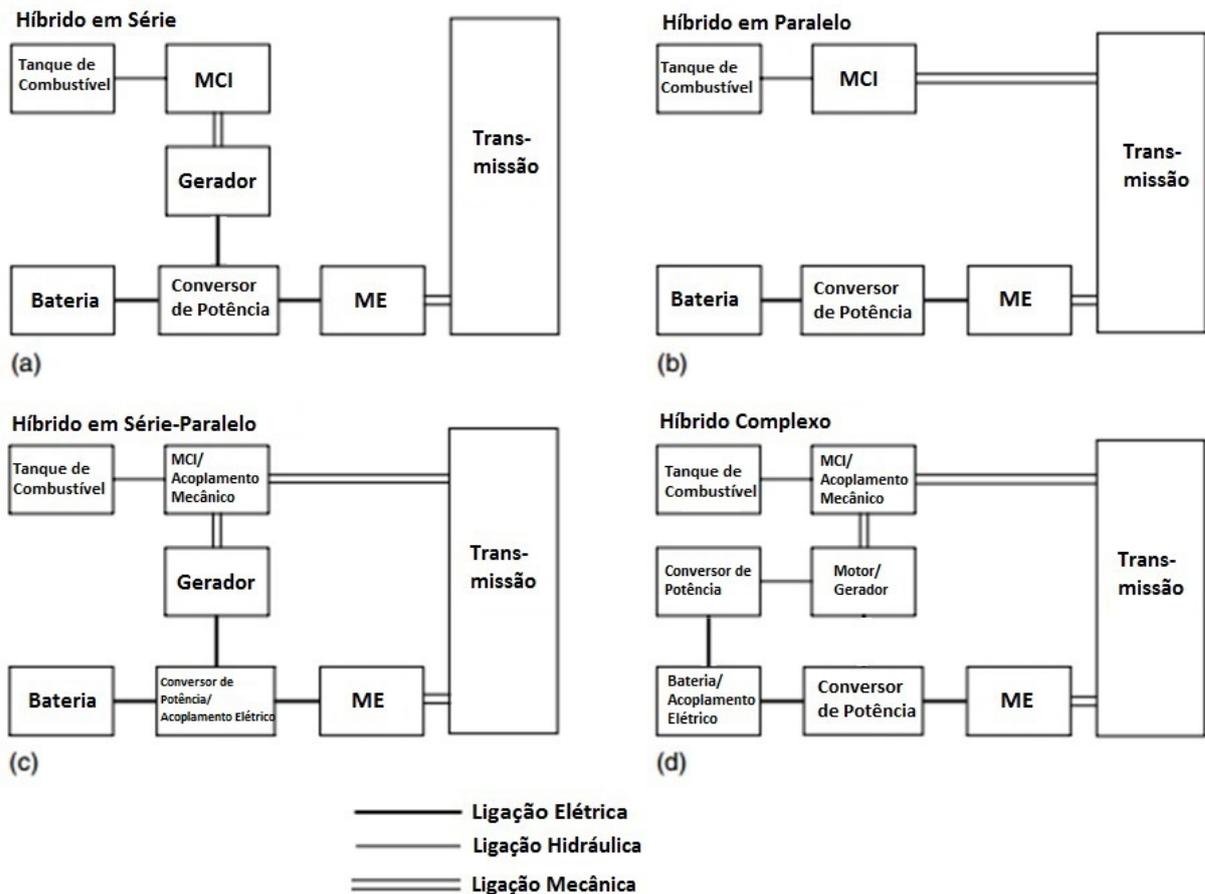


Figura 4 – Classificação dos VHE's, adaptado de (EHSANI et al., 2005).

Nos VHE's com arquitetura em paralelo, o MCI e o ME atuam de forma conjunta através de acoplamentos mecânicos, com a finalidade de tracionar o veículo. Tanto o motor elétrico como o MCI podem ser desconectados do acoplamento, o que dá a possibilidade de tracionar o veículo usando apenas o ME ou o MCI. Nos VHEs em paralelo também é possível inverter o fluxo de potência fazendo com que o ME de tração passe a operar como gerador. Deste modo, o conjunto de baterias poderá ser recarregado a partir do MCI (SáNCHEZ, 2012). Os freios regenerativos também auxiliam no carregamento das baterias, a partir do momento que o freio é acionado o ME opera como um gerador e fornece a potência gerada para as baterias. A combinação mecânica do MCI e a potência do ME deixam espaço para variadas configurações diferentes como é mostrado por (EHSANI et al., 2005), mas que não serão detalhadas neste trabalho.

A configuração em paralelo que será aprofundada é a de quando os VHE's em paralelo tem dois eixos propulsores. Este sistema foi escolhido pois a idéia do trabalho é não modificar tanto o veículo tornando a implementação mais acessível. Em um eixo o MCI fornece a potência necessária e no outro o ME fornece a potência necessária para impulsionar o veículo, como é apresentado na Figura 5. Os esforços de tração dos dois trens de força são adicionados através do chassi e da estrada. Este tipo de arquitetura

oferece algumas vantagens sobre o veículo convencional, ele mantém o MCI e a transmissão originais e inalterados, apenas adiciona o sistema de tração com o ME no outro eixo. A partir do momento que é implantado o ME no outro eixo o veículo passa a ter tração nas quatro rodas, o que melhora a tração em estradas escorregadias e reduz o esforço de tração em um único pneu (EHSANI et al., 2005). O sistema com um ME e transmissão pode ser substituído por dois ME's de pequeno porte que podem ser implementados nos cubos das rodas, que é o tema deste trabalho.

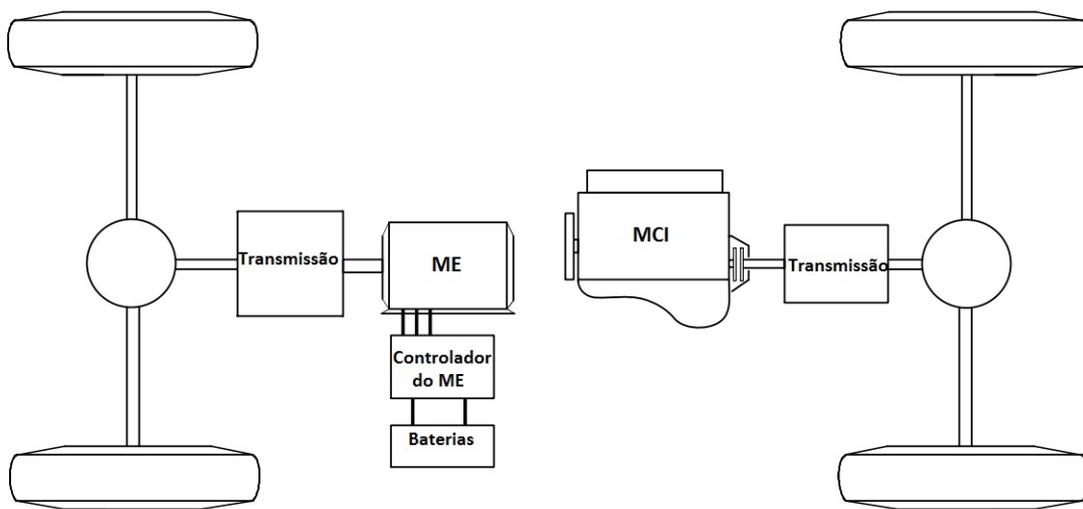


Figura 5 – Configuração de um VHE em paralelo com dois eixos motrizes , adaptado de (EHSANI et al., 2005).

Nos VHE's com arquitetura em série-paralelo, o MCI é utilizado também para recarregar as baterias. O veículo *Prius* da *Toyota* é um exemplo deste sistema. É adicionado um gerador na saída do MCI, e com isto permite-se que as baterias continuem sendo recarregadas em tempos de prolongada espera, como em um semáforo ou em um engarrafamento. Estes híbridos podem ser catalogados como híbridos em paralelo, já que conservam a estrutura em paralelo (SÁNCHEZ, 2012).

Como é refletido em seu nome, os VHE's com arquitetura complexa são muito complexos e não podem se enquadrar em nenhuma das 3 classificações acima. Ela é similar a configuração série-paralelo. A principal diferença entre eles é que o fluxo de energia do ME na arquitetura complexa é bidirecional e no série-paralelo é unidirecional. Este fluxo de potência bidirecional pode permitir modos de operação mais versáteis (SÁNCHEZ, 2012).

## 2.3 Dinâmica do veículo

### 2.3.1 Distribuição de Forças e Modelagem do desempenho do veículo

É importante saber qual a carga média sobre as rodas de um veículo se deslocando no plano, para se calcular a potência necessária que cada motor terá para poder movimentar o veículo. (NICOLAZZI; LEAL; ROSA, 2008) diz que essa modelagem quase estática pode ser empregada como um modelo estrutural de carregamentos, ou então como um modelo de desempenho. O primeiro passo é calcular a posição do CG, pois é nele que as forças de inércia e peso são atuantes. De acordo com a Equação 2.1 temos que o equilíbrio de forças na vertical é:

$$G = R_{0I} + R_{0II} \quad (2.1)$$

Onde:

$G$  é a Força peso total do veículo;

$R_{0I}$  é Reação sobre o eixo dianteiro de um veículo no plano;

$R_{0II}$  é Reação sobre o eixo traseiro de um veículo no plano;

Definindo que:

$$x = \frac{R_{0II}}{G} \quad (2.2)$$

Onde:

$x$  é a Parcela da carga sobre o eixo traseiro;

Realizando o equilíbrio de forças e aplicando manipulações matemáticas, encontramos as equações de  $a_I$  (2.3) e  $a_{II}$  (2.4) que são respectivamente a distância do CG ao eixo dianteiro e do CG ao eixo traseiro. Na Figura 6 fica claro o entendimento das variáveis.

$$a_I = \frac{R_{0II}}{G} \cdot l \quad (2.3)$$

$$a_{II} = (1 - x) \cdot l \quad (2.4)$$

Onde:

$a_I$  é a Distância do CG ao eixo dianteiro;

$l$  é a Distância do entre-eixos;

$a_{II}$  é a Distância do CG ao eixo traseiro;

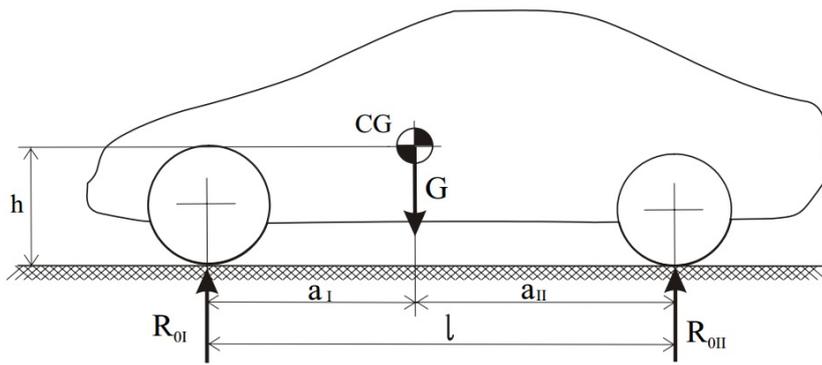


Figura 6 – Posição longitudinal do CG, adaptado de (NICOLAZZI; LEAL; ROSA, 2008).

Para encontrar a altura do CG em relação ao solo, deve-se calcular as reações em cada eixo em um plano com uma inclinação  $\alpha$  em relação ao plano horizontal, como é apresentado na Figura 7.

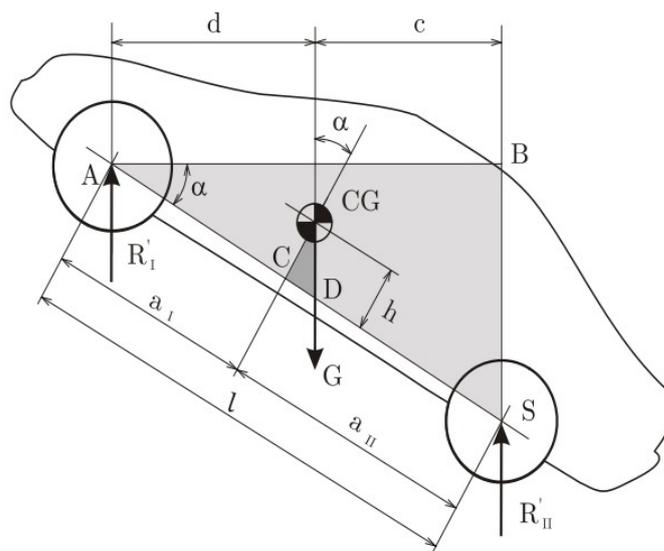


Figura 7 – Posição vertical do CG, adaptado de (NICOLAZZI; LEAL; ROSA, 2008).

Resolvendo a equação de equilíbrio de momentos após algumas manipulações matemáticas temos que:

$$R'_I \cdot l = G \cdot [a_{II} - h \cdot \tan \alpha] \quad (2.5)$$

Utilizando a definição de 2.2, podemos escrever a posição do CG como sendo:

$$h = \frac{l}{G} \cdot \cot \alpha \cdot [R_{0I} - R'_I] \quad (2.6)$$

Onde:

$R'_I$  é a Reação vertical do eixo dianteiro medido com o carro na rampa;

$h$  é a Altura do CG;

$\alpha$  é o aclave da pista;

É ressaltado por (NICOLAZZI; LEAL; ROSA, 2008) em seu livro que esta formulação somente é válida para veículos de pneus de mesmo tamanho, porém para veículos com rodas de tamanhos diferentes, o problema pode ser contornado se o centro destas não forem usados como referência para traçar a reta  $AS$ .

Quando um veículo é estacionado em aclave, a reação normal dos pneus sobre o solo varia. Porque a força normal ao solo é na realidade uma componente de peso do veículo. De acordo com a Figura 8, podemos observar um veículo estacionado em um aclave  $\alpha$  (para ficar claro o entendimento a linha paralela a base da folha é a da pista inclinada, e as componentes  $G \cdot \cos(\alpha)$  e  $G \cdot \sin(\alpha)$  são as componentes da força  $G$  decompostas em  $y$  e  $x$ ) e a partir das condições de equilíbrio no plano, foi desenvolvido um modelo matemático que possibilita o cálculo da força normal ao solo, em função do aclave (NICOLAZZI; LEAL; ROSA, 2008).

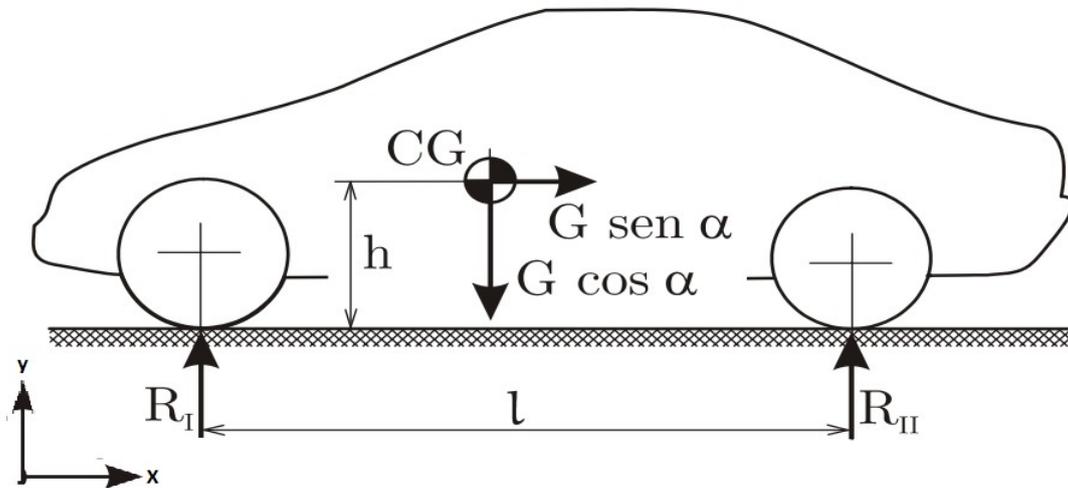


Figura 8 – Cargas nos eixos de um veículo em uma rampa, adaptado de (NICOLAZZI; LEAL; ROSA, 2008).

Após algumas manipulações matemáticas a partir do equilíbrio de momentos em torno do eixo traseiro e dianteiro se tem, respectivamente que:

$$R_I = R_{0I} \cdot \cos \alpha - G \cdot \frac{h}{l} \cdot \sin \alpha \quad (2.7)$$

$$R_{II} = R_{0II} \cdot \cos \alpha + G \cdot \frac{h}{l} \cdot \sin \alpha \quad (2.8)$$

Onde:

$R_I$  é a Reação sobre o eixo dianteiro de um veículo parado em aclave;

$R_{II}$  é a Reação sobre o eixo traseiro de um veículo parado em aclave;

A partir do momento que o veículo começa a se deslocar, surgem novas forças atuantes, além do peso, que agem no ponto de contato pneu-pista, no CG, e no centro de pressão, ocasionando uma alteração sensível na componente da força normal do solo (NICOLAZZI; LEAL; ROSA, 2008). Para melhor entendimento, a Figura 9 apresenta estas forças.

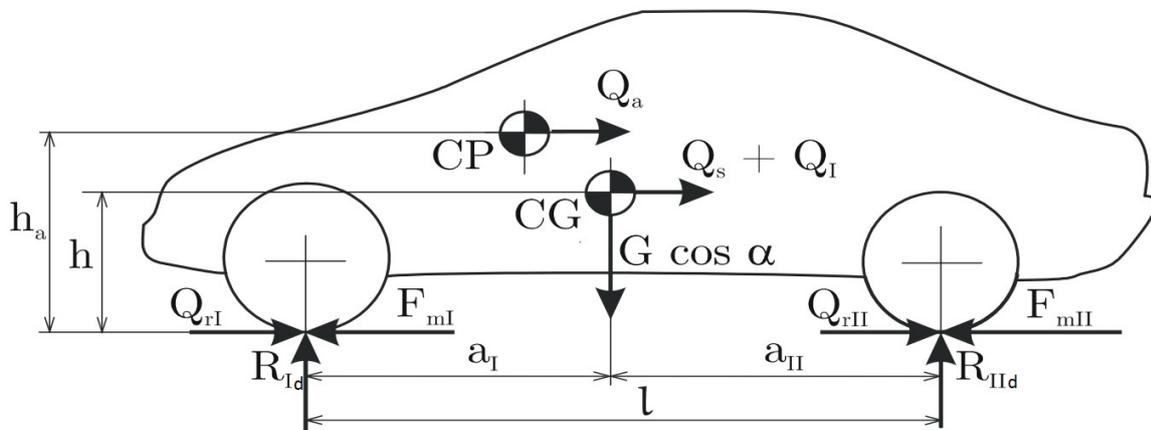


Figura 9 – Cargas em um veículo em movimento, adaptado de (NICOLAZZI; LEAL; ROSA, 2008).

