

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA  
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELETRÔNICA**

**JULIO CESAR BORTOLINI RODRIGUES**

**DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE TRAÇÃO PARA VEÍCULOS  
ELÉTRICOS - TRAÇÃO DIANTEIRA *IN-WHEEL***

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PONTA GROSSA**

**2017**

**JULIO CESAR BORTOLINI RODRIGUES**

**DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE TRACÇÃO PARA VEÍCULOS  
ELÉTRICOS - TRACÇÃO DIANTEIRA *IN-WHEEL***

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado(a) como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Eletrônica, do Departamento Acadêmico de Eletrônica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientadora: Profa. Dra. Fernanda Cristina Correa

**PONTA GROSSA**

**2017**



Ministério da Educação  
**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**  
Câmpus Ponta Grossa  
Diretoria de Graduação e Educação Profissional  
Departamento Acadêmico de Eletrônica  
Bacharelado em Engenharia Eletrônica



## **TERMO DE APROVAÇÃO**

**DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE TRACÇÃO PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS -  
TRACÇÃO DIANTEIRA *IN-WHEEL***

por

**JULIO CESAR BORTOLINI RODRIGUES**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 21 de junho de 2017 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Eletrônica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Profa. Dra. Fernanda Cristina Correa  
Orientadora

Prof. Dr. Angelo Marcelo Tuset  
Membro Titular

Prof. Dr. Max Mauro Dias Santos  
Membro Titular

Prof. Dr. Josmar Ivanqui  
Responsável pelos TCC

Prof. Me. Jeferson José Gomes  
Coordenador do Curso

Dedico este trabalho a minha família, em especial à minha mãe, e aos meus amigos, pelos momentos de ausência.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço a Deus, pela vida e pelas oportunidades que tem me proporcionado.

Agradeço aos meus pais Antonio e Irene, pelo amor, atenção e apoio dedicados a mim.

Agradeço aos meus irmãos Raquel e Claudio, por todo o apoio e incentivo, sem o qual não conseguiria concluir a graduação.

A minha orientadora professora Dr.<sup>a</sup> Fernanda Cristina Correa, pela paciência e dedicação nos momentos difíceis, e por todo o conhecimento repassado.

Ao meu orientador de estágio professor Dr.<sup>o</sup> Eloi Agostini Junior, pela paciência dedicação, e conhecimento que adquiri no período de convivência.

Agradeço aos amigos conquistados durante o curso, André, Carlos, Dênis, Diego, Elton, Fernando, Igor, Lucas, Rodrigo, Oscar, pelos momentos de descontração, conhecimentos compartilhados e amizade dedicada.

Agradeço pela contribuição direta e indireta dos demais professores e funcionários do Departamento Acadêmico de Eletrônica e da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Ponta Grossa.

Agradeço aos colegas de trabalho pelo apoio e amizade.

Enfim, a todos os amigos e familiares, agradeço pelo apoio e incentivo.

Obrigado mesmo por tudo!!!

Aos outros dou o direito de ser como são.

E a mim, dou o dever de ser cada dia

melhor (XAVIER, Chico).

## RESUMO

RODRIGUES, Julio Cesar Bortolini. **Dimensionamento do Sistema de Tração para Veículos Elétricos - Tração Dianteira *In-Wheel*** . 2017. 103 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Eletrônica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2017.

Alguns fatores como preocupações com o meio ambiente, eficiência energética, avanço das pesquisas relacionadas às fontes de energia e armazenadores que tornam possível o aumento da densidade de energia e de potência desses elementos, tem propiciado o aumento no interesse pelos veículos elétricos. O objetivo deste trabalho é avaliar e apresentar uma metodologia de fácil compreensão para o dimensionamento do sistema de tração de um veículo elétrico, e apresentar que os valores obtidos condizem com as características de componentes de veículos comercialmente constituídos. Neste trabalho, são apresentados resultados para o dimensionamento do sistema de tração de um veículo puramente elétrico, de modo que este sistema atenda os requisitos para que o veículo tenha uma autonomia de 60 km, atendendo o ciclo de condução brasileiro NBR 6601. Outra importância deste trabalho está em apresentar a possibilidade de reduzir custos e tempo na construção de protótipos, fator este fundamental para reduzir custos de produção e conseqüentemente acarreta em redução no valor repassado ao consumidor.

**Palavras-chave:** Veículos elétricos. Dimensionamento. Sistemas de tração. Metodologia de dimensionamento. Potência requerida.

## ABSTRACT

RODRIGUES, Julio Cesar Bortolini. **Sizing system for traction electric vehicles - Front Wheel Drive** . 2017. 103 p. Final Coursework (Bachelor's Degree in Electronic Engineering) – Federal University of Technology – Paraná. Ponta Grossa, 2017.

Some factors such as concerns about the environment, energy efficiency, advances in research related to energy sources and storage that make it possible to increase the energy density and power of these elements, has led to an increase in interest in electric vehicles. The objective of this work is to evaluate and present an easy - to - understand methodology for the sizing of the traction system of an electric vehicle, and to show that the values obtained correspond to the characteristics of commercially constituted vehicle components. In this work, results are presented for the sizing of the traction system of a purely electric vehicle, so that this system meets the requirements for the vehicle to have a range of 60 km, taking into account the Brazilian driving cycle NBR 6601. Another important aspect of this Work is to present the possibility of reducing costs and time in the construction of prototypes, a fundamental factor to reduce production costs and consequently entails a reduction in the amount passed on to the consumer.

**Keywords:** Electric vehicles. Sizing. Traction systems. Sizing methodology. Required Power.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Oscilação no valor do barril do petróleo. . . . .	17
Figura 2 – Bateria de Volta. . . . .	22
Figura 3 – Primeiro veículo de Ferdinand Porsche, conhecido como P1. . . . .	24
Figura 4 – Sistema de motorização elétrica diretamente nas rodas do veículo. . . . .	24
Figura 5 – Primeiro veículo de passageiros 4x4 do mundo. . . . .	25
Figura 6 – Carro elétrico-gasolina Krieger. . . . .	25
Figura 7 – Lohner-Porsche Mixte. . . . .	26
Figura 8 – Electrobat. . . . .	27
Figura 9 – Táxi híbrido de Jenatzy. . . . .	28
Figura 10 – “ <i>Le Jamais Contente</i> ”. . . . .	29
Figura 11 – Sistema de Produção em Série do Modelo T da Ford. . . . .	31
Figura 12 – Evolução de Vendas de Veículos Híbridos. . . . .	37
Figura 13 – Evolução de Vendas do GM Volt e Nissan Leaf no Mercado Norte-Americano. . . . .	37
Figura 14 – Conceito de VE com baterias. . . . .	40
Figura 15 – Configurações de VE’s puros. . . . .	41
Figura 16 – Circuito elétrico simplificado equivalente a uma bateria. . . . .	45
Figura 17 – Densidade energética e Densidade de Potência de Diferentes Tipos de Bateria. . . . .	53
Figura 18 – Interfaces de Potência para Escolha do ME. . . . .	58
Figura 19 – Classificação Geral dos Motores. . . . .	60
Figura 20 – Comportamento de Torque e Potência de um ME. . . . .	61
Figura 21 – Disposição normalizada dos eixos de um automóvel (SAE J670). . . . .	62
Figura 22 – Forças atuantes em um veículo. . . . .	63
Figura 23 – Arrasto de forma na resistência aerodinâmica. . . . .	67
Figura 24 – Coeficientes de arrasto em função da forma do veículo. . . . .	68
Figura 25 – Rampa com inclinação excepcionalmente grande (10º ou 18Rodovia SC 480 na Serra do Rio do Rastro. . . . .	70
Figura 26 – Configuração <i>In-Wheel</i> . . . . .	74
Figura 27 – Exemplo de Motor na Roda. . . . .	74
Figura 28 – Diagrama de Blocos no Simulink. . . . .	88
Gráfico 1 – Ciclo de Condução NBR 6601 e Deslocamento. . . . .	89
Gráfico 2 – Força de Tração para 1 Ciclo. . . . .	90
Gráfico 3 – Potência Requerida nas Rodas para 1 Ciclo. . . . .	91
Gráfico 4 – Potência Requerida de Cada Motor para 1 Ciclo. . . . .	91
Gráfico 5 – Torque Requerido de Cada Motor para o 1 Ciclo. . . . .	92
Gráfico 6 – Rotação do Motor. . . . .	92
Gráfico 7 – Potência Requerida do Controlador/Conversor. . . . .	93
Gráfico 8 – Consumo de Potência da Bateria em um Ciclo de Condução. . . . .	94
Gráfico 9 – Consumo de Energia em um Ciclo de Condução. . . . .	95

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Distribuição das emissões de $CO_2$ nos centros urbanos brasileiros .	15
Tabela 2 – Efeitos nocivos principais poluentes veiculares locais . . . . .	16
Tabela 3 – Principais Tipos de Baterias de Íon-Lítio . . . . .	52
Tabela 4 – Características Alguns Supercapacitores Comerciais . . . . .	57
Tabela 5 – Especificações Técnicas . . . . .	75
Tabela 6 – Definições de Projeto . . . . .	76
Tabela 7 – Especificações do Motor . . . . .	92
Tabela 8 – Especificação do Controlador/Conversor . . . . .	93
Tabela 9 – Requisito para o Banco de Baterias . . . . .	95
Tabela 10 – Requisitos para o Banco de Supercapacitores . . . . .	96