Fazendo o equilíbrio de forças na direção do movimento do veículo teremos como proposto por (NICOLAZZI; LEAL; ROSA, 2008) que:

$$F_m = Q_s + Q_r + Q_i + Q_a \quad (2.9)$$

Onde:

$F_m$  é a Força motriz total;

$Q_s$  é a Resistência ao aclave;

$Q_r$  é a Resistência ao rolamento total;

$Q_i$  é a Resistência de inércia;

$Q_a$  é a Resistência aerodinâmica;

Sabendo que  $F_m$  é a força motriz e  $Q_r$  é a resistência ao rolamento que são respec-

tivamente apresentadas como:

$$F_m = F_{mI} + F_{mII} \quad (2.10)$$

Onde:

$F_{mI}$  é a Força motriz no eixo dianteiro;

$F_{mII}$  é a Força motriz no eixo traseiro;

$$Q_r = Q_{rI} + Q_{rII} \quad (2.11)$$

Onde:

$Q_{rI}$  é a Resistência ao rolamento no eixo dianteiro;

$Q_{rII}$  é a Resistência ao rolamento no eixo traseiro;

$$Q_r = f \cdot G \cdot \cos \alpha \quad (2.12)$$

Sabe-se que as resistências ao movimento modificam as cargas nos eixos de um veículo. Assim, como é citado por (NICOLAZZI; LEAL; ROSA, 2008) para quantificar a variação da carga normal ao solo a aplicação das condições de equilíbrio no plano devem ser feitas e após algumas manipulações matemáticas chega-se ao resultado das reações no eixo dianteiro e traseiro de um veículo em movimento respectivamente:

$$R_{Id} = (1 - x) \cdot G \cdot \cos \alpha - (F_m - Q_r) \frac{h}{l} \quad (2.13)$$

$$R_{II d} = x \cdot G \cdot \cos \alpha + (F_m - Q_r) \frac{h}{l} \quad (2.14)$$

Onde:

$R_{Id}$  é a Reação sobre o eixo dianteiro de um veículo em movimento;

$R_{II d}$  é a Reação sobre o eixo traseiro de um veículo em movimento;

Sabe-se que a Equação 2.10 representa a força motriz como o somatório das forças motrizes dos dois eixos. Mas sabe-se também que o veículo pode ter uma tração dianteira, traseira ou integral. O VHE proposto poderá assumir estas 3 configurações (quando somente o MCI está ativado o veículo tem uma tração dianteira, quando somente o ME está ativado o veículo terá uma tração traseira e quando os dois motores funcionam simultaneamente o veículo assume uma configuração de veículo com tração integral, neste trabalho o foco será apenas quando o ME está em funcionamento, as as outras configurações poderão ser estudadas em trabalhos futuros). É proposto no livro de (NICOLAZZI; LEAL;

ROSA, 2008) que cada uma destas configurações apresente uma formulação diferente para o cálculo de  $F_m^{máx}$ . As propostas para veículos com tração dianteira, traseira e integral são respectivamente apresentadas nas equações 2.15, 2.16 e 2.17 .

$$F_{mI}^{máx} = \mu \cdot G \cdot \cos \alpha \cdot \left[ \frac{(1-x) + f \cdot \left(\frac{h}{l}\right)}{1 + \mu \left(\frac{h}{l}\right)} \right] \quad (2.15)$$

$$F_{mII}^{máx} = \mu \cdot G \cdot \cos \alpha \cdot \left[ \frac{x - f \cdot \left(\frac{h}{l}\right)}{1 - \mu \cdot \left(\frac{h}{l}\right)} \right] \quad (2.16)$$

$$F_m^{máx} = \mu \cdot G \cdot \cos \alpha \quad (2.17)$$

Onde:

$F_{mI}^{máx}$  é a Força motriz máxima em um veículo com tração dianteira;

$F_{mII}^{máx}$  é a Força motriz máxima em um veículo com tração traseira;

$F_m^{máx}$  é a Força motriz máxima em um veículo com tração integral;

$\mu$  é o Coeficiente de atrito entre pneu e a pista;

$f$  é o Coeficiente de atrito de rolamento;

Para determinar os aclives máximos, (NICOLAZZI; LEAL; ROSA, 2008) nos orienta a considerar a velocidade do veículo como sendo baixa e constante. E como na força motriz, como temos 3 configurações de sistemas de tração, os máximos aclives para tração dianteira, traseira e integral são respectivamente apresentados.

$$\tan \alpha \Big|_{máx}^I = \mu \cdot \left[ \frac{(1-x) + f \cdot \left(\frac{h}{l}\right)}{1 + \mu \cdot \left(\frac{h}{l}\right)} \right] - f \quad (2.18)$$

$$\tan \alpha \Big|_{máx}^{II} = \mu \cdot \left[ \frac{x - f \cdot \left(\frac{h}{l}\right)}{1 - \mu \cdot \left(\frac{h}{l}\right)} \right] - f \quad (2.19)$$

$$\tan \alpha \Big|_{máx}^m = \mu - f \quad (2.20)$$

Onde:

$\tan \alpha \Big|_{máx}^I$  é o Aclive máximo para veículo com tração dianteira;

$\tan \alpha \Big|_{máx}^{II}$  é o Aclive máximo para veículo com tração traseira;

$\tan \alpha \Big|_{máx}^m$  é o Aclive máximo para veículo com tração integral;

É fato que as acelerações máximas ocorrem somente com velocidades baixas. Como ocorre com as forças motrizes máximas e com os aclives máximos, há uma aceleração má-

xima para cada tipo de configuração de tração. Após aplicar uma manipulação matemática (NICOLAZZI; LEAL; ROSA, 2008) chega-se aos seguintes resultados para acelerações máximas em veículos de tração dianteira, traseira e integral respectivamente:

$$a_{m\acute{a}x}^I = \frac{g}{(1 + \delta)} \cdot \left[ \frac{\mu \cdot (1 - x) - f}{(1 + \mu \cdot (\frac{h}{l}))} \cdot \cos \alpha - \sin \alpha \right] \quad (2.21)$$

$$a_{m\acute{a}x}^{II} = \frac{g}{(1 + \delta)} \cdot \left[ \frac{\mu \cdot x - f}{(1 - \mu \cdot (\frac{h}{l}))} \cdot \cos \alpha - \sin \alpha \right] \quad (2.22)$$

$$a_{m\acute{a}x}^m = \frac{g}{(1 + \delta)} \cdot [(\mu - f) \cdot \cos \alpha - \sin \alpha] \quad (2.23)$$

Onde:

$a_{m\acute{a}x}^I$  é a Aceleração máxima para veículo com tração dianteira;

$a_{m\acute{a}x}^{II}$  é a Aceleração máxima para veículo com tração traseira;

$a_{m\acute{a}x}^m$  é a Aceleração máxima para veículo com tração integral;

$\delta$  é a Inércia de translação equivalente a de rotação;

De acordo com (SOUZA, 2010), com a variação da velocidade a cada instante temos diferentes forças de tração requeridas para movimentar o veículo. E multiplicando pela velocidade essa força tratora teremos a potência necessária para deslocar o veículo em um trajeto, como mostra a equação 2.24.

$$P_{req} = F_t \cdot V \quad (2.24)$$

E a partir da integração dessa potência no tempo, podemos calcular a energia requerida para cumprir um certo trajeto, como apresentado na equação 2.25.

$$E_{req} = \int P_{req}(t) dt, \quad (2.25)$$

A partir das equações apresentadas anteriormente, pode-se calcular os esforços que o veículo está sendo submetido quando está parado, quando está em movimento e os aclives máximos que este é capaz de superar, além de calcular a potência e a energia gasta em um certo trajeto.

### 2.3.2 Dinâmica da linha propulsora

A aceleração máxima alcançável de um veículo é limitada principalmente por dois fatores: o máximo torque nas rodas motrizes e pela máxima força de tração nos pneus. A máxima potência possível ( $P_e$ ) em um MCI é baseado em uma função da variação da

velocidade angular do motor ( $\omega_e$ ). Esta função pode ser determinada experimentalmente, entretanto com o auxílio de (JAZAR, 2009), pode-se terminar esta função que é chamada de *Função de desempenho de potência* a partir de um polinômio de terceiro grau que é apresentado na Equação 2.26.

$$P_e = P_1 \cdot \omega_e + P_2 \cdot \omega_e^2 + P_3 \cdot \omega_e^3 \quad (2.26)$$

Onde:

$P_e$  é a Máxima potência possível de um MCI;

$P_1$  é o Coeficiente da equação *Função de desempenho de potência*;

$P_2$  é o Coeficiente da equação *Função de desempenho de potência*;

$P_3$  é o Coeficiente da equação *Função de desempenho de potência*;

$\omega_e$  é a Máxima velocidade angular quando se atinge o torque máximo;

Para um MCI, os coeficientes  $P_1, P_2$  e  $P_3$  podem ser calculadas se utilizarmos  $\omega_m$  para indicar a velocidade angular, que é quando o motor atinge a sua máxima potência ( $P_m$ ). Então de acordo com as manipulações matemáticas de (JAZAR, 2009) teremos que:

$$P_1 = \frac{P_M}{\omega_M} \quad (2.27)$$

$$P_2 = \frac{P_M}{\omega_M^2} \quad (2.28)$$

$$P_3 = -\frac{P_M}{\omega_M^3} \quad (2.29)$$

Onde:

$P_M$  é a Potência máxima do MCI;

$\omega_M$  é a Máxima velocidade angular quando se tem máxima potência;

A Figura 10 exibe os componentes que então presentes no trem de força de um veículo com MCI.

A Figura 11 apresenta como é feita a transferência de torque em cada componente do trem de força até chegar a roda.

O torque de condução do motor ( $T_e$ ) é calculado de a partir da máxima potência possível ( $P_e$ ) como foi apresentado por (JAZAR, 2009), temos então que:

$$T_e = \frac{P_e}{\omega_e} \quad (2.30)$$

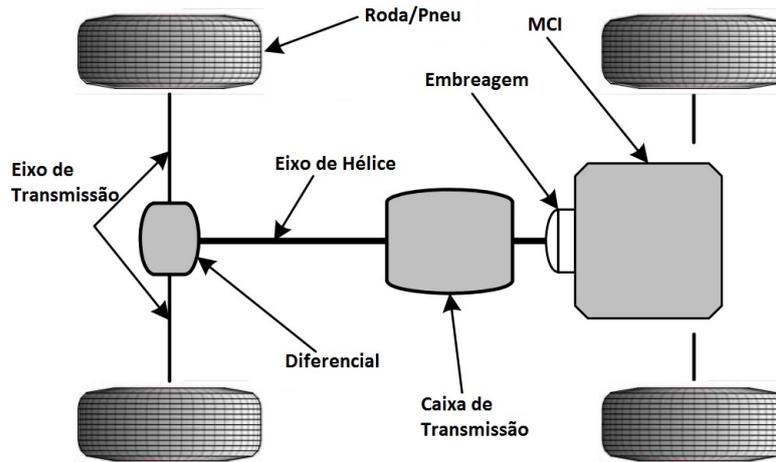


Figura 10 – Componentes do trem de força de um veículo com tração traseira, adaptado de (JAZAR, 2009).

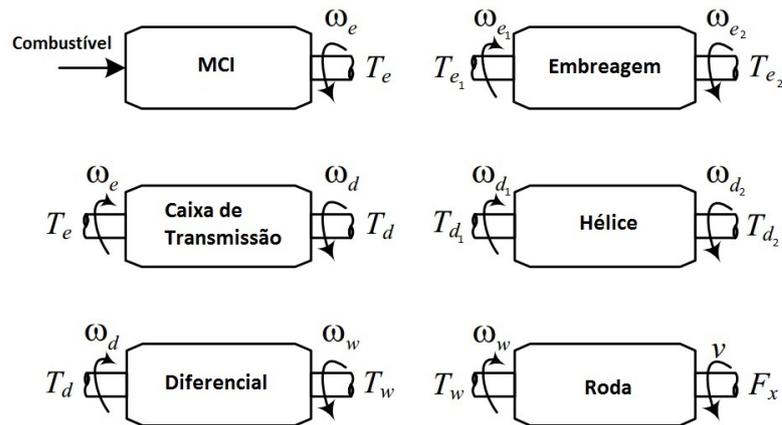


Figura 11 – Entrada e saída de torque e velocidade angular de cada componente do trem de força de um sistema de MCI, adaptado de (JAZAR, 2009).

Substituindo a Equação 2.26 na Equação 2.30, teremos então que:

$$T_e = P_1 + P_2 \cdot \omega_e + P_3 \cdot \omega_e^2 \quad (2.31)$$

É muito importante saber qual o torque mínimo necessário para tirar o veículo da inércia. Então para este cálculo (JAZAR, 2009) demonstra em seu livro como encontrar a formulação do torque na roda ( $T_w$ ) variando em função de cada relação de marcha. Depois de algumas manipulações matemáticas o resultado é apresentado na Equação 2.32.

$$T_w = \eta \cdot P_1 \cdot n_d \cdot n_i + \eta \cdot \frac{P_2}{R_w} \cdot n_d^2 \cdot n_i^2 \cdot v_x + \eta \cdot \frac{P_3}{R_w^2} \cdot n_d^3 \cdot n_i^3 \cdot v_x^2 \quad (2.32)$$

Onde:

$T_w$  é o Torque na roda;

$R_w$  é o Raio efetivo do conjunto roda/pneu;

$n_d$  é a Relação do diferencial;

$n_i$  é a Relação de transmissão;

$V_x$  é a Velocidade para frente na roda;

$\eta$  é a Eficiência global do sistema de transmissão;

O esquemático para mostrar como é aplicado o torque na roda, é apresentado na Figura 12.

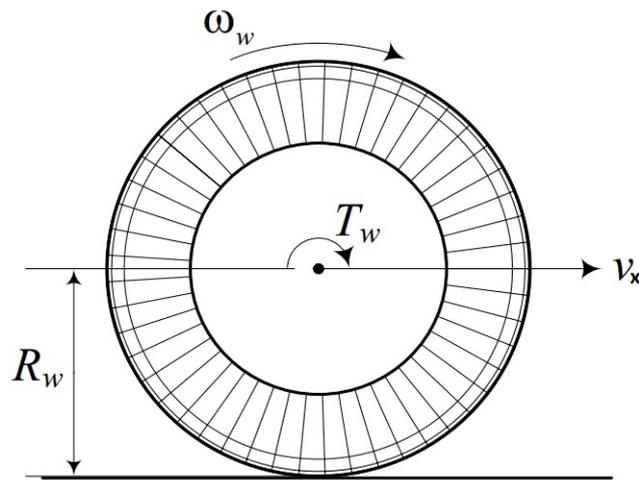


Figura 12 – Pneu com raio  $R_w$  rolando no chão e se movendo com velocidade  $V_x$  e velocidade angular  $\omega_w$ , adaptado de (JAZAR, 2009).

De acordo com (STONE, 1999), os MCI são projetados com base nos ciclos termodinâmicos ideais, entretanto eles operam em ciclos mecânicos. Há sempre um grande interesse em saber qual o consumo de combustível de um motor para uma dada saída, e neste trabalho esta será uma informação fundamental para realizar as comparações necessárias entre o consumo do MCI e o consumo do ME. O cálculo apresentado por (STONE, 1999) inicia-se com a determinação da taxa de fluxo de massa de ar, onde as variáveis para esta operação são extraídas do MCI utilizado e das condições do ambiente, como apresentado nas equações 2.33 e 2.34

$$\dot{m}_a = \frac{P \cdot V_s \cdot \eta_v \cdot N^*}{R_a \cdot T} \quad (2.33)$$

$$N^* = \frac{N'}{n} \quad (2.34)$$

Onde:

$\dot{m}_a$  é a Taxa de fluxo de massa de ar;

$P$  é a Pressão de injeção de combustível;

$V_s$  é a Cilindrada do motor;

$\eta_v$  é a eficiência volumétrica do MCI;

$R_a$  é a Constante dos gases ideais para o ar;

$T$  é Temperatura;

$N'$  é o Número de ciclos mecânicos de operação por segundo;

$n$  é número de cilindros;

Após esta operação, o próximo passo é apontado na equação 2.35, onde o valor da taxa de fluxo de massa de ar é dividido pela razão ar-combustível e com este resultado obtém-se o valor da taxa de fluxo de massa de combustível queimado.

$$\dot{m}_f = \frac{\dot{m}_a}{AFR} \quad (2.35)$$

Onde:

$\dot{m}_f$  é a Taxa de fluxo de massa de combustível queimado;

$AFR$  é a Razão ar-combustível;

Em conformidade com as equações apresentadas neste tópico, pode-se gerar as curvas de torque e potência do MCI, as curvas de torque na roda em função de cada marcha e estimar o fluxo de massa de combustível queimado, podendo assim calcular quanto de combustível o veículo está consumindo em um dado percurso. As curvas que nos auxiliam a entender melhor qual o comportamento da potência e do torque com o aumento da rotação nos MCI e os resultados do consumo de combustível serão apresentados nos capítulos posteriores.