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

### SIGLAS

BLDC	<i>Brushless DC</i>
BRENT	Bolsa Internacional do Petróleo
CARB	<i>California Air Resources Board</i>
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DoD	Profundidade de descarga da bateria
DOU	Diário Oficial da União
HC	Hidro carboneto
ICT	Instituto de Ciência e Tecnologia
LiCoO <sub>2</sub>	Lítio-Cobalto (LCO)
LiFePO <sub>4</sub>	Lítio-Fosfato (LFP)
LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	Lítio-Manganês (LMO)
LiNiMnCoO <sub>2</sub>	Lítio Nitrato Manganês-Cobalto (NMC)
MCI	Motor de Combustão Interna
ME	Motor Elétrico
NiMH	Níquel hidreto metálico
MP	material Particulado
NO <sub>x</sub>	Óxido de nitrogênio
PbA	Chumbo-Ácido
PMSM	Permanent Magnet Synchronous Motor
PNGV	<i>Partner Ship for a New Generation Vehicles</i>
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
SOC	Estado de carga
SO <sub>x</sub>	Óxido de enxofre
VEH	Veículo Elétrico Híbrido
VHE	Veículo Elétrico Híbrido (vide VEH)
VE	Veículo Elétrico
WIT	<i>West Texas Intermediate</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

### LETRAS LATINAS

$A_f$	Área frontal do veículo	[m <sup>2</sup> ]
$C_D$	Coefficiente aerodinâmico	
$C_{sc}$	Capacitância do supercapacitor	[F]
$C_p$	Capacidade de <i>Peukert</i>	
$E_{out}$	Energia consumida das baterias	[Wh]
$E_{out\_acum}$	Energia consumida das baterias acumulada	[Wh]
$E_{sc}$	Energia do supercapacitor	[Wh]
$E_{n_{total}}$	Energia total consumida	[Wh]
$F_g$	Força de resistência ao aclave	[N]
$F_{la}$	Força de aceleração linear	[N]
$f_r$	Coefficiente de resistência ao rolamento	
$F_r$	Força de resistência ao rolamento	[N]
$F_t$	Força de tração	[N]
$F_w$	Força de resistência aerodinâmica	[N]
$F_{wa}$	Força de aceleração angular	[N]
$g$	Aceleração da gravidade	[m/s <sup>2</sup> ]
$\dot{i}_g$	Rotação do sistema de transmissão	
$I$	Momento de inércia das partes girantes do sistema de tração referidos ao motor	[kg·m <sup>2</sup> ]
$I_{bat}$	Corrente da bateria	[A]
$I_{sc}$	Corrente do supercapacitor	[A]
$I_w$	Momento de inércia das rodas/pneus	[kg·m <sup>2</sup> ]
$M$	Massa do veículo	[kg]
$N_m$	Rotação do motor de tração	[rpm]
$N_t$	Rotação da roda/pneu	[rpm]
$P_{med\_bat}$	Potência média da bateria	[W]
$P_{bat}$	Potência da bateria	[W]
$P_{reg}$	Potência regenerada	[W]
$P_{tot}$	Potência total consumida	[W]
$P_{tot\_med}$	Potência total consumida média	[W]
$P_{cc}$	Potência de saída do controlador/conversor de potência	[W]
$P_m$	Potência no eixo do motor	[W]
$P_t$	Potência de tração	[W]
$P_{sc}$	Potência do supercapacitor	[W]
$r_d$	Raio efetivo do pneu	[m]

$R_{int}$	resistência interna	[ $\Omega$ ]
$t$	tempo	[s]
$t_0$	tempo no instante zero do ciclo de condução	[s]
$t_1$	tempo no instante um	[s]
$t_2$	tempo no instante dois	[s]
$t_a$	tempo de aceleração	[s]
$P_m$	Torque do motor de tração	[N·m]
$T_t$	Torque de tração nas rodas/pneus	[N·m]
$T_{ciclo}$	Tempo do ciclo	[s]
$U_{sc}$	Tensão do supercapacitor	[V]
$U_{sc\_min}$	Tensão mínima do supercapacitor	[V]
$U_{sc\_max}$	Tensão máxima do supercapacitor	[V]
$V$	Velocidade do veículo	[m/s]
$Vt_{max}$	Tensão máxima do supercapacitor	[V]
$Vt_{min}$	Tensão mínima do supercapacitor	[V]
$V_k$	Velocidade do veículo	[km/h]
$V_w$	Componente da velocidade do vento na direção do veículo (positiva no mesmo sentido do veículo)	[m/s]

#### LETRAS GREGAS

$\alpha$	Inclinação do terreno	[deg]
$\delta$	Coeficiente de momento de inércia	
$\delta_t$	intervalo de tempo	[s]
$\eta_{cc}$	Rendimento do controlador/conversor de potência	
$\eta_m$	Rendimento do motor	
$\eta_t$	Rendimento da transmissão total	
$\xi$	fator de frenagem regenerativa	
$\rho_a$	Densidade do ar	[kg/m <sup>3</sup> ]

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
1.1	OBJETIVOS	19
1.1.1	Objetivo Geral	19
1.1.2	Objetivo Específico	19
1.2	JUSTIFICATIVA	19
1.3	ESCOPO DO TRABALHO	20
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>21</b>
2.1	HISTÓRIA DO VEÍCULO ELÉTRICO	21
2.2	DEFINIÇÕES DO VEÍCULO ELÉTRICO	38
2.2.1	Veículos Elétricos Puros	38
2.2.2	Veículos Elétricos Híbridos	42
2.3	ARMAZENADORES DE ENERGIA	42
2.3.1	Baterias	43
2.3.1.1	Tensão	45
2.3.1.2	Capacidade de Carga	45
2.3.1.3	Densidade de Energia	46
2.3.1.4	Eficiência Energética	47
2.3.1.5	Capacidade de <i>Peukert</i>	47
2.3.1.6	Estado de Carga	48
2.3.1.7	Potência Requerida da Bateria	49
2.3.1.8	Tipos de Baterias	50
2.3.1.8.1	<i>Chumbo-Ácido (PbA)</i>	50
2.3.1.8.2	<i>Níquel</i>	51
2.3.1.8.3	<i>Íon-Lítio</i>	51
2.3.1.8.4	<i>Zinco-Ar</i>	52
2.3.2	Supercapacitores	53
2.3.2.1	Princípio de funcionamento	54
2.3.2.2	Crítério de Desempenho dos supercapacitores	55
2.4	MÁQUINAS ELÉTRICAS	57
2.4.1	Motor de Indução (CA)	58
2.4.2	Motor de Relutância Comutada (CA)	59
2.4.3	Motor de Imã Permanente sem Escovas (CC)	59
2.4.4	Motor de Corrente Contínua com Escovas (CC)	59
2.5	ACIONAMENTO DOS MOTORES ELÉTRICOS	60
2.6	DINÂMICA VEICULAR	61
2.6.1	Forças de Resistência ao Movimento do Veículo	65
2.6.1.1	Resistência ao rolamento	65
2.6.1.2	Resistência aerodinâmica	66
2.6.1.3	Resistência ao aclave	69
2.6.1.4	Aceleração	69
<b>3</b>	<b>DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE TRAÇÃO</b>	<b>73</b>
3.1	DEFINIÇÃO DO SISTEMA	73
3.2	ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA	75
3.3	PARÂMETROS DE PROJETO	75

3.3.1	Força de aceleração . . . . .	76
3.3.1.1	Força de aceleração linear . . . . .	77
3.3.1.2	Força de aceleração angular . . . . .	77
3.3.2	Força de tração . . . . .	77
3.3.3	Aceleração . . . . .	78
3.3.4	Torque . . . . .	78
3.4	CICLO DE CONDUÇÃO . . . . .	79
3.5	METODOLOGIA DE DIMENSIONAMENTO . . . . .	80
3.5.1	Determinação da potência necessária (nas rodas) . . . . .	81
3.5.2	Dimensionamento do motor elétrico . . . . .	82
3.5.2.1	Determinação da rotação nominal e rotação máxima do motor . . . . .	82
3.5.2.2	Verificação da curva de torque . . . . .	83
3.5.3	Dimensionamento do controlador/conversor de potência . . . . .	84
3.5.4	Dimensionamento da capacidade das baterias . . . . .	85
3.5.5	Dimensionamento do banco de supercapacitores . . . . .	86
3.5.6	Diagrama de Blocos Utilizado no Simulink/Matlab™ . . . . .	88
<b>4</b>	<b>APLICAÇÕES E RESULTADOS . . . . .</b>	<b>89</b>
4.1	DESLOCAMENTO . . . . .	89
4.2	SIMULAÇÃO DO SISTEMA . . . . .	90
4.3	DETERMINAÇÃO DO MOTOR ELÉTRICO . . . . .	90
4.4	DETERMINAÇÃO DO CONTROLADOR/CONVERSOR DE POTÊNCIA . . . . .	93
4.5	DETERMINAÇÃO DAS BATERIAS . . . . .	94
4.6	DETERMINAÇÃO DOS SUPERCAPACITORES . . . . .	95
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS . . . . .</b>	<b>97</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>99</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Diante das constantes catástrofes ambientais, voltaram-se os olhares mundiais para a interferência do homem sobre o meio ambiente, a qual está ocasionando diversos desequilíbrios ao ecossistema, uma das fontes desse problema é o uso de veículos que possuem como fonte propulsora o motor a combustão interna (MCI). Pois, mesmo totalmente regulados emitem diversos gases poluentes os quais são uma das fontes responsáveis pelo aumento do efeito estufa sendo que uma das consequências é o aumento da temperatura média do planeta, também são uma das causas do aumento dos problemas respiratórios na população, e diversos outros problemas (MATTOS, 2001). Para efeito comparativo, é mostrada na Tabela 1 a contribuição na emissão relativa de  $CO_2$  dos veículos automotores nos centros urbanos brasileiros, separados por categoria, onde se observa que os automóveis de passeio são responsáveis por mais da metade das emissões de  $CO_2$ , seguidos pelos ônibus, veículos de carga e veículos sobre trilhos.

**Tabela 1 – Distribuição das emissões de  $CO_2$  nos centros urbanos brasileiros**

Fontes de Emissão	Quantidade $CO_2$ (%)
Carros	57,4
Motocicletas	3,0
Ônibus	27,2
Trilhos	0,4
Veículos de Carga	12,1

**Fonte: Adaptado de Carvalho (2011).**

Na Tabela 2 não foram mostrados outros gases liberados pelo tubo de escapamentos dos veículos, que são os poluentes locais. Sendo eles prejudiciais tanto quanto o  $CO_2$ . Sendo, que os demais poluentes emitidos possuem concentração diferente para o tipo de combustível queimado pelo veículo.

Os poluentes locais afetam especificamente as áreas de abrangência da operação do transporte. O transporte motorizado, com base na queima de combustíveis fósseis, é responsável pela emissão de vários poluentes nocivos à saúde e que degradam o ambiente urbano, com destaque para o monóxido de carbono (CO), os hidrocarbonetos (HC), os materiais particulados (MP), os óxidos de nitrogênio ( $NO_x$ ) e os óxidos de enxofre ( $SO_x$ ). Na Tabela 2 está descrito os principais efeitos nocivos da



alta concentração destes poluentes. Onde a alta concentração pode ocasionar desde danos colaterais, até danos diretos à saúde da população e ao meio ambiente.

**Tabela 2 – Efeitos nocivos principais poluentes veiculares locais**

Poluente	Impacto
$CO_2$	Atua no sangue reduzindo sua oxigenação, podendo causar morte após determinado período de exposição.
$NO_X$	Formação de dióxido de nitrogênio e na formação do <i>smog</i> * fotoquímico e chuva ácida. É um precursor do ozônio.
HC	Combustíveis não queimados ou parcialmente queimados formam o <i>smog</i> * e compostos cancerígenos. É um precursor do ozônio.
MP	Pode penetrar nas defesas do organismo, atingir os alvéolos pulmonares e causar irritações, asma, bronquite e câncer de pulmão. Sujeira e degradação de imóveis próximos aos corredores de transporte.
$SO_X$	Precursor do ozônio, formando a chuva ácida e degradando vegetação e imóveis, além de provocar uma série de problemas de saúde.

\*efeito {smog} é a formação de uma névoa densa devido à grande concentração de ozônio ( $O^3$ ) no ar.

**Fonte: Carvalho (2011)**

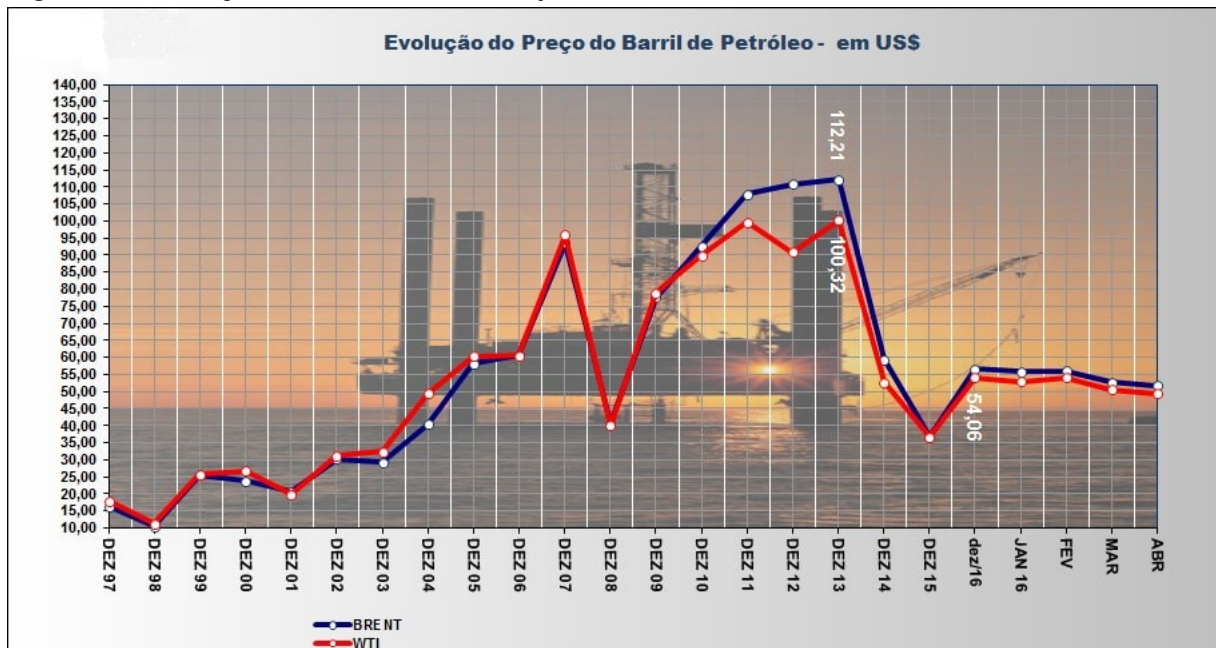
Outro ponto a se destacar é com relação às oscilações no valor do barril do petróleo, sendo que quando o valor deste reduz é muito difícil ocorrer redução no valor do produto para o consumidor final. Segue na Figura 1 demonstrativo da oscilação do valor do barril do petróleo. Sendo que, nos períodos de crise econômica é comum ocorrer elevação do preço do petróleo, conforme observa-se as altas nos anos de 2007 e o período de 2010 a 2013, quando os valores passaram de US\$ 90,00 (noventa dólares) o barril. No entanto, a partir de 2014 houve redução no valor. Porém, o valor nas bombas de combustível para o consumidor final não acompanhou tal redução.

Vale destacar que, as maiores reservas de petróleo encontram-se em áreas de conflito como o Oriente Médio, por exemplo, e que estas são uma das principais fontes de perturbações em relação ao preço do barril de petróleo.

Diante do exposto anteriormente a partir da década de 1970, a opinião pública voltou-se para os problemas ambientais, nesse contexto os governos dos países desenvolvidos passaram a investir em programas de incentivo ao veículo elétrico no intuito de reduzir as emissões de gases poluentes, no entanto os programas não foram bem-sucedidos (BARAN, 2012).

No entanto, diferente do que muitas pessoas acreditam a tecnologia dos automóveis elétricos e híbridos não representa uma inovação tecnológica recente. Embora haja certamente avanços tecnológicos importantes nos veículos elétricos (VE) atuais,

Figura 1 – Oscilação no valor do barril do petróleo.



Fonte: BACEN e ZH (2017).

como as baterias e toda a tecnologia digital presente nos carros modernos, em essência o conceito básico se mantém. Ou seja, não houve mudanças radicais nos motores elétricos de hoje, nem mesmo na utilização da energia cinética gerada pelo movimento do veículo (HØYER, 2008; BARAN, 2012).

Segundo Høyer (2008), Baran (2012), no final do século XIX os veículos elétricos dividiam o mercado norte-americano de automóveis com os veículos a vapor. Sendo que os VE eram considerados tecnologicamente superiores aos movidos a vapor e também os propulsionados com motor interno a combustão (MCI), pelo fato de utilizar componentes parecidos com os dos bondes elétricos, que eram o principal meio de transporte público da época. Já naquela época a capacidade de armazenamento das baterias foi considerado o ponto fraco dos veículos elétricos, pois limitavam a autonomia. Havendo registros de veículo elétrico híbrido já no início do século XX, vários estudos relativos a uso de outros componentes para aumento de carga das baterias, utilização de frenagem regenerativa, que consiste em transformar a energia cinética em energia elétrica durante a frenagem.