## 2.4 Motor Elétrico

O sistema de propulsão elétrico é constituído pelo ME, pela bateria e pelo controlador do ME. O ME tem a função de converter energia elétrica em energia mecânica para propulsionar o veículo e quando o ME está na função de gerador ele recupera parte da energia da frenagem carregando as baterias (EHSANI et al., 2005). Os motores precisam ter condições mínimas para serem utilizados em tração elétrica e essa escolha não é tão simples assim, ela estará associada à finalidade do VHE, ao sistema de energia e às características veiculares. A Figura 13 apresenta as interfaces de potência para a escolha

de um motor para o VHE.

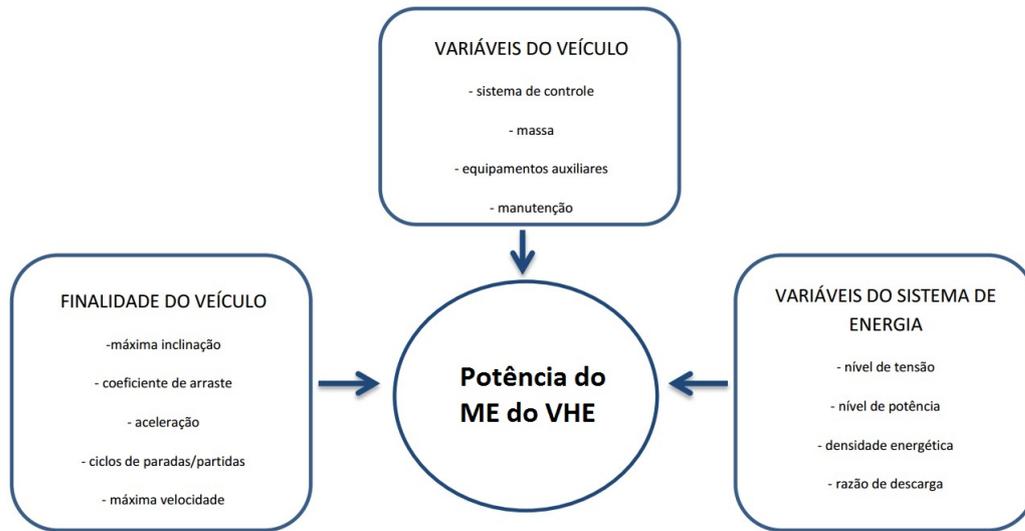


Figura 13 – Interfaces de potência para escolha de um motor para VHE, adaptado de (BOTTURA; BARRETO, 1989)

De acordo com (BOTTURA; BARRETO, 1989), além das condições apresentadas na Figura 13, o ME deverá satisfazer algumas condições práticas como: capacidade de potência constante na faixa de 25-100% da velocidade máxima, alta capacidade de torque na faixa de 0-25% da velocidade máxima, capacidade de frenagem regenerativa, rápido e suave controle de aceleração e frenagem para toda faixa de velocidade, alta eficiência energética no ciclo de percurso definido, alta razão de potência de saída para massa total do sistema, ser robusto, confiável e de baixo custo, além do que não deve-se esquecer que a escolha do motor deve estar associada ao tipo de controle disponível.

A partir das condições apresentadas acima, os principais ME's utilizados em um projeto de VHE são:

- *Motor de indução (CA)*: eles são largamente utilizados como propulsores elétricos em VHEs devido a sua construção simples, confiabilidade, robustez, baixa manutenção, baixo custo e capacidade para operar em ambientes hostis. (ZERAOULIA; BENBOUZID; DIALLO, 2006). A ausência de atrito da escova permite que esses motores aumentem o limite de velocidade máxima e com esse limite maior de velocidade estes motores desenvolvem maiores rendimentos. As variações da velocidade de motores de indução são alcançados alterando a frequência da tensão. O controle de orientação de campo do motor de indução pode separar o controle de torque do controle de campo. Isto permite que o motor se comporte da mesma maneira que um motor CC excitado separadamente, no entanto, ele não sofre das mesmas limitações de velocidade do motor de CC. Os controladores dos motores de indução tem um maior custo se comparado com os motores de CC (XUE; CHENG; CHEUNG, 2008).

- *Motor de relutância comutada (CA)*: a estrutura de rotor é extremamente simples, sem qualquer enrolamento, imã, comutadores ou escovas. A tolerância a falhas do motor também é muito boa. Devido à sua construção simples e de baixa inércia de rotor, ele tem uma aceleração muito rápida e uma capacidade de operação de alta velocidade com uma região de potência constante. O motor tem um torque de partida elevado e uma alta relação de torque-inércia. As desvantagens dos motores de relutância comutada são que eles têm sofrem de ondulação no torque e ruído acústico. No entanto, estes não são problemas potenciais que proíbem a sua utilização em VE's e VHE's (XUE; CHENG; CHEUNG, 2008).

- *Motor de imã permanente sem escovas (CC)*: estes são especificamente conhecidos por sua elevada eficiência e potência. Usando um imã permanente o motor pode eliminar a necessidade de energia para produção de polos magnéticos. Assim eles são capazes de alcançar uma maior eficiência do que os motores CC com escovas, os motores de indução e os motores de relutância comutada. Além disso, o calor é dissipado de forma eficaz para o meio (XUE; CHENG; CHEUNG, 2008). Estes motores, por natureza, tem uma região de potência constante menor se comparado com os outros ME's devido a sua capacidade de enfraquecimento de campo que é bastante limitada, resultante da presença do campo do imã permanente (ZERAOULIA; BENBOUZID; DIALLO, 2006).

- *Motor CC com escovas (CC)*: estes motores são utilizados em sistema com propulsão elétrica, pois suas características de torque-velocidade atendem bem as exigências de tração do veículo e seu controle de velocidade é relativamente simples. Entretanto, os acionadores do motor de CC têm uma construção volumosa, baixa eficiência, baixa confiabilidade e maior necessidade de manutenção principalmente devido a presença da escova (ZERAOULIA; BENBOUZID; DIALLO, 2006). Eles também são conhecidos pela capacidade de obter um alto torque em baixas velocidades. A velocidade deste motor é ajustada através da variação de tensão. Os motores de CC com escovas podem ter dois, quatro ou seis pólos dependendo a potência de saída e da tensão e podem ter enrolamento de campo em série ou em derivação. Uma das dificuldades encontradas na utilização destes motores é o tamanho dos mesmo, isso faz com que eles sejam mais pesados, além disso, o atrito entre as escovas e o comutador restringe a velocidade máxima do motor (XUE; CHENG; CHEUNG, 2008).

Os diferentes tipos de motores elétricos tem basicamente um mesmo comportamento quanto a potência e torque. No início do uso do motor até chegar a uma velocidade base o ME tem um torque constante e a potência é linearmente crescente, após a velocidade base até chegar a velocidade máxima do motor a potência é constante e o torque sofre um decaimento, como apresentado na Figura 14.

A aplicação dos motores elétricos nos cubos das rodas pode trazer algumas vantagens se comparadas as outras configurações de sistemas híbridos, como por exemplo, não

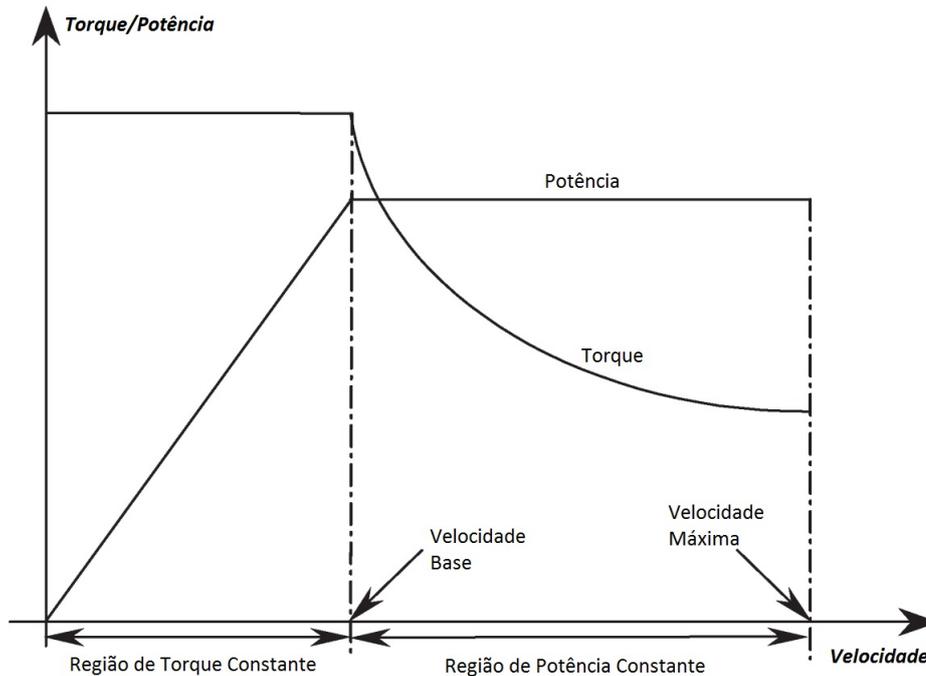


Figura 14 – Comportamento da potência e torque pela velocidade de um ME, adaptado de (ZERAOUlia; BENBOUZID; DIALLO, 2006)

há nenhuma modificação no eixo motriz em que o MCI é ligado. A implementação deste sistema faz com que não seja necessário alterações bruscas na configuração do veículo.

## 2.5 Acionamento do Motor Elétrico

A função de um conversor de potência elétrica é converter a energia elétrica com um certo valor de tensão, corrente ou frequência para um diferente valor de tensão, corrente ou frequência. Os exemplos típicos de circuitos eletrônicos de potência elétrica tipicamente utilizados nos VHE's são: os recortadores (CC-CC), os inversores (CC-CA), os retificadores (CA-CC) e os cicloconversores (CA-CA) (BOTTURA; BARRETO, 1989).

De acordo com (CHAN, 2007), as questões que precisam ser abordadas no projeto de circuitos eletrônicos de potência de um VHE são:

- *Projeto elétrico*: inclui o projeto de circuito de comutação, projeto do circuito controlador, dispositivo de seleção de comutação, otimização da conversão de frequência e o cálculo de perdas;

- *Projeto do algoritmo de controle*: inclui o projeto do algoritmo de controle para alcançar a tensão, corrente e frequência desejada na saída, e para realizar o fluxo de potência bidirecional;

- *Projeto magnético*: inclui o projeto de indutores, capacitores, e outros compo-

mentos magnéticos necessários para a filtragem, comutação e unidades de acionamento;

- *Projeto térmico e mecânico*: inclui a modelagem de dispositivos de perda de potência e componentes magnéticos, projeto de sistema de arrefecimento, dissipador de calor e integração da unidade de eletrônica de potência.

Atualmente, o algoritmo de controle híbrido é projetado principalmente através de simulações e experiência. Existem basicamente dois tipos de controle nos VHE's, o primeiro é o controle de gerenciamento de energia com o objetivo de aperfeiçoar a eficiência energética e de emissões, o segundo é o controle de dirigibilidade, que tem como objetivo aperfeiçoar o desempenho do carro, conforto, segurança e desempenho. Nestas circunstâncias, qual é a especificação de desempenho, como determinar a lei de controle, como determinar o comando de torque, como distribuir o comando de torque do ME e do MCI, qual é a política adequada na decisão estratégica de controle, e qual é a relação entre o controle e o desempenho, são questões que devem ser abordadas. É importante assegurar que o MCI, os ME's e as baterias funcionem dentro de suas regiões de operação ideal (CHAN, 2007).

## 2.6 Baterias e Ultracapacitores

Sabe-se que há diferentes tipos e tamanhos de VHE's e VE's. No entanto, em praticamente todos os casos os armazenadores de energia elétrica são essenciais para o funcionamento do sistema de propulsão elétrico. Estes componentes podem ser as baterias ou os supercapacitores. Eles são responsáveis pelo maior custo, peso e volume dentre todos os constituintes utilizados no sistema (LARMINIE; LOWRY, 2003). Os armazenadores de energia elétrica devem ser mensurados de acordo com o uso do veículo em questão, eles devem fornecer potência adequada para o funcionamento do ME e armazenar energia suficiente para o ciclo de condução proposto. Deve-se levar em consideração também o número de ciclos e o tempo de vida útil destes armazenadores (TANAKA, 2013).

As baterias são dispositivos de armazenamento de energia que consistem em uma ou mais células eletroquímicas que convertem a energia química armazenada em energia elétrica. Durante as operações de carga e descarga, ocorrem em seu interior reações de oxidação, ou redução das partes ativas, resultando assim na adição ou remoção de íons. Uma bateria é peculiarmente constituída por dois eletrodos, um positivo e outro negativo, o eletrólito que é o meio responsável pela condução dos íons entre dois eletrodos e o separador que divide fisicamente as parcelas com diferentes polaridades (ROCHA, 2013). Existem várias características que devem ser levadas em conta na escolha da bateria mais adequada para um VE ou VHE. Uma das características mais importante das baterias é sua capacidade, que é medida em  $Ah$ . Além disso, a energia armazenada nas baterias, que é medida em  $Wh$ , deve ser cuidadosamente calculada (TIE; TAN, 2013).

Hoje em dia, cinco grupos de bateria que são adequadas para aplicação em transporte rodoviário estão disponíveis no mercado, elas são apresentadas na Figura 15.

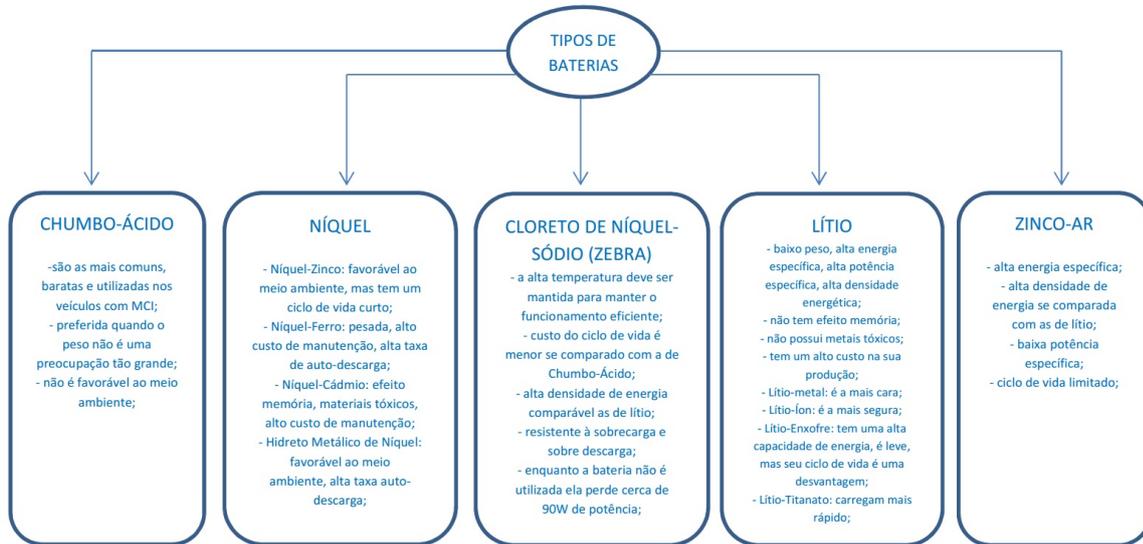


Figura 15 – Principais baterias utilizadas nos VE's e VHE's, adaptado de (TIE; TAN, 2013).

Os projetos de baterias concentram-se na aquisição de máxima energia específica com máxima potência específica e um alto ciclo de vida, mas em razão da dificuldade encontrada na obtenção concomitante destas características, desenvolveu-se a idéia de unir fontes de alta energia com fontes de alta potência. As fontes de alta energia (baterias) tem alta energia específica ao passo que as fontes de potência tem alta potência específica. A fonte de potência pode ser recarregada durante momentos de menor demanda ou frenagem regenerativa, e uma solução encontrada para ser essa fonte de potência são os ultracapacitores (SOUZA, 2010).

Os ultracapacitores ou supercapacitores tem uma estrutura semelhante a um capacitor normal, mas a diferença é que os eles tem uma alta capacitância (alta capacidade de energia com uma fator de 20 vezes). Uma das características do ultracapacitor é a operação livre de manutenção, uma maior vida útil por ciclo de operação. Atualmente existem 3 tipos de ultracapacitores utilizados nos VE's e nos VHE's, os capacitores de dupla camada elétrica, pseudocapacitores e capacitores híbridos. A diferença entre eles está nos seus mecanismos de armazenamento de energia e os materiais utilizados em seus eletrodos. A densidade de potência específica para estes três tipos de ultracapacitores é de aproximadamente 1000-2000 KW/Kg com 95% de pulso eficiente, mas nesse aspecto o capacitor de dupla camada elétrica leva vantagem sobre os outros dois, quanto à densidade de energia específica ele leva a pior, sendo a mais baixa dos três. O tempo de vida de um ultracapacitor pode chegar a 40 anos (TIE; TAN, 2013).

## 2.7 Ciclos de Condução

Os ciclos de condução são procedimentos normalizados utilizados para certificação de emissão de poluentes veiculares e consumo de combustível de veículos com MCI, hoje em dia estes ciclos também estão sendo utilizados para a certificação de VHE. O ciclo de condução é um modelo de condução sendo composto de um conjunto diferente de parâmetros: velocidade, distância, aceleração, tempo de condução, duração e frequência de partidas e paradas com objetivo de simular um padrão de condução próximo da realidade (TANAKA, 2013).

No Brasil o ciclo de condução adotado para determinação de várias emissões de gases poluentes e consumo de combustível em veículos leves e comerciais leves é semelhante às normas FTP americanas (*Federal Test Procedure*). Estes ciclos foram desenvolvidos na década de 70 pela USEPA (*United States Environmental Protection Agency*). Dois métodos utilizados nos ciclos americanos são a técnica de perseguição, na qual se escolhem veículos em movimento nas vias de circulação para servirem de referência para os testes, e a instrumentação de veículos próprios durante os trajetos que são considerados significativos. Especificamente os ciclos FTP foram desenvolvidos pela escolha de resultados de teste com perfis baseados em tempo parado (trânsito), velocidade média, velocidade máxima e número de paradas por ciclo (SOUZA, 2010). Os procedimentos relativos a este ensaio são descritos na NBR 6601 para ciclos urbanos e na NBR 7024 para ciclos rodoviários (ABNT, 2010), (ABNT, 2012). Existem variados modelos de ciclos de condução, e os principais são divididos em 3 grandes grupos:

- Ciclos de condução europeus;
- Ciclos de condução norte-americanos;
- Ciclos de condução japoneses;

Convém salientar que as emissões veiculares e consumo de combustíveis dependem da forma de condução, o que torna inadequada a comparação direta dos resultados obtidos para o mesmo veículo ensaiado sob diferentes ciclos (Europeu, Americano ou Japonês)(SOUZA, 2010).