Ainda de acordo com Høyer (2008), Baran (2012), outros fatores que alavancaram as vendas dos veículos a gasolina, fazendo os veículos elétricos serem preteridos, foi o melhor desempenho, relativo à autonomia, dos automóveis com MCI, ao aumento da rede de distribuição de gasolina, a facilidade de distribuição de combustí-

vel líquido em pequenos galões, entre outros fatores. Também a maneira agressiva de mercado instituída por Henry Ford, com a produção em larga escala através de linha de montagem. Os fabricantes de VE por outro lado, preferiam produzir menos mas com maior qualidade.

De fato, os veículos elétricos já foram fortes concorrentes dos automóveis de combustão interna, mas, por razões já detalhadas, foram preteridos e tiveram, desde os anos 1930, participação marginal na história do automóvel (BARAN, 2012).

Mas, desde o lançamento do Toyota Prius, em 1997, verifica-se no mercado norte-americano um número cada vez maior de lançamentos de automóveis híbridos e, mais recentemente, de veículos puramente elétricos (BARAN, 2012).

Sendo assim, quase um século após os veículos elétricos serem superados pelos veículos propulsionados com MCI, devido a vários fatores dentre eles a autonomia, sendo que este esbarrou nos avanços tecnológicos dos armazenadores de energia. Também ao fato que na época não havia muita preocupação ambiental, e os veículos equipados com MCI apresentaram custos mais competitivos. Entretanto, na atualidade principalmente com o advento das preocupações ambientais os veículos elétricos, estão recebendo muitos incentivos por entender-se que podem ser uma alternativa para a minimização dos danos ocasionados por atividades humanas (CASTRO; FERREIRA, 2010).

Portanto, considerando os argumentos apresentados, como custo, autonomia e eficiência deve-se avaliar essas variáveis e procurar projetar um sistema para aperfeiçoar, reduzindo perdas, aumentando a autonomia e reduzindo custos, em resumo aumentar a eficiência do conjunto, desta maneira os veículos elétricos poderão tornar-se competitivos frente aos modelos propulsionados por MCI.

Sendo assim, utilizando o software Simulink/Matlab™ é possível desenvolver uma análise matemática das variáveis responsáveis pela dinâmica em um veículo, apresentando um resultado próximo ao real isso faz com que seja possível testar diversas possibilidades sem a necessidade de gastar recursos financeiros para isso, após essas análises matemáticas pode-se realizar experimentos reais melhor focados em configurações que proporcionem o contido no parágrafo anterior que é a redução de perdas e custos e aumento da autonomia. Para isso, propõe-se desenvolver a análise de um veículo elétrico dimensionando o sistema de tração. Com isso busca-se a melhor configuração para o veículo elétrico para melhorar a eficiência energética.

## 1.1 OBJETIVOS

Encontrar por meio de simulações no Simulink/Matlab™, foram utilizados os *toolbox* básicos, o dimensionamento do sistema de propulsão de um VE com o motor elétrico adaptado ao cubo das rodas que possibilitem o melhor aproveitamento da energia proporcionando aumento de autonomia da bateria e rendimento, em consequência da redução de perdas, aumentando assim a eficiência. Em consequência redução dos custos.

### 1.1.1 Objetivo Geral

Dimensionar o sistema de propulsão de um veículo elétrico, com tração nas rodas dianteiras com o motor acoplado diretamente nas rodas.

### 1.1.2 Objetivo Específico

- Obter o modelo da dinâmica veicular, de acordo com a potência requerida para seguir o ciclo de condução urbano NBR6601;
- Obter os modelos matemáticos para o dimensionamento dos subsistemas que compõem o VE, tais como: bateria e motores elétricos;
- Simular o VE utilizando o Simulink/Matlab™ para obtenção dos valores de dimensionamento do motor elétrico, dos armazenadores de energia, do controlador/conversor, entre outros.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

O VE além de possuir emissão de gases poluentes nula, ainda possui sistema de tração silencioso, como consequência ainda reduz a poluição sonora. Outro fator importante a se destacar são as limitações de emissão de poluentes impostas pelos governos através de legislação. No Brasil estas limitações ficaram mais rigorosas após 1999, os limites são estabelecidos na Resolução do CONAMA nº 418, de 25 de novembro de 2009, publicada no DOU nº 226, de 26/11/2009, págs. 81-84. Já nos países desenvolvidos esses limites começaram a ser estabelecidos no início da década de

1970.

Deve-se destacar ainda que, após a crise econômica mundial muitos países aproveitaram os pacotes de benefícios para incentivar a pesquisa e produção dos VE, há cinco principais ações de incentivo governamental bônus aos compradores, desconto de tributos, adoção de restrição ao uso de veículos convencionais, auxílio à pesquisa e implantação de infraestrutura (CASTRO; FERREIRA, 2010).

Portanto, o estudo proposto servirá para apresentar subsídios para análise de projetos relacionados ao tema, oferecendo resultados estimados próximos ao esperado na prática. Proporcionando redução de tempo e custos com a construção de protótipos, disponibilizando uma referência para melhorar a eficiência energética, proporcionando meios para tornar o VE economicamente mais competitivo.

### 1.3 ESCOPO DO TRABALHO

O trabalho está dividido em revisão de literatura, equacionamento de componentes como inércia, arrasto, atritos, entre outras, envolvidas em um veículo em especial no VE, desenvolvimento de um sistema através do software Simulink/Matlab™ para mensurar o mais próximo com a realidade as variáveis como: energia consumida, potência e torque necessários aos motores, potência dos armazenadores a serem utilizados, entre outras.

No capítulo 2 será apresentada revisão da literatura, contando com história do veículo elétrico, configurações do VE, armazenadores de energia, máquinas elétricas, acionamento de motores elétricos e dinâmica veicular.

No capítulo 3 será apresentado passo a passo o processo para obtenção dos valores necessários ao dimensionamento de um sistema de tração para VE com motor nas rodas e tração dianteira.

No capítulo 4 serão apresentados os valores e gráficos obtidos para o caso particular objeto deste trabalho, que é dimensionar o sistema de tração elétrica para um veículo de passeio, em particular o GM Celta.

No capítulo 5 serão apresentadas as discussões finais e proposta de trabalho futuro.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Apontado como uma ótima alternativa ao veículo convencional equipado com MCI, relativo às questões ambientais, ao consumo de energia não renovável entre outras questões, o VE ainda perde a disputa pelo mercado devido a fatores como autonomia e custos, porém existem diversas frentes em pesquisa e desenvolvimento para buscar reverter essas questões.

Diante destes fatores será descrito os principais componentes de um VE e definidas as diferenças para o veículo elétrico híbrido (VEH), porém é importante apresentar um breve histórico referente ao VE.

### 2.1 HISTÓRIA DO VEÍCULO ELÉTRICO

A criação e desenvolvimento do veículo elétrico estão intimamente ligados à criação e descoberta da bateria e do motor elétrico. Em 1800, o físico italiano Alessandro Volta demonstrou como armazenar energia elétrica por meio de processos químicos, apresentando o modelo que ficou conhecido como bateria de Volta (Figura 2). Em 1821, o físico e químico inglês Michael Faraday demonstrou o princípio de funcionamento do motor elétrico utilizando a descoberta de Volta em seus experimentos, no caso estudado por ele o gerador elétrico, em 1831 Faraday demonstrou os princípios da indução eletromagnética e a relação entre corrente elétrica e magnetismo (HØYER, 2008; LOPES et al., 2012; CORREA et al., 2013; BARASSA et al., 2015).

Existe uma discordância com relação à data e ao inventor do primeiro veículo elétrico, alguns autores defendem que o primeiro VE foi desenvolvido pelo inventor húngaro Ányos Jedlik em 1828 (COWAN; HULTÉN, 1996; CHAN, 2013; BARASSA et al., 2015). Outro exemplo é a invenção do Professor Strating em Groningen na Holanda um pequeno modelo de carro elétrico construído em 1835 (LOPES, 2008; CORREA et al., 2013). Contudo até 1859 pouco se progrediu em relação ao VE's, quando, então, o Belga Gaston Planté demonstrou a primeira célula da conhecida "bateria de chumbo-ácido" amplamente utilizada em veículos com MCI e em veículos elétricos como fonte de energia. Outros autores citam que o primeiro veículo elétrico foi concebido em 1881 pelo engenheiro francês Gustave Trouvé (EHSANI; GAO; EMADI,

**Figura 2 – Bateria de Volta.**



Fonte: Google (2017).

2009; HØYER, 2008).

De acordo com Lopes (2008), Correa et al. (2013), entre 1873 e 1881 surgiram os primeiros veículos elétricos com condições de rodar nas estradas. Em 1882 William Ayrton e John Perry criaram um veículo propulsionado por motor elétrico de 0,5 cavalo de potência e com tensão de 20 V, o qual utilizava como fonte de energia dez células de ácido e chumbo em uma bateria com capacidade de 1,5 kWh. Esse veículo poderia percorrer uma distância entre 16 e 40 km, dependendo das condições do terreno, e a máxima velocidade alcançada foi de 14 km/h. A demonstração citada ocorreu três anos antes de o engenheiro alemão Carl Benz demonstrar o primeiro triciclo tracionado por um MCI. Nesta época estava em vigor na Grã-Bretanha a lei “*Red Flag Act*”, a qual proibia a ação da propulsão à vapor nas estradas a fim de não perturbar os cavalos que estivessem transitando por estas, nesse contexto devido à velocidade, o veículo de Ayrton e Perry sofreu resistência. Até sua reformulação em 1896 esta lei introduziu severas restrições sobre todos os veículos tracionados mecanicamente em ruas Britânicas, neste período o Reino Unido viu-se atrasado em relação a outros países quanto ao desenvolvimento de veículos elétricos.

Nos Estados Unidos, o avanço das descobertas relativas aos veículos com propulsão elétrica ganhou destaque entre 1888 e 1895 com os pesquisadores Philip W. Pratt em Boston e Andrew L. Riker, dentre outros inventores. Nesta época alguns termos no campo automotivo começaram a ser utilizados com maior frequência, dentre

esses termos destaca-se o termo “*horseless carriage*” (carruagem sem cavalos), o qual foi utilizado pela primeira vez nos Estados Unidos na publicação *The Horseless Age*, e no *PallMall Gazette* de Londres foi utilizado o termo *automobile* (automóvel), ambos em 1895 (LOPES, 2008; CORREA et al., 2013).

O início do século XX pode ser considerado o período de maior desenvolvimento do VE, embora os veículos com MCI tenham sido desenvolvidos rapidamente neste período. Em Londres, no ano de 1903 havia mais VE's do que veículos à gasolina, no entanto este cenário logo mudou (LOPES, 2008; CORREA et al., 2013). Para Høyer (2008), Chan (2007) os vinte anos compreendidos entre a década de 1880 e 1900 caracterizaram-se como a “Era de Ouro” do desenvolvimento das tecnologias relacionadas ao veículo elétrico. Destaca-se no referido período o desenvolvimento da infraestrutura de recarga dos automóveis elétricos, caracterizados pelos eletro-postos urbanos conectados à rede elétrica nos Estados Unidos.

O Modelo K da Ford, em 1906, apresentou o primeiro desafio real ao VE. Em 1909, quando foi lançado o Modelo T, também da Ford, ficou nítido que a propulsão elétrica havia perdido a concorrência para o MCI, com relação ao mercado de transporte particular. Em 1912, nos Estados Unidos, a produção de veículos à gasolina chegou a 900.000 unidades enquanto a produção de VE's chegou a 30.000 (LOPES, 2008; CORREA et al., 2013).

Em 1898 Ferdinand Porsche (1875-1951) apresentou seu primeiro veículo, mostrado na Figura 3, o *C.2 Phaeto* que também ficou conhecido como P1. O primeiro protótipo do P1 foi o primeiro veículo com tração dianteira do mundo, sua motorização era composta de um pequeno motor elétrico de 3HP acoplado transversalmente entre as rodas dianteiras, e as rodas traseiras eram as direcionais. Este veículo elétrico ainda estava longe de estar pronto para produção em série, porém foi apresentado ao público. O conceito do veículo foi descartado e outros veículos de teste foram construídos (FREITAS, 2015).

Ainda segundo Freitas (2015), para Ferdinand Porsche, o P1 foi apenas a primeira criação na sua carreira como designer de veículos. Em novembro de 1899, ele se tornou o *designer*-chefe do empresário Jacob Lohner, onde ele apresentou a sua próxima grande ideia: o primeiro sistema de motorização elétrica independente acoplada diretamente nas rodas do veículo (Figura 4).

Em 1900, na Exposição Universal de Paris um veículo elétrico impulsionado



**Figura 3 – Primeiro veículo de Ferdinand Porsche, conhecido como P1.**



Fonte: Freitas (2015).

**Figura 4 – Sistema de motorização elétrica diretamente nas rodas do veículo.**

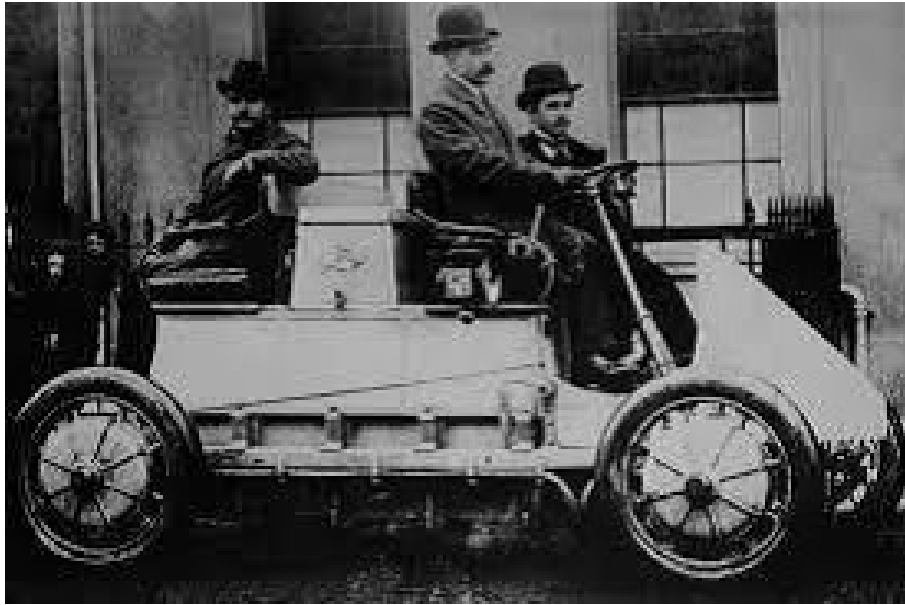


Fonte: Freitas (2015).

por motores nas rodas conhecido como o "*Lohner-Porsche*" fez muito sucesso. Nesta exposição, Ferdinand Porsche apresentou um automóvel esportivo equipado com quatro motores elétricos acoplados diretamente nas rodas, que foi apresentado como o primeiro veículo de passageiros 4x4 do mundo (Figura 5) (FREITAS, 2015).

No final do século XIX e início do século XX surgiram ideias para melhorar a autonomia e o desempenho dos VE's utilizando configuração híbrida. No período entre 1900 e 1912, podem ser citados como exemplo, os modelos *French Electroautomobile* de 1900 e o carro elétrico-gasolina Krieger de 1903 (Figura 6), onde ambos possuíam um ME e um MCI, e ambos forneciam tração combinada às rodas dianteiras (HØYER,

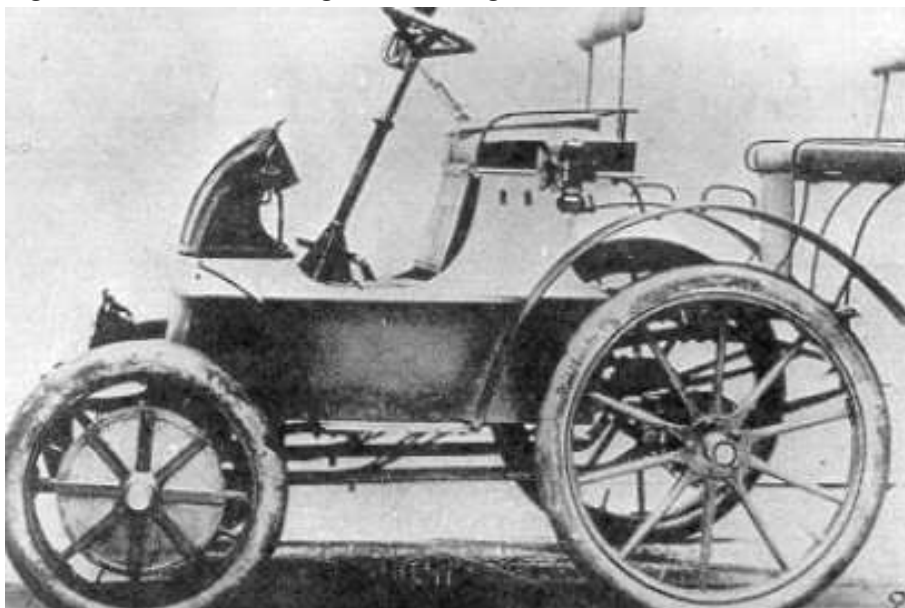
**Figura 5 – Primeiro veículo de passageiros 4x4 do mundo.**