O ciclo de condução utilizado neste trabalho, seguindo as NBR, foi o ciclo UDSS apresentado na Figura 16. Ele representa bem o *start-and-stop* que um motorista sofre no dia a dia. Este ciclo é realizado em 1369 segundos, sendo que em 1128 segundos o veículo está em movimento e em 241 segundos o veículo está em repouso (simulando uma parada no semáforo). O ciclo têm um total de 11.99 quilômetros percorridos simulando o trajeto urbano de um motorista. A velocidade média do automóvel neste ciclo é de  $31.57 \text{ Km/h}$  e a velocidade máxima alcançada é de  $91.25 \text{ Km/h}$ . Na atuação do ME que substitui a primeira marcha o tempo total acelerando o veículo é de 106 segundos e a distância total percorrida acelerando é de 603.6 metros.

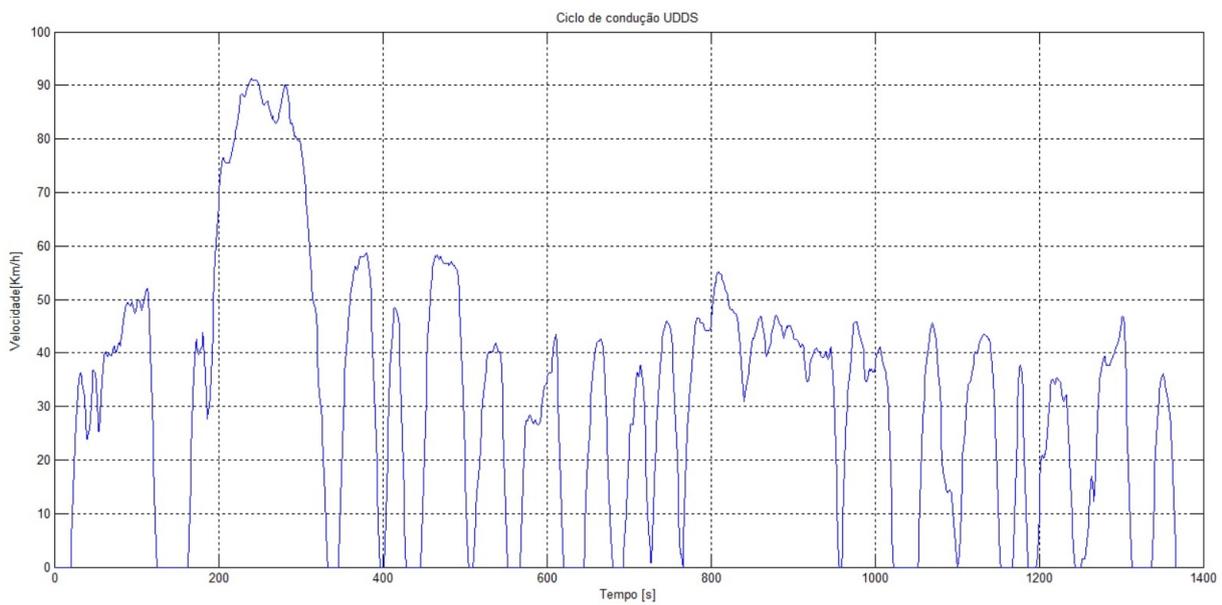


Figura 16 – Ciclo de condução utilizado para os cálculos.

## 3 Estudo de Caso

### 3.1 Veículo a Ser Utilizado

O veículo utilizado para fins de estudo e adaptação do sistema é um Palio EX 1.0 MPI de 5 portas que foi fabricado no ano de 1998. Este veículo possui um motor dianteiro, transversal de 1.0 litros com 4 cilindros em linha e 8 válvulas, utilizando o etanol como combustível, possui injeção eletrônica multiponto, câmbio manual de 5 marchas e a tração é dianteira.



Figura 17 – Veículo utilizado para estudo, retirado de (WEB, 2015).

A Tabela 1 apresenta as principais características deste veículo.

Tabela 1 – Tabela de dados do veículo utilizado, retirado de (S.A., 1996-1999).

<b>Características do veículo</b>	
Relação da 1 <sup>a</sup> marcha	4.091
Relação da 2 <sup>a</sup> marcha	2.238
Relação da 3 <sup>a</sup> marcha	1.520
Relação da 4 <sup>a</sup> marcha	1.156
Relação da 5 <sup>a</sup> marcha	0.971
Redução do diferencial	4.357
Bitola dianteira [mm]	1418
Bitola traseira [mm]	1378
Entre - eixos [mm]	2360
Altura do veículo [mm]	1445
Comprimento do veículo [mm]	3735
Largura do veículo [mm]	1614
Área frontal [mm <sup>2</sup> ]	2332230
Massa do veículo sem passageiros [Kg]	950
Coefficiente de atrito de rolamento	0.015

Os gráficos das Figuras 18, 19 e 20 foram calculados a partir dos dados fornecidos pela Tabela 1 e das Equações 2.26, 2.31 e 2.32 apresentadas, e foram plotados com auxílio do software *Matlab*. As Figuras 18 e 19 mostram o torque e a potência do motor respectivamente, e a Figura 20 apresenta as curvas de desempenho de cada marcha. Estes gráficos são importantes para nos dizer qual o comportamento do torque e da potência quando aumentamos a rotação do motor.

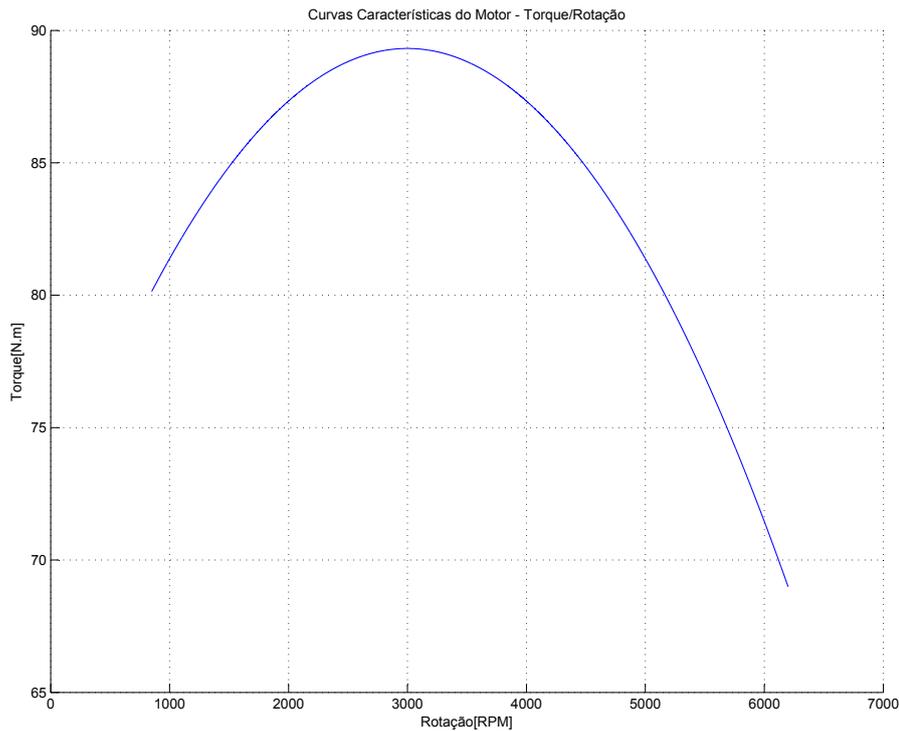


Figura 18 – Torque x Rotação.

A Figura 18 apresenta a curva de torque do motor do veículo utilizado. Nota-se que o torque entregue pelo motor tem uma variação à medida que se aumenta a rotação do motor. Observa-se que o maior torque está localizado em aproximadamente  $3000RPM$ .

De acordo com a Figura 19, constata-se que a potência do motor aumenta de acordo com a variação crescente das rotações do mesmo. Perto dos  $6000RPM$  o motor chega a sua máxima potência.

Como podemos analisar na Figura 20, a 1ª marcha é a que solicita maior torque, pois é ela que vai retirar o veículo da inércia. Então de acordo com a proposta inicial deste projeto, os ME's deverão ser capazes de fornecer este mesmo torque fazendo com que o veículo saia da inércia e inicie o movimento.

As características do motor deste veículos são apresentadas na Tabela 2. Esta tabela fornece dados que foram e que serão utilizados (a quantidade de cilindros, a cilindrada

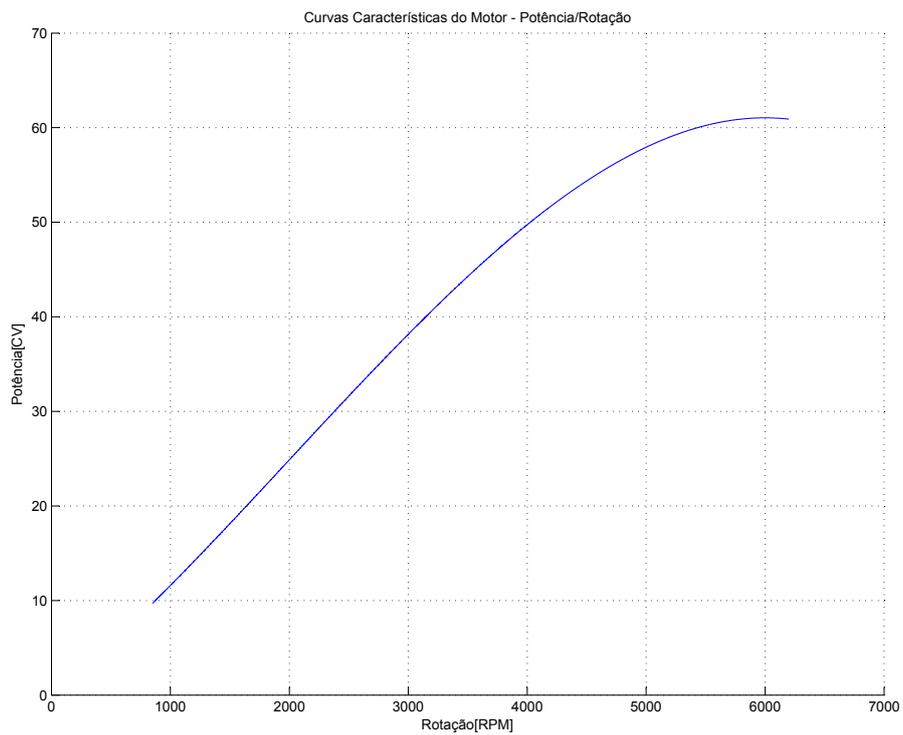


Figura 19 – Potência x Rotação.

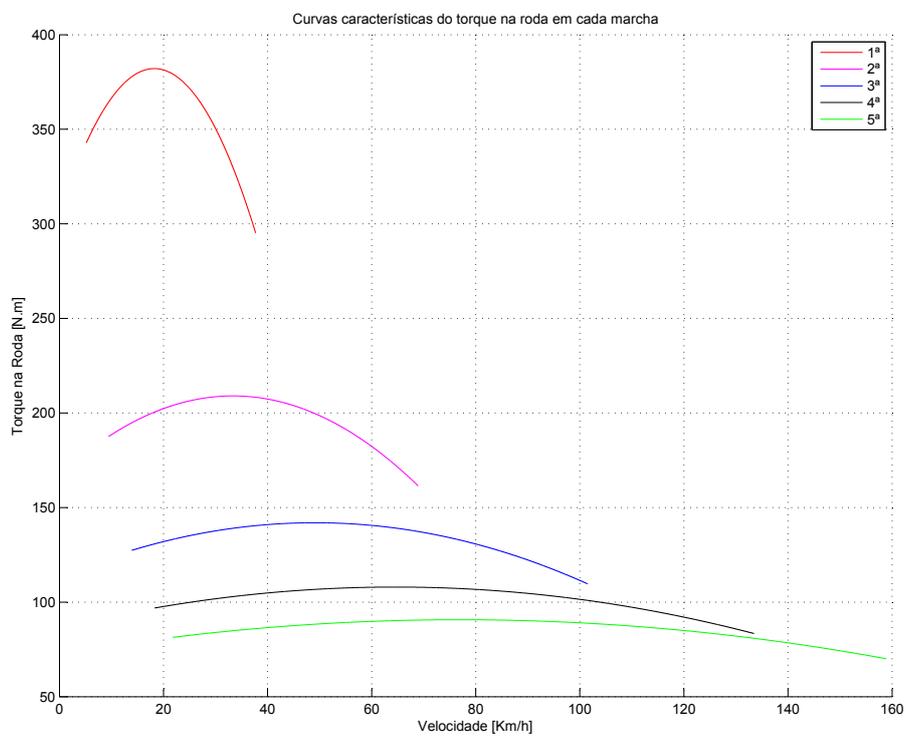


Figura 20 – Torque x Velocidade.

do motor, o combustível utilizado e a pressão de injeção de combustível são alguns dos elementos utilizados para determinar-se o consumo de combustível) para os cálculos. Para uma simples verificação de que os valores calculados estão próximos aos valores reais fornecidos pelo fabricante (S.A., 1996-1999), observa-se que os resultados de torque máximo e potência máxima apresentados nas Figuras 18 e 19 são próximos aos valores viabilizados na Tabela 2.

Tabela 2 – Tabela de características do MCI, retirado de (S.A., 1996-1999).

<b>Características do motor do Palio EX 1.0</b>	
Cilindros	4 em linha
Válvulas por cilindro	2
Taxa de Compressão	9.35±0.15:1
Cilindrada [ $cm^3$ ]	994
Diâmetro dos cilindros [ $mm$ ]	76
Curso dos pistões [ $mm$ ]	54.8
Combustível	Etanol
Potência máxima [ $CV$ ]	61
Rotação máxima do motor [ $RPM$ ]	6000±50
Regime de marcha lenta [ $RPM$ ]	850±50
Torque máximo [ $N\cdot m$ ]	89.43
Pressão de injeção de combustível [ $P_a$ ]	300000

### 3.2 Parâmetros a Serem Testados

Os parâmetros testados neste trabalho tem a função de comparar os dados do veículo convencional com os dados do veículo híbrido e a partir destes critérios será possível afirmar se a proposta apresentada é ou não viável.

- Custos de aplicação e manutenção: o trabalho tem o ideal de propor um sistema que seja viável de aplicação e que tenha um custo baixo para sua implementação e manutenção;

- Relação de consumo: nas páginas seguintes serão apresentadas as comparações entre o consumo dos dois modelos - o veículo convencional e o veículo híbrido - e se esta proposta é ou não lucrativa para o condutor que implementar o sistema.

## 4 Sistema Proposto

### 4.1 Diagrama de Blocos

Após verificar como era constituído a configuração dos veículos híbridos, o diagrama de blocos apresentado na Figura 21 foi desenvolvido. Utilizou-se da configuração de um VHE em paralelo. Como podemos observar na Figura 21 o eixo dianteiro é propulsionado pelo MCI, e neste eixo não há nenhuma modificação. Já no eixo traseiro deverá ser realizada algumas modificações no sistema original do veículo, como a implementação de um ME em cada cubo de roda traseiro e a perda de parte do espaço disponível no porta-malas do veículo utilizado para armazenamento do banco de baterias. A partir do momento que é feita esta implementação o veículo de passeio passa a ter uma tração 4x4.

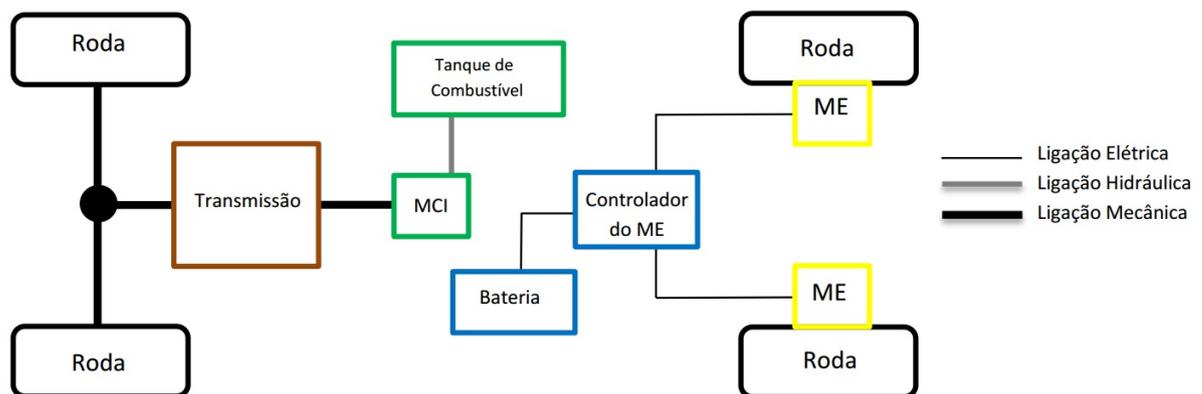


Figura 21 – Diagrama de blocos.

O QFD (*Quality Function Deployment*) é um requerimento de projeto bastante utilizado para identificar e priorizar os padrões dos requerimentos qualitativos e quantitativos de um projeto. Estas solicitações apresentam características que influenciam no funcionamento do produto e podem auxiliar na decisão sobre quais componentes devem ser mais importantes no sistema. Sendo assim, é possível determinar e priorizar os métodos utilizados para atingir cada meta do produto e ele facilita a visualização de interação e conflito entre os mesmos.