**Fonte: Freitas (2015).**

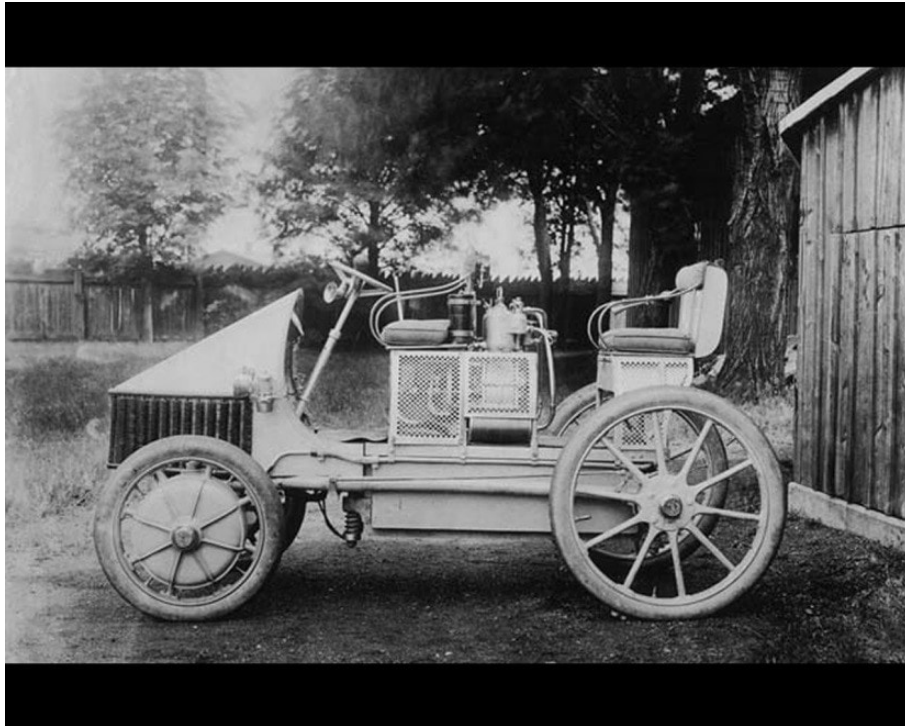
2008; LOPES, 2008; CORREA et al., 2013). A primeira conjugação dos ME's e MCI em um mesmo veículo ocorreu apenas em 1889, este feito foi realizado pelo engenheiro mecânico alemão Ferdinand Porsche, que construiu o primeiro veículo elétrico híbrido do mundo o *Lohner-Wagen*, o qual ficou conhecido como *Lohner-Porsche Mixte* (Figura 7), nesse veículo um motor à gasolina acionava um gerador responsável pela recarga das baterias que por sua vez ofereciam a potência necessária para os ME's localizados nas rodas dianteiras (HØYER, 2008; BARASSA et al., 2015).

**Figura 6 – Carro elétrico-gasolina Krieger.**



**Fonte: Lopes (2008).**

**Figura 7 – Lohner-Porsche Mixte.**



**Fonte: Google (2017).**

Ferdinand Porsche, também desenvolveu carros de corrida como o modelo *Lohner-Porsche Rennwagen* que carregava 1800 kg de baterias a fim de alcançar longas distâncias (LOPES, 2008).

Em 1894 foi projetado pelo engenheiro mecânico Henry G. Moris e pelo engenheiro eletricitista Pedro G. Salon, o *Electrobat*, um veículo de pequeno porte cuja velocidade máxima era de 24km/h, é apresentado na Figura 8. Em 1896 eles construíram um veículo de dois assentos, denominado de *Electric Rod Wagon* e formaram a *Electric Carriage and Wagon Company*, a primeira companhia de veículos elétricos da América. Tal empresa forneceu táxis para a cidade de Nova York entre os anos de 1896 a 1898, os quais empregavam dois motores de 0,5hp e 44 células de chumbo-ácido, possibilitando autonomia de 48km (FERREIRA et al., 2014).

Em 1901 foi apresentado em Paris um modelo projetado por Camille Jenatzy, o qual possuía um motor elétrico em cada uma das rodas dianteiras com um conjunto de enrolamentos paralelos destinados à frenagem regenerativa, cujos motores operavam independentemente ou em conjunto, e também um dínamo acoplado ao eixo do motor à combustão era empregado no carregamento das baterias durante descidas (FERREIRA et al., 2014).

**Figura 8 – Electrobat.**



**Fonte: Ferreira et al. (2014).**

Em 1902 o veículo criado por Camile Jenatzy já operava como taxi Figura 9, o controle de velocidade era acionado via reostado acionado por uma alavanca (FERREIRA et al., 2014).

Outra tecnologia que contribuiu para o melhoramento dos veículos elétricos foi: a frenagem regenerativa, que consiste em transformar a energia cinética dissipada no processo de frenagem do automóvel em energia elétrica para recarregar as baterias (CHAN, 2007; BARASSA et al., 2015).

Mesmo possuindo baixas velocidades, os veículos elétricos possuíam vantagens em relação aos concorrentes à gasolina, como o baixo nível de ruído, facilidade na dirigibilidade, ausência de marchas e não produziam odores desagradáveis. Inicialmente o transporte de natureza elétrica tinha grande aceitação pelo público, pois os veículos dotados de motores à combustão possuíam um sério inconveniente: o sistema de partida, a qual era feita manualmente pelo usuário com o auxílio de uma manivela. A solução de tal inconveniente surgiu no ano de 1912 com a invenção do motor de partida por Charles Kettering. Com as melhorias efetuadas nos motores de combustão interna iniciou-se o desuso dos veículos elétricos: o principal problema era

**Figura 9 – Táxi híbrido de Jenatzy.**



**Fonte: Ferreira et al. (2014).**

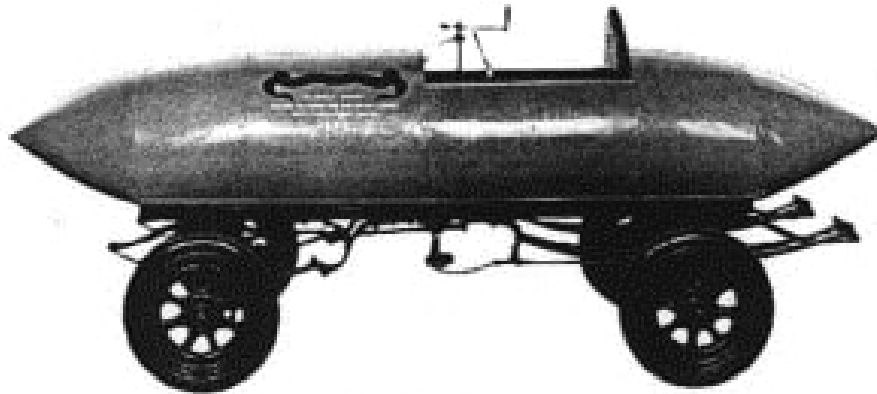
em relação à limitada autonomia devido à baixa capacidade de armazenamento das baterias, isso impedia viagens fora das áreas urbanas, além da dificuldade e demora no processo de carga das mesmas. Em contrapartida, os veículos com motores à gasolina atingiam maiores distâncias e o abastecimento era ser feito em curto período de tempo (FERREIRA et al., 2014).

Com o pico de produção de veículos elétricos por volta de 1912, a combinação híbrida entre os sistemas de propulsão elétrica e mecânica no modelo de veículo *'Woods Gasoline-Electric'* datado de 1916, atingiu um bom nível de desenvolvimento, o que permitiu a produção e comercialização desses veículos. Neste veículo, um pequeno motor à gasolina de quatro cilindros foi acoplado a um ME responsável pela força de tração no eixo traseiro. Neste arranjo, sempre que o ME ou o MCI fossem operados, ambos deveriam propulsionar o veículo. Isto significa que o carro poderia operar como um veículo puramente à gasolina ou como um puramente elétrico. Este veículo ainda poderia operar no modo híbrido-elétrico no qual o ME auxiliaria o MCI em picos de potência ou no modo gerador carregando o conjunto de baterias. O arranjo descrito é conhecido nos dias de hoje como VEH paralelo. A grande desvantagem do

modelo de VEH, '*Woods Gasoline-Electric*', foi seu custo relativamente maior que o de um puramente elétrico e o de um à gasolina, resultando na venda de poucas unidades desses veículos híbridos (LOPES, 2008; CORREA et al., 2013).

O veículo elétrico era então considerado tecnologicamente superior aos demais. Em 1899, um veículo elétrico, o "*Le Jamais Contente*" Figura 10, do inventor belga Camille Jenatzy, foi o primeiro automóvel a quebrar a barreira dos 100 km/h. Já a indústria do automóvel elétrico possuía uma rede industrial e tecnológica bem desenvolvida e com fácil acesso a fornecedores, pois utilizava componentes parecidos com os dos bondes elétricos, que eram o principal meio de transporte público das grandes cidades (BARAN, 2012).

**Figura 10 – "*Le Jamais Contente*".**



**Fonte: Ferreira et al. (2014).**

Após 1912 iniciou o declínio do uso e da produção dos veículos elétricos enquanto observava-se o notável crescimento da produção de veículos à gasolina. O último modelo de VE, antes do renascimento, foi produzido nos EUA em 1921 (LOPES, 2008; CORREA et al., 2013).

A partir de então, a tecnologia de tração elétrica foi pouca explorada, dentre as iniciativas pontuais, destacam-se os estímulos vindos das duas Guerras Mundiais que ocorreram no século XX: a Primeira Guerra Mundial (1914 - 1918) e a Segunda Guerra Mundial (1939 - 1945). Os principais países protagonistas do conflito eram os países que possuíam uma indústria automobilística mais avançada (exceto Rússia, Itália e Japão). Nos períodos de guerra, houve um direcionamento de recursos para o esforço de batalha que afetou diretamente a indústria automobilística, direcionando a maior parte dos veículos movidos com MCI para o conflito. Para suprir as demandas

externas à guerra recorreu-se aos veículos elétricos, esses utilizados para o transporte e serviços públicos (BARASSA et al., 2015).