Na Figura 22 é apresentado o QFD do sistema de propulsão elétrico proposto neste trabalho. Nele é exposto quais serão os componentes no sistema proposto e quais seus requerimentos. São pontuados com valores entre 1 a 5 (1 como baixa importância e 5 como alta importância) os requerimentos e os recursos de acordo com sua importância. No final uma pontuação para cada recurso é calculada e pode-se observar também que neste diagrama QFD é apresentada a interação direta entre cada componente.

			1	2	3	4		
			RECURSOS					
			Roda	ME	Controlador do ME	Bateria		
INTERAÇÃO			2	1,3	2,4	3		
REQUERIMENTOS	UNIDADES	IMPORTÂNCIA					SOLICITAÇÃO/DIMENSIONAMENTO	
1	Consumo	KWh	5	0	4	4	4	A partir do ciclo de condução utilizado
2	Potência	W	4	4	4	4	4	Solicitada pelo veículo no ciclo de condução
3	Torque	N.m	4	5	5	4	0	Solicitada pelo veículo no ciclo de condução
4	Temperatura Máxima	°C	4	0	4	4	5	Bom funcionamento do componente
5	Temperatura Mínima	°C	4	0	4	3	4	Bom funcionamento do componente
6	Eficiência/Desempenho	%	5	0	5	5	5	Todo sistema deve ser eficiente
7	Peso	Kg	4	3	4	2	5	Aumentar o mínimo possível do veículo original
8	Velocidade Máxima	Km/h	3	4	3	0	0	Solicitada pelo veículo no ciclo de condução
9	Velocidade Mínima	Km/h	3	4	3	0	0	Solicitada pelo veículo no ciclo de condução
10	Tensão	V	4	0	4	4	4	Requisito do motor para dimensionamento das baterias
11	Densidade Energética	Wh.m <sup>-3</sup>	4	0	0	0	4	Requisito para dimensionamento das baterias
12	Razão de Descarga	V	4	0	0	0	4	Requisito para dimensionamento das baterias
13	Custo	R\$	5	2	5	5	5	Ter um baixo custo para viabilizar o projeto
PONTUAÇÃO			82	188	154	190		

Figura 22 – Diagrama QFD.

De acordo com a pontuação final calculada no diagrama é demonstrado que as baterias e os ME's são os componentes com a maior importância, deve-se então selecionar com muito cuidado e atenção os melhores componentes para um bom funcionamento do sistema.

## 4.2 Funcionamento do Sistema

O modelo utilizará a configuração em paralelo, permitindo assim que tanto o MCI quanto os ME's forneçam potência, independentes um do outro para a propulsão do automóvel. O MCI está conectado ao eixo dianteiro (nenhuma modificação é realizada neste eixo), e os ME's estão conectados ao eixo traseiro (o ME é adaptado dentro de cada roda no lugar do cubo da roda). A potência pode ser fornecida tanto pelo MCI quanto pelos ME's.

É importante salientar que o ME é um assistente para o MCI diminuir as emissões de gases poluentes e o consumo de combustível. O ME pode ser usado como gerador de energia para recarregar as baterias através dos freios regenerativos.

Esta configuração foi escolhida devido a sua simplificação na montagem, se comparado com outros tipos de adaptações que modificam o sistema propulsor de fábrica do veículo. Neste modelo os ME's são implementados ao eixo traseiro do automóvel. Uma outra característica que este sistema escolhido pode ter sobre o VHE em série é que o VHE em paralelo precisa somente de dois dispositivos de propulsão – o MCI e o ME – sem a necessidade de ter um gerador para converter a energia fornecida pelo MCI para

recarregar as baterias.

Os possíveis modos de operação do sistema proposto para implementação neste veículo são:

- ME funciona sozinho: MCI é desligado, o veículo é alimentado somente pelo ME (a concepção é de que ao sair da inércia e iniciar o movimento, o veículo utilize o motor elétrico ao invés da primeira marcha do MCI. Assim o funcionamento do ME estará limitado para aceleração até os  $20\text{Km/h}$ );

- MCI funciona sozinho: o veículo é alimentado somente pelo MCI (quando o motorista engatar a segunda marcha - após ultrapassar os  $20\text{Km/h}$ - o ME será desligado e o MCI entrará em funcionamento, com isso o combustível que seria utilizado na hora do arranque do veículo, poderá ser utilizado em outro momento);

- Modo de freio regenerativo (quando o condutor pressionar o pedal de freio ou tirar o pé do pedal de aceleração o ME entrará em funcionamento - ME trabalha como gerador quando é chaveado para mudar o seu sentido de rotação, desacelerando as rodas do veículo e gerando energia elétrica para recarregar as baterias. E quando a houver a necessidade de frenagem rápida ou abrupta o veículo ainda conta do o sistema de freio convencional);

Uma preocupação que surgiu sobre a adaptação dos motores no cubos das rodas foi a questão do aumento de massa não suspensa do veículo, quais efeitos esse acréscimo de massa poderia causar na segurança e conforto do veículo. Neste trabalho o foco não será o estudo deste suposto problema, mas de acordo com (RILEY, 1999-2005) não há investigações reais a respeito do aumento da massa não suspensa. O que se encontra são recomendações de que essa massa não suspensa não deve ultrapassar 20% da massa suspensa. Os veículos atuais respeitam essa relação, mas não há nenhuma evidência real que apóie esta relação.

Um estudo inicial feito por (SCHALKWYK; KAMPER, 2006) utilizando um sistema de 2 graus de liberdade (2DOF) expõe que a vibrações experimentadas pela massa suspensa, e por conseguinte pelos ocupantes do veículo não diminui o conforto com a adição do motor no cubo da roda. As frequências naturais calculadas mostram que, com a implementação dos motores no cubos das rodas, estão em uma faixa de limite aceitável de conforto e segurança dos ocupantes. E os estudos feitos apresentam que as frequências onde o corpo humano tem uma maior sensibilidade a vibração vertical está na faixa de 4 a  $8\text{Hz}$ , esta sensibilidade é bem reconhecida como o resultado de ressonâncias verticais da cavidade abdominal.

### 4.3 Ciclo de Condução utilizado

O ciclo de condução utilizado foi o ciclo UDDS que segue as normas NBR6601 e NBR7024. A Figura 23 apresenta o percurso que o veículo está submetido simulando um trajeto urbano. É destacado em vermelho a proposta da faixa de atuação do ME em substituição a primeira marcha do veículo em questão (a atuação da primeira marcha neste veículo é da faixa de 0 à 20Km/h). Para o dimensionamento do banco de baterias que será apresentado posteriormente adotamos que o veículo deverá percorrer 4 ciclos de condução por dia sem recarregar as baterias. Os 4 ciclos de condução no total equivalem à aproximadamente 48 quilômetros percorridos em um dia e com os ME's acelerando a distância percorrida é de aproximadamente 2.5 quilômetros. O tempo total do percurso será de 4512 segundos e o tempo total de funcionamento dos ME's acelerando será de 424 segundos.

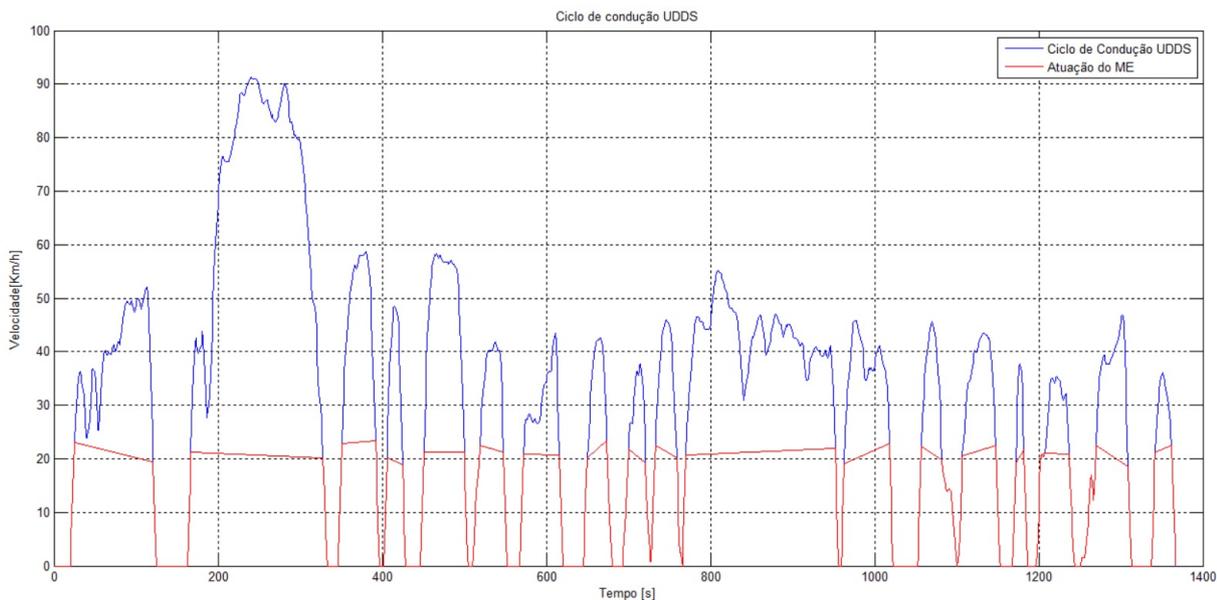


Figura 23 – Ciclo de condução utilizado e a faixa de operação do ME.

### 4.4 Motor Elétrico e seu Controlador

Para eleger o motor elétrico teve-se uma grande restrição - o motor deveria estar dentro da roda do veículo, limitando assim o tamanho do motor a ser selecionado - e com isso houve uma imensa redução da disponibilidade de ME's que poderiam ser utilizados neste projeto. Outras restrições foram surgindo de acordo com que os cálculos foram sendo realizados. A Figura 24 exibe o gráfico com duas curvas no ciclo de condução, a curva em azul apresenta a variação da rotação na roda em todo o ciclo de condução e a curva em vermelho apresenta a variação da rotação da roda em primeira marcha. Este gráfico foi

importante para a seleção do motor pois com ele é apresentada a faixa de rotação que o ME trabalhará em aceleração (0 à aproximadamente 225 RPM).

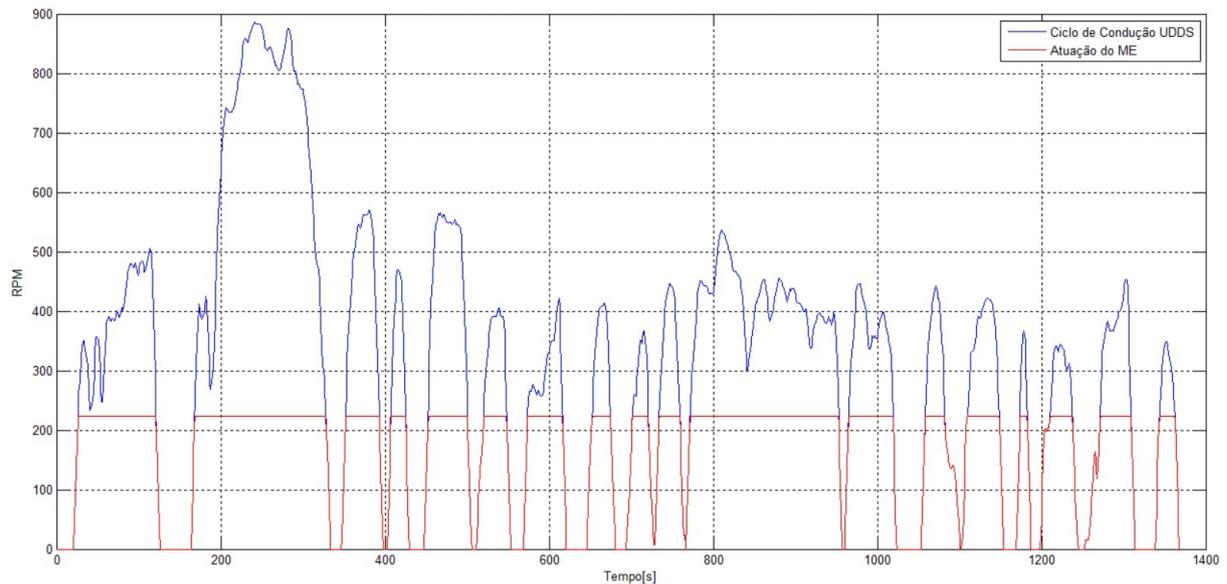


Figura 24 – Azul: Variação da rotação da roda em todo ciclo de condução, Vermelho: Variação da rotação da roda na atuação do ME no ciclo de condução.

A Figura 25 exibe o gráfico com duas curvas no ciclo de condução, a curva em azul apresenta o torque exigido pelo veículo em todo o percurso e a curva em vermelho apresenta o torque solicitado pelo veículo no eixo motriz em primeira marcha. O ME selecionado deve ser capaz de entregar o torque exigido na sua faixa de trabalho. O máximo torque exigido para a faixa de atuação do ME é de aproximadamente  $450 N.m$  no eixo motriz, então cada ME deve ser capaz de entregar um máximo de aproximadamente  $225 N.m$ .

Após diversas pesquisas realizadas, encontrou-se um motor elétrico que respeitava as especificações requeridas de projeto. O motor escolhido é um motor de corrente contínua com imã permanente sem escovas (BLDC - *Permanent Magnet Brushless DC*). Apesar de atender os diversos requisitos de projeto, devido ao diâmetro deste ME a troca das rodas de 13 polegadas para rodas de 14 polegadas será necessária. As configurações deste motor são apresentadas na Tabela 3.

Além de ser um dos poucos motores que atendia as restrições de projeto este motor foi o único que apresentava certificação CE pela SGS (o produto cumpre as rigorosas diretivas comunitárias de segurança dos produtos) e um grau de proteção aceitável para o seu uso, ele segue o padrão da norma DIN 40050<sup>1</sup>. Este motor apresenta uma alta potência

<sup>1</sup> De acordo com sua nomenclatura IP54, o IP significa que segue o grau de proteção internacional, o 5 significa que ele tem completa proteção contra o contato e proteção contra o depósito de poeira perigosa - o ingresso de poeira não é prevenido completamente, entretanto não é permitida a entrada de poeira em quantidade que impeça o funcionamento do aparelho - e o 4 significa que ele tem proteção

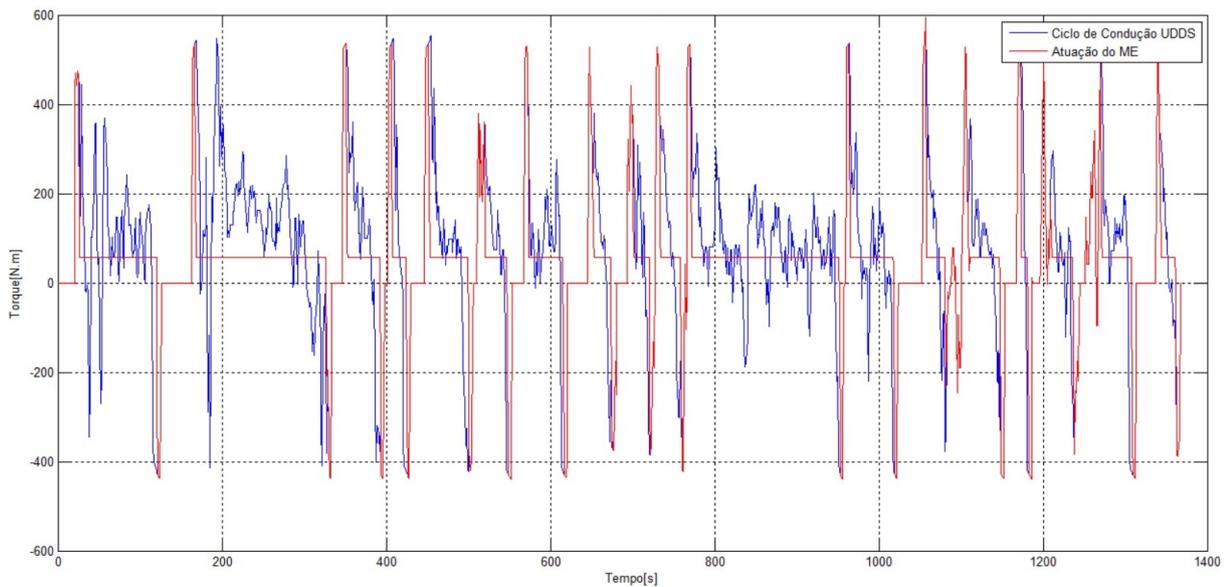


Figura 25 – Azul: Variação do torque exigido ao longo do ciclo de condução, Vermelho: Variação do torque exigido dos ME's ao longo do ciclo de condução.

Tabela 3 – Tabela de características do motor elétrico escolhido.

<b>Especificações do motor elétrico (Quanshun - QSM XX)</b>	
Potência nominal	7000 [W]
Diâmetro do motor	300 [mm]
Tensão	CC 60 [V]
Corrente limite	120 [A]
Torque máximo	250 [N.m]
Velocidade base de rotação	300 [RPM]
Velocidade máxima de rotação	1200 [RPM]
Ângulo de fase	120 [graus]
Eficiência	>85%
Peso bruto	20 [Kg]
Tipo	Ímã Permanente Sem Escovas CC
Grau de Proteção	IP54
Certificação	CE pela SGS

(cerca de  $9.5CV$ ), isto se deve porque estes motores estão ligados diretamente às rodas e não utilizam nenhuma transmissão mecânica para aumentar a potência fornecida por eles. De acordo com as características apresentadas na Tabela 3, o ME tem uma rotação máxima de  $1200RPM$ , deve-se então limitar a velocidade deste veículo em  $110Km/h$  para que este não ultrapasse a velocidade máxima de rotação dos ME's (a esta velocidade a rotação dos ME's será de aproximadamente  $1068 RPM$ ).

A Figura 26 foi plotada com base nas configurações fornecidas pela empresa detentora da venda deste motor. Ela é importante para a determinação da faixa de potência

---

contra o jato de água dirigido diretamente para o aparelho - invólucro - de todas as direções.

requerida pelo ME para seu funcionamento. Para o dimensionamento das baterias deve-se levar em consideração esta potência demandada.