Voltando a ser desenvolvida a partir dos anos 60 quando VE passou a ser considerado uma saída para a superação de problemas ambientais causados por emissões dos MCI's. Nos anos 60 a maior parte dos VE's produzidos foi resultado da conversão de veículos convencionais. Nesse período, os maiores esforços em avanços tecnológicos de tração elétrica concentraram-se na Inglaterra e EUA (LOPES, 2008; CORREA et al., 2013).

Por mais que o maior desenvolvimento tecnológico do motor a combustão interna tenha ocorrido principalmente no âmbito dos automóveis de passeio, haja vista sua representatividade expressa nas elevadas vendas acumuladas ao longo do século XX, é necessário fazer uma ressalva em relação aos veículos elétricos do segmento pesado como os ônibus, bem como os veículos elétricos ferroviário. Destaca-se que, os veículos exclusivamente voltados ao transporte coletivo continuaram com sua comercialização neste período em que o automóvel elétrico praticamente desapareceu (BARASSA et al., 2015).

Com base no número de veículos registrados nos Estados Unidos no início do século XX, constata-se que havia cerca de 5.000 veículos automotores em 1900, para 458.300 em 1910 e 8.131.522 em 1920. Tais números comprovam o crescimento expressivo da comercialização de automóveis no país. Isto comprova que a competição pelo tipo de motor dominante ocorreu em solo norte-americano (BARASSA et al., 2015).

Assim, observa-se que a concorrência pelo padrão tecnológico de propulsão veicular foi acirrada, pois, em 1900, foram registrados 1.575 VE's, 1.681 veículos movidos a motores a vapor e 936 veículos movidos ao MCI nos Estados Unidos. Até 1909 esta proporção mudou de maneira significativa. Enquanto as vendas dos veículos elétricos dobraram entre 1900 e 1909, as vendas de veículos movidos ao motor de combustão interna aumentaram mais que 120 vezes para o mesmo período (COWAN; HULTÉN, 1996; HØYER, 2008; BARASSA et al., 2015).

Outro fator que contribuiu para a queda nas vendas dos veículos com propulsão elétrica e aumento nas vendas dos veículos com motor a combustão deve-se a descoberta das jazidas de petróleo no Texas no período assinalado e o poder das companhias petrolíferas americanas, principalmente da *Standard Oil Company*. As

petrolíferas norte-americanas tinham o poder de ajuste do preço do petróleo, o que refletia diretamente no preço final da gasolina para o consumidor. As petrolíferas optaram pela diminuição gradual do preço do petróleo, ficando abaixo do custo equivalente da eletricidade para um veículo elétrico (COWAN; HULTÉN, 1996; ANDERSON; ANDERSON, 2010; BARASSA et al., 2015).

Outro dado que é importante destacar refere-se à supressão, por parte das empresas ligadas ao petróleo e aos motores a combustão interna, das empresas que trabalhavam e desenvolviam tecnologias dos automóveis elétricos. Esta supressão deu-se pelas aquisições corporativas e compra de patentes de tecnologias dos veículos elétricos pelas empresas ligadas à tecnologia do motor a combustão interna. As empresas adquiridas mudavam seu escopo de atuação e as patentes eram arquivadas (BARASSA et al., 2015).

Também é importante destacar o sistema lançado pelo empreendedor estadunidense Henry Ford (1863 – 1947), o qual propunha um sistema de produção em série Figura 11, utilizado na produção dos veículos equipados com motor a combustão interna. O sistema citado possibilitou que o valor final dos veículos movidos à gasolina ficasse entre US\$ 500 e US\$ 1000, sendo estes valores a metade do valor pago por um VE (BARASSA et al., 2015).

**Figura 11 – Sistema de Produção em Série do Modelo T da Ford.**



**Fonte: Araújo (2015).**

Outrossim, o motor a combustão interna contou com o amplo apoio financeiro da indústria petrolífera norte-americana, a qual havia se consolidado no país e desfrutava de amplo poder, seja na esfera política quanto econômica. Os veículos com



propulsão elétrica, por sua vez, não conseguiram solucionar os problemas relativos à autonomia e a diminuição dos custos produtivos no período (COWAN; HULTÉN, 1996; BARASSA et al., 2015).

Após o ano de 1973 é caracterizado a retomada das pesquisas e produção de veículo elétrico rodoviário no cenário mundial, após ter praticamente desaparecido por aproximadamente 50 anos. O marco refere-se à crise do petróleo, que consistiu no aumento excessivo, a nível global, do preço desta fonte energética, deixando clara a fragilidade de economias muito dependentes da importação deste tipo de matéria prima (BARASSA et al., 2015).

Com isso, identificam-se três fatores principais que auxiliaram a retomada das pesquisas com relação ao veículo elétrico a nível mundial. O primeiro deles refere-se à crise do petróleo em 1973 e os graduais aumentos do preço dos combustíveis fósseis, que como consequência encareceu o custo de rodagem de um automóvel dotado de MCI. O segundo fator está relacionado com os debates e acordos políticos pautados pela agenda ambiental na década de 1970. Por fim, o terceiro fator envolve a questão da saúde pública relativo aos problemas de saúde causados pela emissão de poluentes pelos veículos equipados com motor a combustão interna (BARASSA et al., 2015).

A partir da década de 1970, alguns países desenvolvidos dentre os quais Estados Unidos, Japão e por alguns países pertencentes ao continente europeu, passaram a formular e desenvolver um conjunto de ações e iniciativas em prol da retomada da produção e comercialização dos veículos elétricos, principalmente os automóveis (COWAN; HULTÉN, 1996; BARASSA et al., 2015; HØYER, 2008).

Devido à possibilidade de quebra do aprisionamento tecnológico dos combustíveis fósseis, o Japão adotou a política para desenvolver o segmento dos veículos elétricos. O país também foi o pioneiro em formular e implementar ações e políticas sistemáticas para os automóveis elétricos a partir do início da década de 1970. A estratégia adotada pelo governo japonês, principalmente por meio de seu Ministério de Indústria e Comércio Exterior (MICE) consistiu no financiamento público a P&D de novos modelos, programas de demonstração de protótipos e formulação de políticas de demanda que se traduziram em quotas de mercado para os veículos elétricos que viriam a ser comercializados (ÅHMAN, 2006; BARASSA et al., 2015).

O Governo japonês, nesse sentido, assumiu função de condutor do processo

de desenvolvimento do veículo elétrico como um todo, atuando tanto do lado da oferta por meio do suporte à P&D, quanto do lado da demanda, criando nichos de mercado para os veículos elétricos. Outra função que o governo assumiu, foi de articulador entre os diversos atores do segmento que estiveram envolvidos neste processo, tais como a indústria automobilística japonesa, representadas pelas montadoras e fornecedoras, bem como as universidades e demais Institutos de Ciência e Tecnologia (ICT) (ÅHMAN, 2006; BARASSA et al., 2015).

O governo Japonês tinha como objetivo a difusão do veículo elétrico a bateria, contrariando as metas estabelecidas, a aceitação dos veículos elétricos não teve o desempenho esperado. Porém, o sucesso tecnológico e a grande aceitação de mercado na primeira década do século XXI dos veículos elétricos híbridos em parte podem ser conferidos ao programa japonês de suporte aos veículos elétricos a bateria. Isto é comprovado utilizando-se como exemplo a tecnologia de transmissão dos VEH's, a qual é uma adaptação da tecnologia de um dos programas de P&D executados pelo MITI (*Ministry of International Trade and Industry*) para os veículos elétricos a bateria (ÅHMAN, 2006; BARASSA et al., 2015).

A trajetória dos veículos elétricos a bateria no Japão é um exemplo da dificuldade em quebrar o domínio de mercado dos veículos equipados com MCI. Mesmo não sendo alcançado o objetivo principal, do governo Japonês, os resultados dos programas de P&D, e pelo suporte ao mercado foram relevantes. O pioneirismo em trabalhar com as tecnologias relacionadas ao veículo elétrico fez com que as principais empresas japonesas desfrutassem de uma vanguarda tecnológica que se estende até a metade da segunda década do século XXI (ÅHMAN, 2006; BARASSA et al., 2015).

Outras medidas que merecem destaque são as adotadas pelo Estado da Califórnia, nos Estados Unidos, na década de 1990. Com o objetivo de diminuir os problemas de saúde pública ocasionados pela poluição resultante da emissão pelos escapamentos dos automóveis equipados com MCI, os legisladores da Califórnia, por meio da *California Air Resource Board* (CARB), formularam e aprovaram a lei da "Ordem de Veículo com Emissão Zero", em 1990. Esta Lei tornou obrigatório que até 1998 as montadoras tivessem uma taxa de 2% de veículos com emissão zero em relação a todos os veículos comercializados naquele Estado. Se alguma montadora não cumprisse essa Lei, teriam suas operações canceladas na Califórnia. Outros Estados dos Estados Unidos como *Connecticut, D.C., Maine, Maryland, Massachusetts, New Jer-*

sey, New Mexico, New York, Oregon, Rhode Island and Vermon, aplicaram medidas similares (HØYER, 2008; BARASSA et al., 2015).