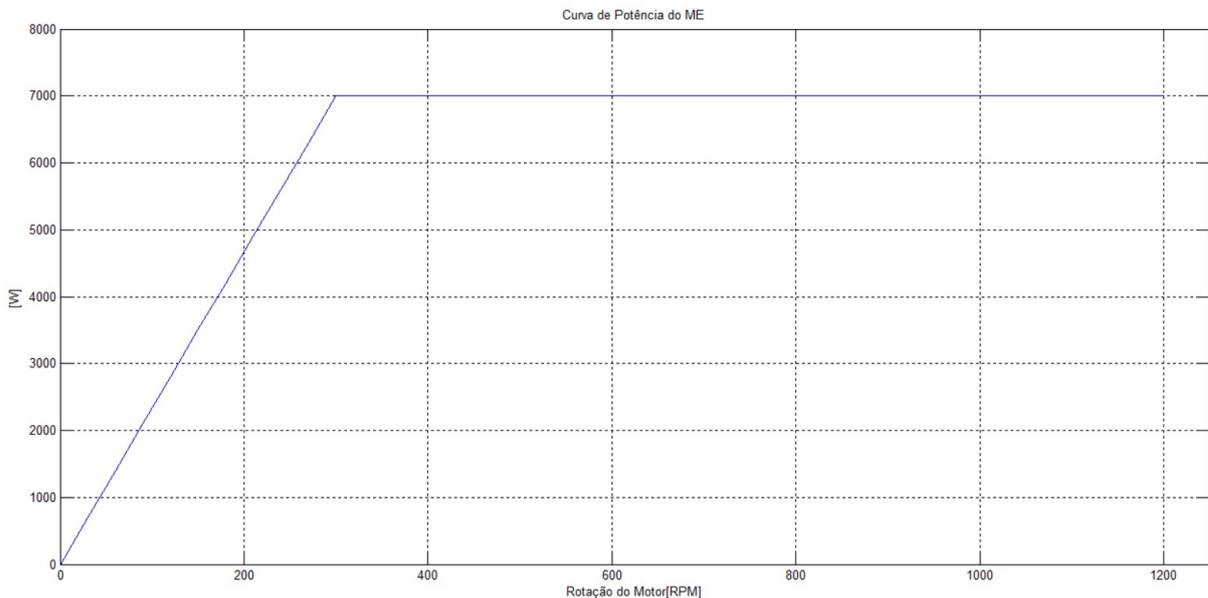


Figura 26 – Curva de potência do ME (Quanshun - QSM XX).

A Figura 27 apresenta o ME selecionado para equipar o sistema de propulsão elétrico do veículo híbrido.



Figura 27 – Motor Elétrico selecionado para equipar o sistema proposto (Quanshun - QSM XX).

A Figura 28 apresenta as vistas do ME que foi modelado utilizando o software CATIA.

A empresa fornecedora do ME selecionado, recomenda a utilização do controlador *KEB72101*, que é comercializado juntamente com o ME. Ele fornece um controle eficiente

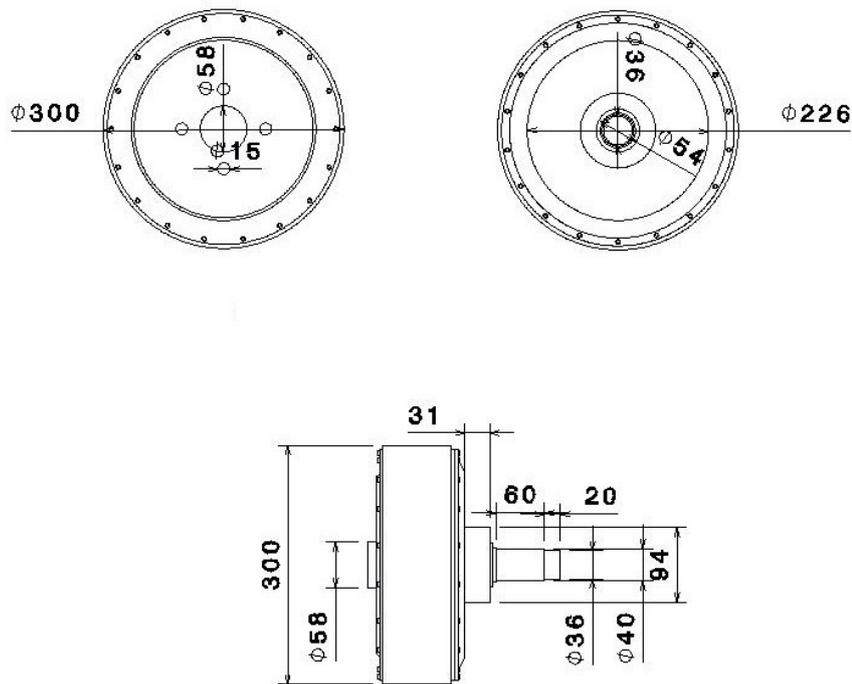


Figura 28 – Desenho técnico do ME modelado em CATIA.

e suave para os ME's, é programável (com funções para se trabalhar no modo reverso e com suporte para a frenagem regenerativa) e ainda consegue limitar a corrente da bateria de acordo com o desejado. Ele traz em seu circuito um potente microprocessador que faz o controle preciso das tarefas, utiliza MOSFET de alta potência e faz uso da modulação PWM para apresentar uma eficiência de 99%. Abaixo são listadas algumas das características deste controlador:

- Apresenta o monitoramento da tensão das baterias (pode-se programar para o ME parar se a tensão das baterias estiver em um certo limite);
- Controle de temperatura para proteção do circuito;
- Velocidade máxima reversa limitada para a metade da velocidade máxima para frente;
- Controle do limite de torque e corrente;
- Retificação síncrona,
- Um controlador utilizado para cada motor;

A Tabela 4 apresenta as características de trabalho deste controlador.

A Figura 29 apresenta o controlador do ME que equipará sistema proposto.

Tabela 4 – Especificações do controlador KEB72101.

<b>Controlador Kelly - KEB72101</b>	
Variação da tensão de alimentação	18 a 90 [V]
Corrente de pico	450 [A] por 10 [s]
Limite de faixa contínua de corrente	180 [A]
Eficiência	99%
Frequência de operação	16.6 [Hz]
Consumo de corrente em modo <i>Standby</i>	<2 [mA]
Faixa de temperatura de operação	-30 a 90[°C]
Dimensões L x A x C	146 x 62 x 172[mm]



Figura 29 – Controlador do ME selecionado para equipar o sistema proposto (Kelly - KEB 72101).

## 4.5 Dimensionamento do Banco de Baterias

O dimensionamento do banco de baterias é sem dúvidas um dos principais pontos deste trabalho. Após ter definido o ciclo de condução que seria adotado, os cálculos para determinar qual seria a potência, tensão e corrente necessários para o funcionamento do motor, qual seria a energia gasta no ciclo proposto e tendo como restrição o espaço de armazenamento físico das baterias, pode-se realizar o cálculo do dimensionamento das mesmas. De acordo com (TANAKA, 2013), o peso e o volume das baterias podem ser facilmente calculados a partir do consumo de energia (Wh/Km) do veículo e da densidade de energia (Wh/Kg, Wh/L) da bateria descarregada sobre o ciclo de condução utilizado.

Para o funcionamento do ME, as baterias devem fornecer uma tensão de 60V. De acordo com a Figura 24 a rotação máxima em aceleração que o ME atingirá será de aproximadamente 230RPM e observando a Figura 26 isso equivale a uma potência máxima de aproximadamente 5.5KW para cada motor. Mas levando em consideração a eficiência do ME e do controlador e também as perdas do condutor, essa potência sobe para um valor de 16.5KW que o banco de baterias deverá fornecer. Como a tensão e a potência necessárias para o funcionamento do motor neste ciclo já estão definidas a

corrente é facilmente calculada de acordo com a Equação 4.1, resultando em um valor de aproximadamente  $137.5A$  para alimentar cada motor. O banco de baterias deve então ser dimensionado para servir uma tensão de  $60V$  e uma corrente de aproximadamente  $275A$  por um período de cerca de 424 segundos (período em que o ME será utilizado por dia - 4 ciclos de condução completos).

$$I = \frac{P}{V} \quad (4.1)$$

A Figura 30 foi gerada de acordo com o ciclo de condução utilizado, na curva em azul ela apresenta a potência requerida pelo eixo motriz ao longo de todo percurso e na curva em vermelho apresenta a faixa de potência solicitada em primeira marcha.

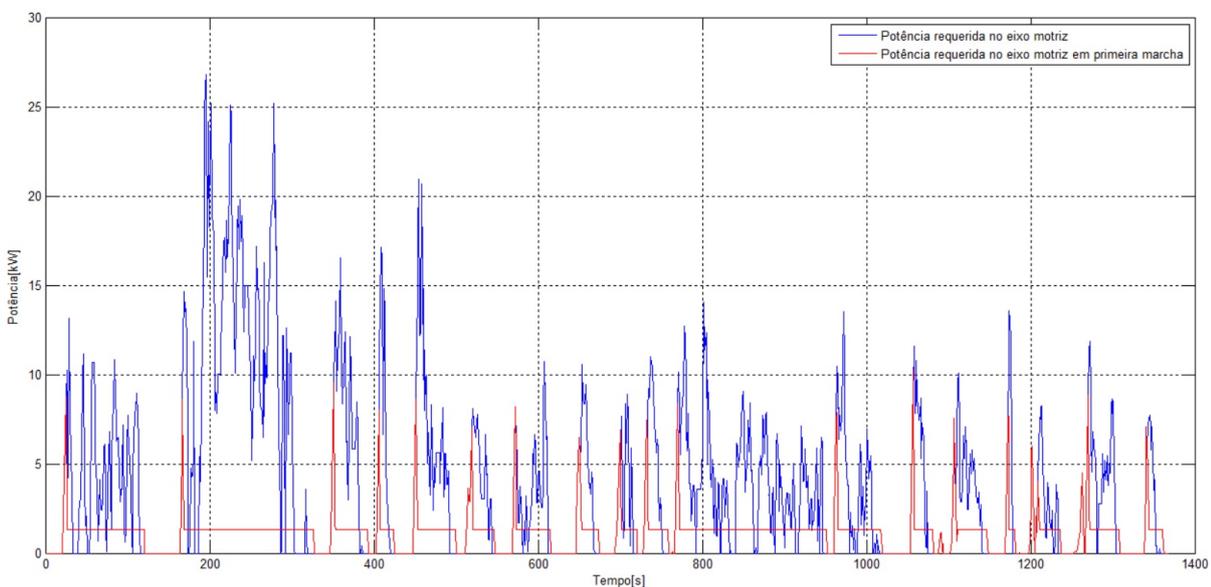


Figura 30 – Azul: Variação da potência exigida ao longo do ciclo de condução, Vermelho: Variação da potência exigida dos ME's ao longo do ciclo de condução.

Durante as pesquisas realizadas foram analisados vários tipos de baterias utilizadas atualmente nos VHE's e VE's. Foi um período intenso de busca por fornecedores de baterias utilizadas nestes veículos. A Tabela 5 apresenta as principais baterias pesquisadas e suas características - o preço de todas as baterias estão dólares pelo fato de que a grande maioria destas baterias são importadas.

A bateria que está em destaque com a letra azul foi a que apresentou as melhores condições dentre os fatores de escolha - peso, dimensões, custo, ciclo de vida, tensão e capacidade. As baterias de chumbo-ácido apresentam um ciclo de vida e preço reduzido se comparado com os outros dois modelos de baterias.

A Figura 31 apresenta a imagem da bateria de *Chumbo-Ácido* que foi selecionada dentre todas as baterias pesquisadas. Ela foi a que apresentou uma alta capacidade [ $A.h$ ],

Tabela 5 – Tabela de comparação das características das baterias pesquisadas.

Bateria	Tensão [V]	Capacidade [A.h]	Massa unitária [Kg]	Preço unitário [\$]	Dimensões[mm] L x C x A	Ciclos de vida	Total de baterias	Preço total [\$]	Massa total [Kg]
LiFePO4	3.2	20	0.55	44.1	9.5 x 160 x 240	2000	266	11730.60	146.3
LiFePO4	24	60	20	2000.00	260 x 180 x 247	2000	15	30000.00	300
Lítio-Ion	3.2	40	1.4	58.00	46 x 116 x 181	3000	133	7714.00	186.2
Lítio-Ion	3.2	60	2	87.00	44 x 115 x 245	3000	95	8265.00	190
Lítio-Ion	3.2	180	5.7	261.00	71 x 180 x 280	3000	38	9918.00	216.6
Lítio-Ion	3.2	100	5.7	145.00	67 x 142 x 219	3000	57	8265.00	324.9
Lítio-Ion	3.2	10	3.5	160.00	74 x 145 x 175	2000	84	13440.00	294
Lítio-Ion	48	20	12	520.00	160 x 210 x 290	2000	28	14560.00	336
Lítio-Ion	36	10	4.5	210.00	80 x 130 x 270	2000	56	11760.00	252
LiFePO4	3.2	40	1.4	55.20	46 x 116 x 181	2000	133	7341.60	186.2
LiFePO4	3.2	60	2	82.80	44 x 115 x 240	2000	95	7866.00	190
LiFePO4	3.2	100	3.4	138.00	67 x 142 x 219	2000	57	7866.00	193.8
LiFePO4	3.2	180	5.7	248.00	71 x 180 x 280	2000	38	9424.00	216.6
LiFePO4	3.2	40	1.5	64.00	46 x 116 x 180	2000	133	8512.00	199.5
LiFePO4	3.2	60	2	96.00	41 x 115 x 244	2000	95	9120.00	190
LiFePO4	3.2	100	3.4	155.00	67 x 142 x 216	2000	57	8835.00	193.8
LiFePO4	3.2	180	5.7	279.00	71 x 180 x 279	2000	38	10602.00	216.6
LiFePO4	3.2	40	1.4	60.00	67 x 140 x 216	2000	133	7980.00	186.2
LiFePO4	3.2	70	3.4	95.00	67 x 140 x 216	2000	76	7220.00	258.4
LiFePO4	3.2	100	3.4	140.00	67 x 140 x 216	2000	57	7980.00	193.8
LiFePO4	3.2	180	5.6	252.00	71 x 180 x 280	2000	38	9576.00	212.8
LiFePO4	3.2	130	4.4	182.00	56 x 182 x 275	2000	57	10374.00	250.8
Lítio-Ion	3.2	20	0.5	70.00	72.5 x 160 x 227	3000	266	18620.00	132
Lítio-Ion	3.2	200	5.8	230.00	69 x 180 x 280	200	38	8740.00	220.4
Chumbo-Ácido	12	90	25	172.00	171 x 226 x 320	500	20	3440.00	500
Lítio-Ion	3.2	40	1.5	46.00	46 x 116 x 186	2000	133	6118.00	199.5
Lítio-Ion	3.2	100	3.15	115.00	61 x 142 x 221	2000	57	6555.00	179.5
Chumbo-Ácido	12	60	15	108.00	175 x 175 x 244	500	25	2700.00	375

um dos menores preços levando em consideração o seu ciclo de vida, quanto a massa total apesar de estar um pouco alta, será feito o dimensionamento dos freios e da mola para que este veículo suporte este acrescimento de massa. Um dos fatores que destacou a sua seleção foi a quantidade de baterias que deverão ser utilizadas para alcançar a tensão e a corrente desejada nos motores, que é de 25 unidades utilizando assim uma quantidade menor do espaço disponível para o armazenamento do banco de baterias.



Figura 31 – Bateria selecionada para equipar o sistema proposto (SL60DD).

## 4.6 Modelo CAD

O *CAD* tem como intuito mostrar ao leitor na forma digital os variados componentes, sistemas ou mesmo o produto final de um projeto. A Figura 32 exibe a modelagem *CAD* da parte traseira original do veículo utilizado (rodas, pneus, sistema de suspensão e freio).

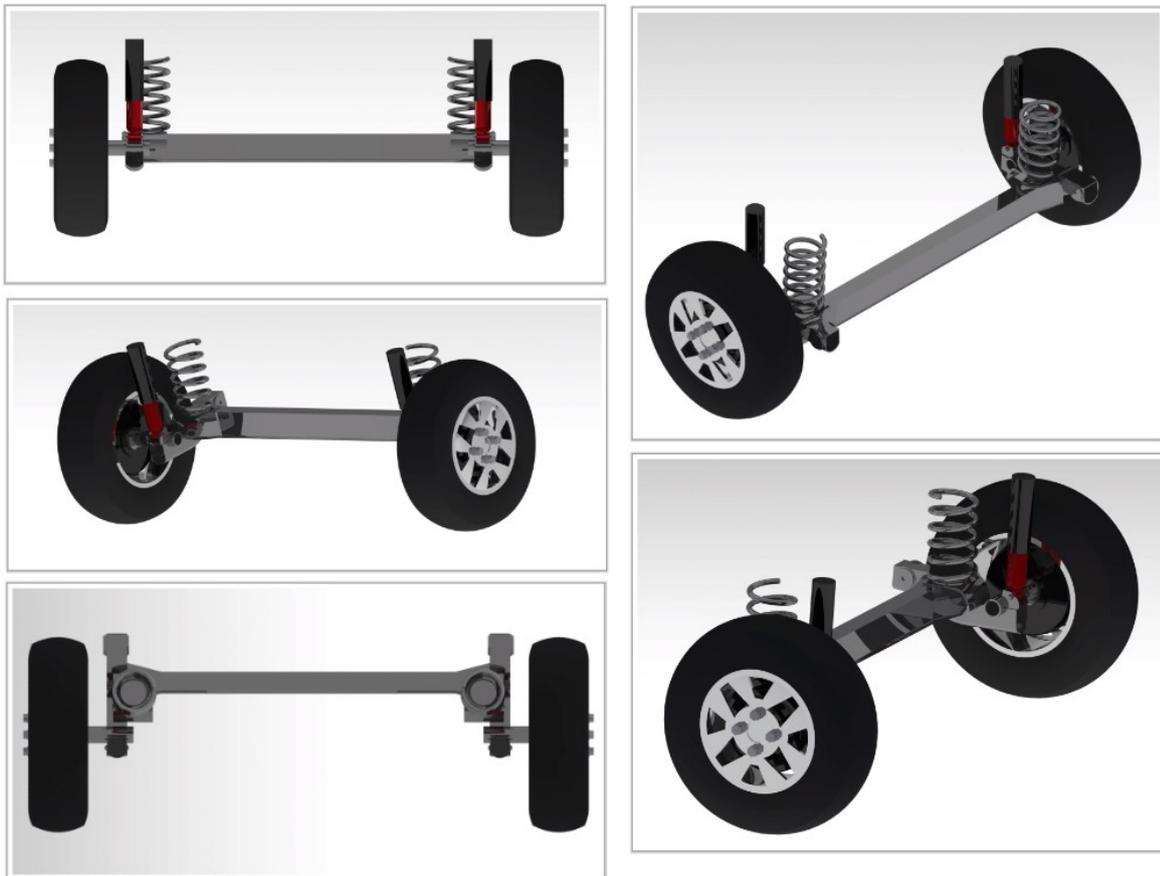


Figura 32 – Modelo CAD apresentando a parte traseira do veículo utilizado.

A partir do sistema original a modelagem do sistema de propulsão elétrico foi feita. Algumas modificações serão efetuadas neste sistema original, como a troca do sistema de freios - substituição do freio a tambor pelo freio a disco, redução do eixo para implementação do ME e a substituição das rodas e pneus 13 polegadas para 14 polegadas. As Figuras 33 e 34 apresentam o modelo *CAD* dos sistema proposto.

A Figura 35 apresenta o modelo *CAD* com as baterias para se ter uma dimensão deste sistema (todos os componentes foram modelados em tamanho real).

## 4.7 Manutenção

A manutenção do sistema de propulsão elétrico deste veículo deve ser realizada apenas em oficinas especializadas e por profissionais autorizados que seguem as determi-



Figura 33 – Modelo CAD apresentando a proposta do VHE com ME nos cubos de rodas.



Figura 34 – Modelo CAD apresentando o eixo com o ME em destaque.

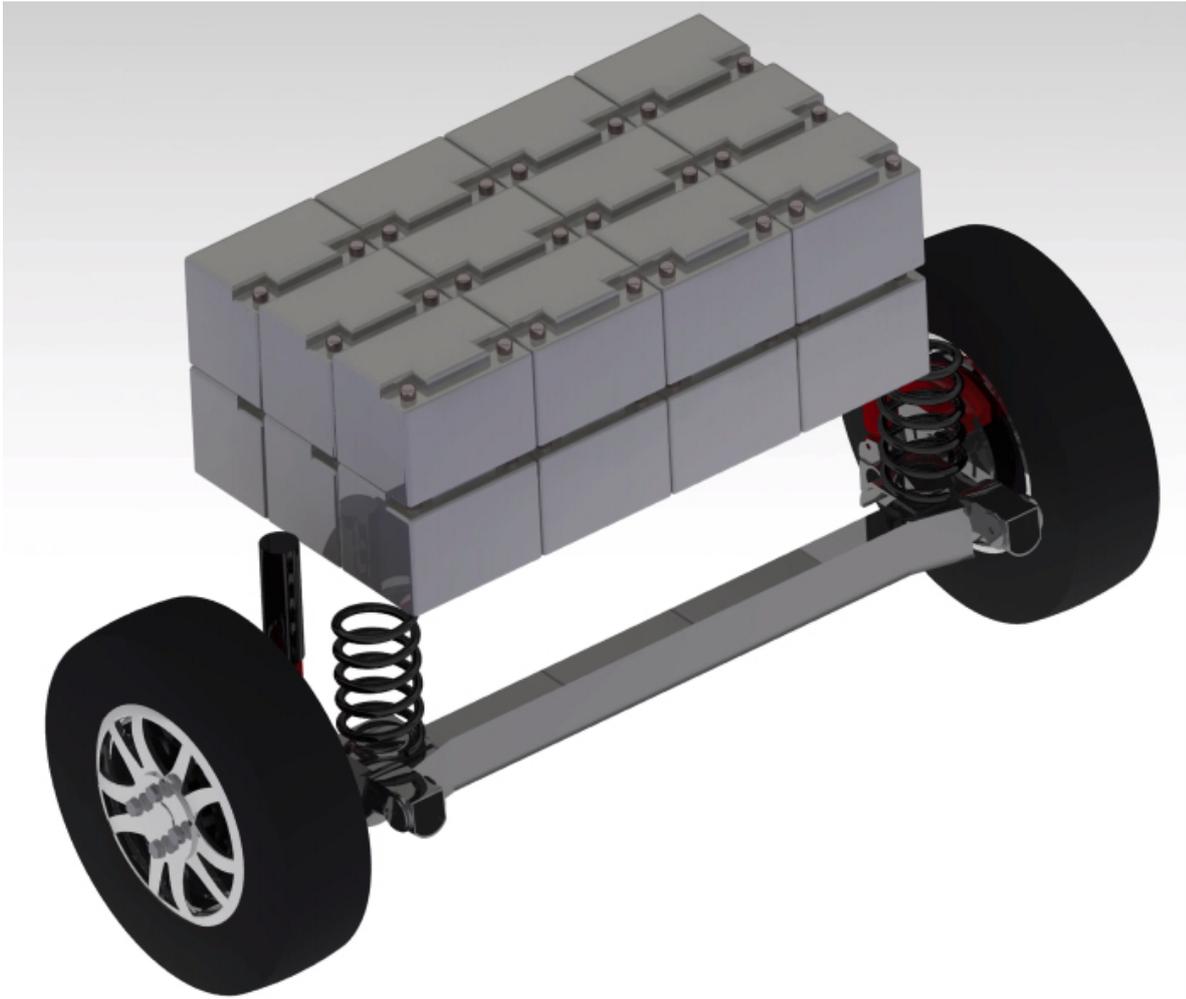


Figura 35 – Modelo CAD apresentando o sistema já com o banco de baterias.

nações da NR10. Esta norma estabelece os requisitos e condições mínimas objetivando a implementação de medidas de controle e sistemas preventivos, de forma a garantir a segurança e a saúde dos trabalhadores que, direta ou indiretamente, interajam em instalações elétricas e serviços com eletricidade (MTE, 2004).

## 5 Resultados

A seguir serão apresentados os resultados obtidos a partir dos dados coletados, dos requisitos de projeto e de muita pesquisa envolvendo as variáveis de projeto.

A tabela 6 apresenta as reações estáticas nos eixos dianteiro e traseiro e a comparação dos valores do desempenho do veículo com a tração dianteira (MCI) e com a tração traseira (ME) em velocidade. Vale lembrar que está comparação é feita baseada nos dois veículos (o veículo em questão com a tração dianteira se refere ao veículo original com aumento da massa de 4 passageiros de  $80Kg$  cada, e o veículo com a tração traseira se refere ao veículo híbrido com aumento da massa de 4 passageiros de  $80Kg$  cada, mais a massa do sistema de propulsão elétrico), e a parte em velocidade se refere a velocidades baixas dos dois modelos. As equações da seção 2.3 são utilizadas para a elaboração desta tabela .

Tabela 6 – Tabela de desempenho do veículo.

Condição de deslocamento do veículo		Variável	Unidade	Tipo de tração		
		-	-	Dianteira (MCI)	Traseira (ME)	
Estacionado	Plano	$a_I$	$m$	1.49	1.062	
		$a_{II}$	$m$	0.87	1.298	
		$R_I$	$N$	4609.72	9091.42	
		$R_{II}$	$N$	7848.98	7438.43	
	Rampa acima	$\alpha$	$\%$	15.57	22.5	
		$R_I$	$N$	8068.25	7831.84	
		$R_{II}$	$N$	3933.45	7440.33	
		$\alpha$	$\%$	31.58	23.71	
		Rampa abaixo	$R_I$	$N$	2937.20	7316.03
			$R_{II}$	$N$	7676.27	7818.88
	Em velocidade	$F_m$	$N$	3492.09	6873.41	
		$\Delta G$	$N$	501.38	1057.91	
		$R_I$	$N$	4108.34	8033.51	
		$R_{II}$	$N$	8350.36	8496.34	
$a_{m\acute{a}x}$		$m/s^2$	1.24	1.96		
$\alpha$		$\%$	14.86	22.87		

## 5.1 Modificações feitas

### 5.1.1 Freios traseiros

A frenagem regenerativa tem efeitos de travagem, mas não pode substituir o freio mecânico. O freio mecânico é requisitado para parar o veículo. O freio regenerativo não é uma opção muito segura para parar o veículo em uma ocasião de necessidade, pois se a exigência do ME for muito alta pode ocorrer do controlador desligar-se para proteger o sistema elétrico. Estes dois sistemas trabalham juntos para uma melhor eficácia da frenagem.

Os freios traseiros originais deste veículos são do tipo tambor, estes deverão ser substituídos por freios a disco por conta do espaço ocupado pelos ME's. De acordo com as equações apresentadas por (BORNHOLD, 2012) os cálculos do dimensionamento do sistema de freio serão feitos.

Para o peso máximo do veículo leva-se em consideração a massa das baterias e o veículo sendo ocupado por 4 passageiros:

$$W = m \cdot g = 16529.85N \quad (5.1)$$

Peso sobre o eixo dianteiro é dado por:

$$W_{fs} = m \cdot (1 - x) \cdot g = 7440.88N \quad (5.2)$$

E o peso sobre o eixo traseiro é:

$$W_{rs} = W - W_{fs} = 9088.97N \quad (5.3)$$

De acordo com (NICOLAZZI; LEAL; ROSA, 2008) a desaceleração média para freios perfeitamente regulados com pneus novos e calibrados no plano, em estrada asfaltada com rugosidade normal e seca, e a carga bem distribuída é de:

$$a_c = 7m/s^2 \quad (5.4)$$

A transferência de carga dinâmica para o eixo dianteiro é:

$$W_f = W_{fs} - W \cdot \left( \frac{-a_c}{g} \cdot \frac{h}{L} \right) = 9230.47N \quad (5.5)$$

A transferência de carga dinâmica resultante no eixo traseiro é:

$$W_r = W_{rs} + W \cdot \left( \frac{-a_c}{g} \cdot \frac{h}{L} \right) = 7299.38N \quad (5.6)$$

Com os dados dos pesos dinâmicos na frenagem definidos, deve-se seguir as equações abaixo para o sistema de freio na dianteira. Tem-se que a força aplicada na roda dianteira é:

$$F_p = W_f \cdot \mu = 7845.9N \quad (5.7)$$

O raio do pneu utilizado na dianteira tem raio de  $0.2853m$ . Multiplicando a força aplicada pelo raio, tem-se que o valor do momento aplicado no disco da roda dianteira é:

$$M_{fP} = F_p \cdot R_p = 2238.43N \quad (5.8)$$

O disco de freio da roda dianteira tem raio de  $0.14m$ . Então a força aplicada no disco é:

$$F_D = \frac{M_{fP}}{R_D} = 15988.82N \quad (5.9)$$

De acordo com (SHIGLEY; MISCHKE; BUDYNAS, 2005), o coeficiente de atrito entre as pastilhas e o disco é geralmente de 0.3. Tem-se então que a força aplicada na pastilha é:

$$F_{pastilha} = F_D \cdot \mu_{freio} = 4796.65N \quad (5.10)$$

A pressão no sistema é dada por:

$$P_{sistema} = \frac{F_{pastilha}}{A_{embolo} \cdot n_{embolo}} = 4796647.33Pa \quad (5.11)$$

E a força aplicada no cilindro mestre é de:

$$F_{cilindro} = P_{sistema} \cdot A_{cilindro} = 47966.47N \quad (5.12)$$

Para o sistema de freio na traseira, deve-se seguir as equações abaixo. Tem-se que a força aplicada na roda traseira é:

$$F_p = W_r \cdot \mu = 6204.47N \quad (5.13)$$

O pneu utilizado na traseira é o mesmo da dianteira, então o raio é de  $0.2853m$ . Multiplicando a força aplicada pelo raio, tem-se que o valor do momento aplicado no disco da roda traseira é: O momento aplicado no disco da roda traseira é:

$$M_{rP} = F_p \cdot R_p = 1770.13N \quad (5.14)$$

Sabe-se que quanto maior o braço de alavanca, menor será o esforço. Baseado neste princípio, adota-se o maior raio do disco de freio da roda traseira comportado no sistema, que é de  $0.11m$ . A força aplicada no disco é de:

$$F_D = \frac{M_{rP}}{R_D} = 16092.14N \quad (5.15)$$

Utiliza-se o mesmo coeficiente de atrito da parte dianteira, tem-se que a força aplicada na pastilha da pinça é:

$$F_{pastilha} = F_D \cdot \mu_{freio} = 4827.64N \quad (5.16)$$

A pressão no sistema é:

$$P_{sistema} = \frac{F_{pastilha}}{A_{embolo} \cdot n_{embolo}} = 4827643.24Pa \quad (5.17)$$

E a força aplicada no cilindro mestre é:

$$F_{cilindro} = P_{sistema} \cdot A_{cilindro} = 48276.43N \quad (5.18)$$

De acordo com os estudos realizados por(JUNIOR, 2014), quando a solicitação de desaceleração for entre  $0.15G$  e  $0.3G$ , a frenagem regenerativa pode atuar sozinha para parar o veículo e quando a solicitação for superior a força de frenagem regenerativa o restante da força é acrescentado pelo freio mecânico. Este auxílio do freio regenerativo apresenta uma queda no desgaste dos componentes mecânicos do freio convencional.

Como foi discutido nos cálculos anteriores, o raio do disco de freio traseiro será de de 110 milímetros e largura de 10 milímetros, pois estas são as dimensões máximas para que não haja interferência com outros componentes. Quanto ao conjunto pinça e pastilhas a largura máxima permitida sem ocorrer interferência com outros componentes é de 70 milímetros e a altura é de 45 milímetros.

### 5.1.2 Molas traseiras

A mudança das molas deverá ser feita por conta do aumento da massa das baterias alocadas no porta-malas. Para o cálculo das novas baterias levou-se em consideração os cálculos propostos por (MACORIN, 2006), onde encontrou-se a constante elástica da mola original ( $k_{original}$ ) a partir da equação 5.19 e também foi calculado a constante elástica da nova mola ( $k_{modificada}$ ) pela equação 5.20.

$$k_{original} = \frac{(f_{veículo} \cdot \frac{d_2}{d_1} \cdot 2 \cdot \pi)^2 \cdot m}{\sin(\theta)} = 1394KN/m \quad (5.19)$$

$$k_{modificado} = \frac{(f_{veículo} \cdot \frac{d_2}{d_1} \cdot 2 \cdot \pi)^2 \cdot m}{\sin(\theta)} = 2748KN/m \quad (5.20)$$

Onde:

$f_{veículo}$  é a Frequência no veículo;

$d_2$  é a Distância do vínculo do eixo até o ponto de fixação da mola;

$d_1$  é a Distância do vínculo de do eixo até o ponto de contato com o solo;

$m$  é a Massa suspensa do veículo;

$\theta$  é o Ângulo formado entre o amortecedor e uma linha imaginária paralela ao solo que passe pelo vínculo do amortecedor com o eixo.

Comparando os resultados obtidos nas equações 5.19 e 5.20, fica evidente que as molas traseiras deverão ser substituídas por molas que respeitem a nova constante elástica calculada.

### 5.1.3 Eixo traseiro

Para implementação dos ME's, foi feita uma pequena mudança no eixo traseiro do veículo. Cortou-se 156 milímetros da ponta do eixo onde era fixado o cubo da roda juntamente com o freio a tambor, para poder fixar sem nenhum acréscimo de largura o ME. A Figura 36 apresenta o eixo antigo na parte esquerda e o eixo com as modificações pela parte direita. Foi feito também na ponta do eixo um suporte para a fixação do ME com parafusos.

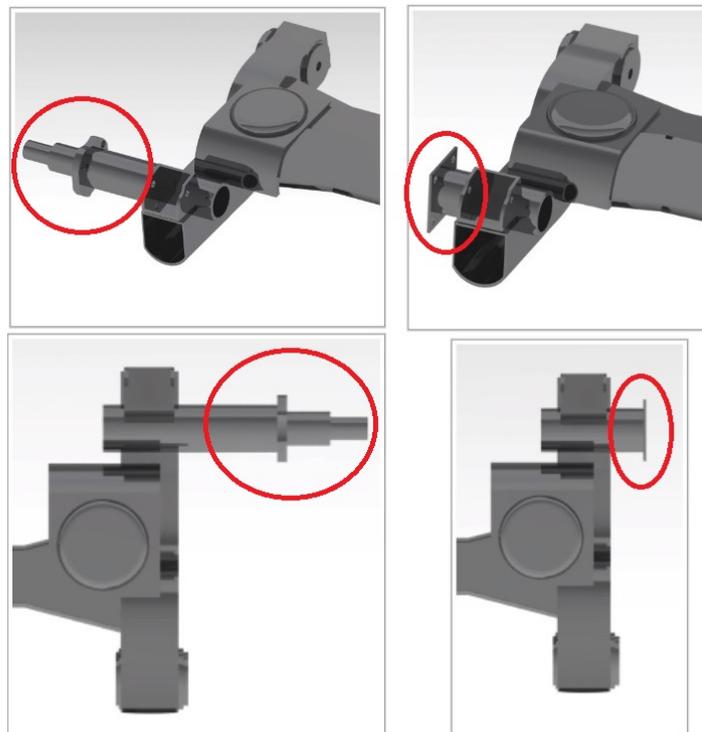


Figura 36 – Esquerda: Eixo original, Direita: Eixo com o corte para fixação do ME.

### 5.1.4 Rodas e pneus

As rodas originais deste veículo são de 13 polegadas. Por conta do diâmetro do ME selecionado as rodas deverão ser trocadas para rodas de 14 polegadas e elas devem

ter *offset* positivo devido a espessura do ME. Apesar dos ME's serem instalados apenas na parte traseira, as 4 rodas serão trocadas. E substituindo as rodas deve-se substituir os pneus também. Os dados dos componentes originais são apresentados na Tabela 7 e os dados dos novos componentes são apresentados na Tabela 8.

Tabela 7 – Tabela de características dos pneus e rodas originais, retirado de (S.A., 1996-1999).

<b>Características dos pneus e rodas originais</b>	
Largura nominal da seção transversal do pneu	175
Série ou perfil do pneu	70
Diâmetro da roda	13

Tabela 8 – Tabela de características dos novos pneus e rodas.

<b>Características dos novos pneus e rodas</b>	
Largura nominal da seção transversal do pneu	175
Série ou perfil do pneu	70
Diâmetro da roda	14

## 5.2 Consumo MCI

Utilizando a equação 2.35 o veículo utilizado tem como taxa de fluxo de massa de combustível queimado o valor de  $0.0010896 Kg/s$ . Foram realizadas simulações numéricas com o auxílio do software *Matlab*, e pôde-se calcular o consumo de combustível deste veículo no ciclo de condução adotado. Em aproximadamente  $12Km$  houve um consumo total de 1.517 litros de etanol, e nesta simulação o veículo percorreu aproximadamente 7.9 quilômetros com um litro de etanol. Em primeira marcha o consumo foi de 0.2835 litros por ciclo de condução. Neste trabalho está sendo proposto que o veículo percorra 4 ciclos por dia então o consumo diário total de etanol seria de aproximadamente 6.1 litros e em primeira marcha o consumo seria de aproximadamente 1.134 litros.

## 5.3 Consumo ME

Como os ME's não necessitam do etanol para o seu funcionamento o consumo deste combustível é zero enquanto o veículo utilizar como sistema de propulsão o sistema elétrico. A energia utilizada por estes motores é a energia elétrica, e utilizando da Equação 2.25 a Figura 37 foi gerada, apresentando a variação do consumo de energia pelos ME's em seu funcionamento no ciclo de condução.

Novamente utilizando do auxílio de métodos matemáticos, pode-se calcular a energia total consumida pelos ME's em seu período de utilização como sendo o somatório das

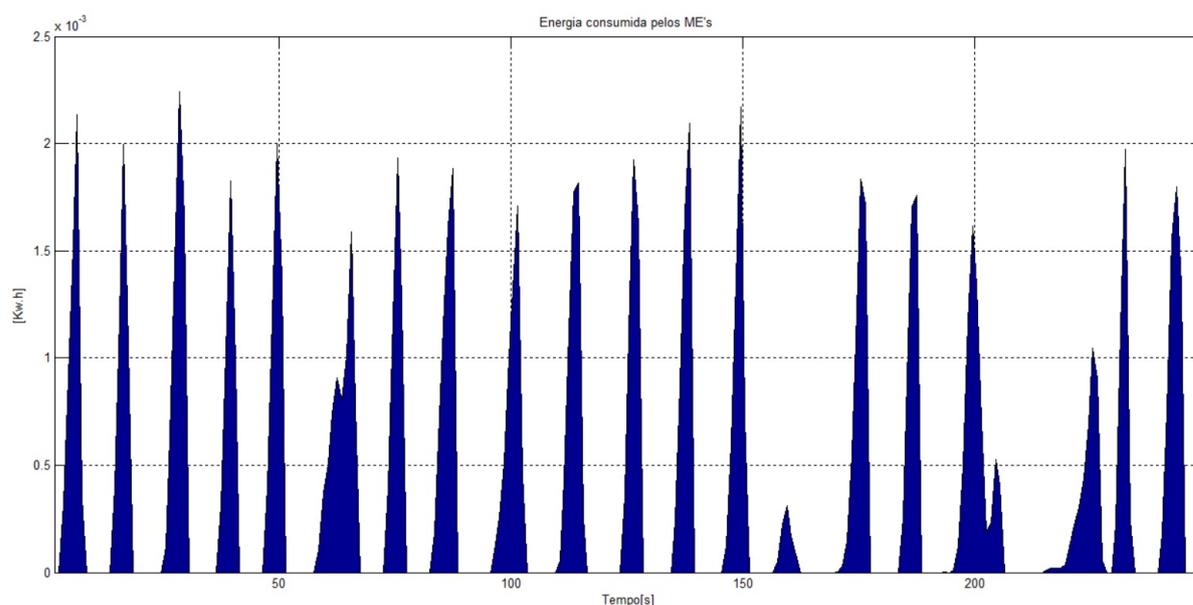


Figura 37 – Variação da energia consumida pelos ME's ao longo do ciclo de condução.

áreas das curvas da Figura 37. O valor obtido é de  $0.1277KW.h$  consumidos em aproximadamente 106 segundos de atuação dos ME's em um ciclo de condução, em 4 ciclos a energia utilizada seria de aproximadamente  $0.5108KW.h$  em 424 segundos, e lembrando que não estamos levando em consideração a energia recuperada pelos freios regenerativos.

## 5.4 Comparação entre os consumos do MCI e ME

Com a proposta de implementação de motores elétricos este veículo passará a economizar o combustível que seria consumido em primeira marcha. Apoiado nesta hipótese a Tabela 9 é apresentada para uma comparação do consumo de etanol do veículo original e do veículo híbrido elétrico em um dia de funcionamento.

Tabela 9 – Tabela de comparação do consumo de etanol entre os veículos.

	Veículo Original	Veículo híbrido Elétrico
Consumo primeira marcha [L]	1.134	0
Consumo total [L]	6.1	4.9
Km/L	7.9	9.72

Com estes dados verifica-se que com o sistema elétrico auxiliando o MCI o veículo será cerca de 23.038% mais econômico que o veículo original.

## 5.5 Custos de aplicação do sistema híbrido

A Tabela 10 apresenta o custo dos principais componentes utilizados para a modificação do veículo original em um VHE.

Tabela 10 – Tabela de custo dos componentes utilizados na implementação do sistema elétrico.

<b>Componente</b>	<b>Custo Unitário</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Custo Total</b>
ME e controlador	\$1293.00	2	\$2586.00
Baterias	\$108.00	25	\$2700.00
Pneus	\$71.00	4	\$284.00
Rodas	\$200.00	4	\$800.00
Molas	\$50.00	2	\$100.00
Sistema de freio a disco	\$300.00	1	\$300.00

Para construir este sistema, o gasto com os componentes será de aproximadamente \$6770.00 dólares.

## 5.6 Cronograma de Trabalho

O cronograma do trabalho que foi realizado é apresentado na Figura 38. Houveram alguns imprevistos que forçaram a mudança do cronograma original, mas os resultados finais ficaram dentro do prazo pretendido desde o início.

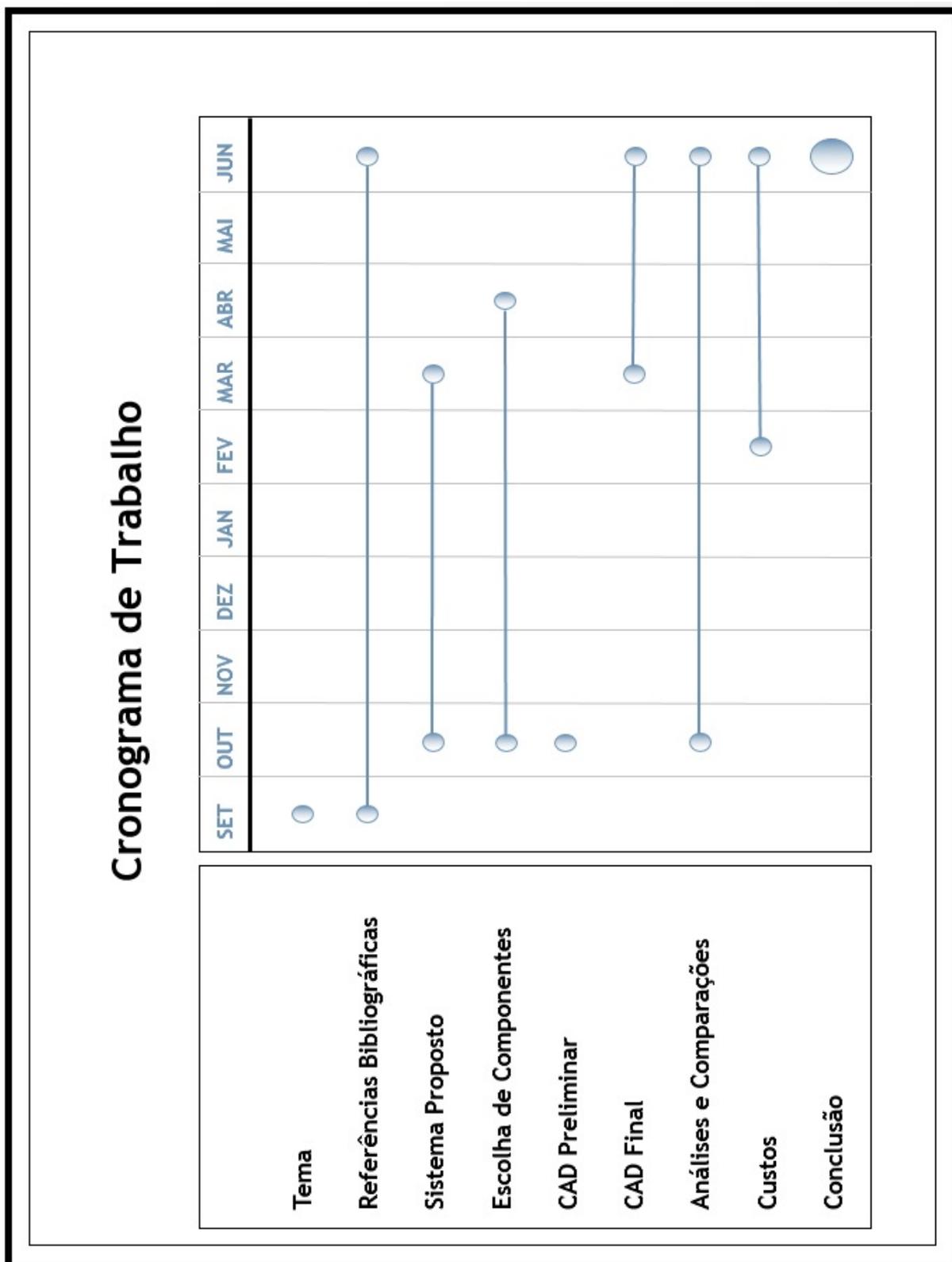


Figura 38 – Cronograma de Trabalho.



## 6 Conclusões e Trabalhos Futuros

Os veículos elétricos e os veículos híbridos elétricos começaram a ter uma visibilidade muito grande nos últimos 10 anos, principalmente por conta das altas taxas de emissões de poluentes que os veículos a motores de combustão interna liberam. Estes veículos voltaram para ocupar o patamar de veículos com baixas ou nulas emissões de gases poluentes e baixo consumo de combustíveis fósseis. Tecnologias estão sendo apresentadas a cada dia que passa para viabilizar estes projetos. Sabe-se que os motores elétricos são muito mais eficientes que os motores a combustão interna, o controle destes motores está ficando cada vez mais eficientes com o avanço da tecnologia, mas infelizmente as baterias ainda são a maior dificuldade para estes veículos. Infelizmente o custo de fabricação dos veículos híbridos elétricos e dos veículos elétricos ainda é um pouco alto se comparado com os veículos com motor a combustão interna.

Por meio deste trabalho apresentei uma proposta de uma provável solução que viabilizasse a conversão de um veículo convencional em um veículo híbrido elétrico. Fazendo um simples cálculo de consumo do etanol em primeira marcha durante 9 anos - que seria a vida útil da bateria de acordo com o consumo previsto dos ME's - chega-se a um valor de  $R\$10875.00$  (supondo que o preço do etanol permaneça a  $R\$2.74$  durante esse tempo). Este seria o valor economizado em combustível durante o período aproximado do ciclo de vida das baterias. O valor do gasto com os componentes para implementação do sistema híbrido é de  $R\$20310.00$ , e o gasto somente com as baterias é de  $R\$8100.00$  (utilizando o preço de 3 Reais para cada Dólar). Com esses valores verifica-se que o dinheiro economizado com o etanol é maior que o gasto com as baterias, ou seja, este sistema é viável e apresenta uma economia de aproximadamente  $R\$2775.00$ .

Conclui-se então que de acordo com os resultados teóricos apresentados, este sistema é viável para a utilização dos ME's em substituição somente da primeira marcha.

Partindo do embasamento teórico apresentado neste trabalho surge esta proposta para um possível trabalho futuro:

- Fazer um estudo verificando se este sistema também é viável em substituição a segunda e terceira marcha.



# Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7024*: Veículos rodoviários automotores leves - medição do consumo de combustível. Rio de Janeiro, 2010. 13 p. Citado na página 53.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6601*: Veículos rodoviários automotores leves - determinação de hidrocarbonetos, monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio, dióxido de carbono e material particulado no gás de escapamento. Rio de Janeiro, 2012. 49 p. Citado na página 53.
- BORNHOLD, A. M. Dimensionamento de um sistema de freio para veículo offroad de pequeno porte. FAHOR - Faculdade Horizontina, 2012. Citado na página 74.
- BOTTURA, C. P.; BARRETO, G. *Veículos Elétricos*. Primeira edição. [S.l.: s.n.], 1989. Citado 3 vezes nas páginas 13, 48 e 50.
- CHAN, C. The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicles. v. 95, p. 704–718, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 50 e 51.
- DENATRAN, D. N. de T. Relatórios do denatran. 2014. Disponível em: <<http://www.denatran.gov.br/frota2014.htm>>. Citado na página 25.
- EDELSTEIN, S. How does gm's fabled ev1 stack up against the current crop of electrics? 2013. Disponível em: <<http://www.digitaltrends.com/cars/how-does-gms-fabled-ev1-stack-up-against-the-current-crop-of-electrics/#ixzz3IQ5iZbA4>>. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 26.
- EHSANI, M. et al. *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles - Fundamentals, Theory, and Design*. First edition. [S.l.: s.n.], 2005. Citado 11 vezes nas páginas 13, 25, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36 e 47.
- HUSAIN, I. *Electric and Hybrid Vehicles - Design Fundamentals*. [S.l.: s.n.], 2005. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 32.
- JANISSE, S.; ENGELMAN, D. Prof. ferdinand porsche created the first functional hybrid car. In: AMERICA, P. C. N. (Ed.). [S.l.: s.n.], 2011. Citado 3 vezes nas páginas 13, 29 e 30.
- JAZAR, R. N. *Vehicle Dynamics - Theory and Application*. Third edition. [S.l.: s.n.], 2009. Citado 4 vezes nas páginas 13, 44, 45 e 46.
- JUNIOR, V. N. Estudo das principais vantagens do uso da frenagem regenerativa em veículos híbridos. Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, 2014. Citado na página 76.
- LARMINIE, J.; LOWRY, J. *Electric Vehicle Technology Explained*. First edition. [S.l.: s.n.], 2003. Citado na página 51.
- MACORIN, R. B. Estudo sobre suspensão automotiva focado em veículos off-road. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006. Citado na página 76.

- MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. *NR 10: Segurança em instalações e serviços em eletricidade*. Brasília, 2004. 13 p. Citado na página 72.
- NICOLAZZI, L. C.; LEAL, L. da C. M.; ROSA, E. da. Uma introdução à modelagem quase-estática de veículos automotores de rodas. In: . GRANTE - UFSC: [s.n.], 2008. Citado 9 vezes nas páginas 13, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43 e 74.
- PAINE, C. Who kill the electric car? 2006. Citado na página 26.
- PEREIRA, A. de M. Sistema de tração de um ônibus elétrico híbrido com pilhas a combustível e baterias. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007. Citado na página 25.
- RILEY, R. Automobile ride, handling and suspension design with implications for low mass vehicles. 1999–2005. Citado na página 61.
- ROCHA, A. M. A. da. Conversão de um renault twingo em veículo elétrico: Sistema de alimentação. FEUP - Faculdade de Engenharia - Universidade do Porto, 2013. Citado na página 51.
- S.A., F. A. *Fiat Palio - Uso e Manutenção*. Betim, Brasil, 1996–1999. 287 p. Citado 4 vezes nas páginas 15, 55, 58 e 78.
- SCHALKWYK, D. V.; KAMPER, M. Effect of hub motor on stability and comfort of electric vehicles. University of Stellenbosch, 2006. Citado na página 61.
- SHIGLEY, J. E.; MISCHKE, C. R.; BUDYNAS, R. G. *Projeto de Engenharia Mecânica*. Sétima edição. [S.l.: s.n.], 2005. Citado na página 75.
- SÁNCHEZ, F. Z. Eficiência energética de veículos elétricos híbridos em série. PUC-Rio, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 34, 35 e 36.
- SOUZA, R. B. de. Uma visão sobre o balanço de energia e desempenho em veículos híbridos. Unicamp, 2010. Citado 3 vezes nas páginas 43, 52 e 53.
- STONE, R. *Introduction to Internal Combustion Engines*. Third edition. [S.l.: s.n.], 1999. Citado na página 46.
- TANAKA, C. N. Metodologia de dimensionamento do sistema de tração para veículos elétricos. Universidade de São Paulo, 2013. Citado 3 vezes nas páginas 51, 53 e 67.
- TIE, S. F.; TAN, C. W. Renewable and sustainable energy reviews. v. 20, p. 82–102, 2013. Citado 3 vezes nas páginas 13, 51 e 52.
- WAKEFIELD, E. History of the electric automobile: Hybrid electric vehicles. In: (SAE), S. of A. E. (Ed.). [S.l.: s.n.], 1998. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 30.
- WEB, C. na. Ficha técnica - fiat palio 1998. 2015. Disponível em: <<http://www.carrosnaweb.com.br>>. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 55.
- XUE, X.; CHENG, K.; CHEUNG, N. Selection of electric motor drives for electric vehicles. Hong Kong Polytechnic University, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 48 e 49.
- ZERAOULIA, M.; BENBOUZID, M. E. H.; DIALLO, D. Electric motor drive selection issues for hev propulsion systems: A comparative study. v. 55, p. 1756–1764, 2006. Citado 4 vezes nas páginas 13, 48, 49 e 50.