Nos anos 1990, houve uma nova tentativa de introduzir os automóveis híbridos nos Estados Unidos, desta vez, por meio de parcerias público-privadas. O governo Clinton anunciou, em 1993, uma iniciativa denominada *Partnership for a New Generation Vehicles* (PNGV), com o objetivo de desenvolver um automóvel “limpo” com consumo de 4,0 litros/100 km. Após alguns anos e investimentos, três protótipos foram anunciados. Todos eram híbridos, mas nenhum chegou às linhas de produção (BARAN, 2012).

No âmbito europeu destaca-se o programa do governo da França em políticas públicas para o desenvolvimento de tecnologias de propulsão elétrica. Auxiliado pelo Governo Federal Francês, diversas empresas francesas dos setores automobilístico e elétrico criaram uma rede de desenvolvimento de tecnologias com o objetivo de substanciar um protótipo de automóvel elétrico. Outro programa similar foi realizado nos Estados Unidos em 1976, no entanto o foco foi voltado principalmente em um dos maiores problemas referente à autonomia do VE, o armazenamento de energia, em particular o desenvolvimento de baterias de níquel-ferro e níquel-zinco para aplicação em automóveis elétricos (BARASSA et al., 2015).

Contudo, mesmo com todas as iniciativas públicas para incentivar a P&D dos VE's, nenhuma delas resultou em produção em série destes veículos no século XX. Pois, o VE ainda não era competitivo o suficiente com relação ao MCI. No entanto, esse panorama apresenta indícios de mudança no início do século XXI (BARASSA et al., 2015).

Em consequência dos esforços dos pesquisadores, as tecnologias relacionadas aos VE's, obteve grande avanço nas duas últimas décadas do século XX (CHAN, 2007; HØYER, 2008). O grande desenvolvimento dessas tecnologias foi possível devido ser utilizado tecnologia do setor elétrico no setor automotivo. A indústria elétrica desenvolveu e utilizou abundantemente o motor elétrico, baterias, e demais componentes durante a metade do século XX, período em que quase não houve pesquisa relativa aos principais componentes que equipam o VE. Com as adaptações das tecnologias do setor elétrico no VE, foi possível um desenvolvimento rápido de alguns modelos, que logo no início do século XXI entraram em comercialização (CHAN, 2007).

Apesar da retomada das pesquisas relativas ao veículo elétrico na década de

1970, as ações desempenhadas em benefício do segmento foram pontuais e desempenhadas por um grupo restrito de países, com destaque para os Estados Unidos, Japão e França. Vale destacar ainda que na virada do século XX para o XXI, a participação de mercado dos veículos elétricos era de aproximadamente 1% frente às vendas globais de veículos (BARASSA et al., 2015).

Em 1997, a Toyota, fabricante japonesa de automóveis que não estava incluída no PNGV (*Partnership for a New Generation Vehicles*), programa lançado durante o governo Clinton, em 1993 nos Estados Unidos, lançou no mercado japonês o Prius, que no início obteve boa aceitação no mercado. Naquele mesmo ano, a Audi lançou o Duo, o primeiro híbrido do mercado europeu, porém não obteve boa aceitação no mercado. Diversas montadoras europeias se dedicavam, naquela época, ao desenvolvimento de automóveis a diesel, visando reduzir as emissões de gases de efeito estufa. Desta forma, os elétricos não despertavam tanto interesse (BARAN, 2012).

A Honda, em 1999, lançou um híbrido no mercado americano, o Insight, que foi um sucesso imediato de vendas. Em 2000, o Prius foi lançado no mercado americano, obtendo um sucesso muito maior que o esperado pela Toyota, se repetindo o sucesso no mercado europeu. Em 2003, a Honda lançou o Civic híbrido, com a mesma aparência e dirigibilidade do Civic convencional. Em 2004 a Ford lançou o Escape, um veículo utilitário esportivo, em versão híbrida (BARAN, 2012).

Com o principal objetivo de reduzir a dependência da economia dos Estados Unidos em relação ao petróleo e de aumentar a produção de combustíveis limpos de origem renovável, o governo norte-americano promulgou em 2007 o *Energy Independence and Security Act*, para incentivar a pesquisa e o desenvolvimento de um sistema de transporte elétrico e também a formação de capital humano especializada em veículos elétricos e na tecnologia de Veículos Elétricos Híbridos *Plug-in* (VHEP) (BARAN, 2012).

Em julho de 2009, foi promulgado nos E.U.A. o *American Clean Energy and Security Act 2009*. Esta lei fundamentou que a Secretaria de Energia, as agências reguladoras estaduais e todas as distribuidoras de energia não reguladas deveriam apresentar planos para o desenvolvimento de Redes Inteligentes (*smart grids*) integradas, com assistência à tecnologia VHEP até julho de 2012, com auxílio financeiro às montadoras que se dedicassem ao desenvolvimento de híbridos e seus fornecido-

res de autopeças. Os principais objetivos do governo Obama foram (BARAN, 2012):

- Criar empregos “verdes”;
- Reduzir a dependência do petróleo;
- Amenizar as emissões de gases de efeito estufa e;
- Buscar a transição para uma economia baseada em energia limpa.

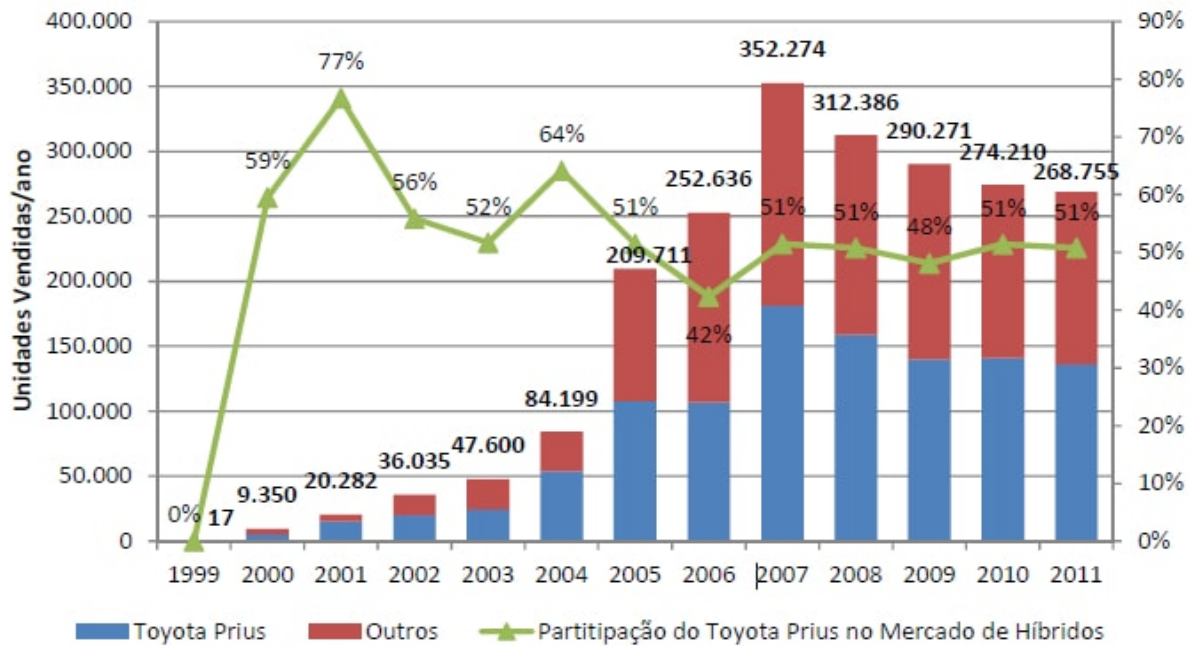
Indiretamente, o incentivo financeiro à inovação tecnológica teria como objetivo ajudar a salvar a indústria automobilística americana durante a crise mais grave de sua história (BARAN, 2012). Em consequência às políticas de incentivo, aumentou a participação dos veículos elétricos híbridos (VEH) no mercado norte-americano. Pode-se observar na Figura 12, que em 2011 foram vendidos de híbridos nos E.U.A. 268.755 unidades. Nos Estados Unidos foram comercializados 38 modelos de híbridos desde o lançamento do Honda Insight, em 1999, sendo vendidos desde então 2.157.726 unidades. Sendo que o modelo mais popular é o Toyota Prius, dos quais foram vendidas 1.091.564 unidades desde seu lançamento, seguido pelo Honda Civic e o Toyota Camry, que venderam respectivamente 209.216 e 178.805 unidades desde que foram lançados. Praticamente todos os fabricantes ofertam pelo menos um modelo de híbrido. A Figura 12 a seguir apresenta a evolução das vendas de híbridos no mercado norte-americano desde seu lançamento (BARAN, 2012).

Após o Prius, os lançamentos mais marcantes do mercado norte-americano foram o GM Volt e o Nissan Leaf. O lançamento do Volt foi anunciado pela General Motors em 2007. O Volt percorre, com carga plena, 40 milhas (ou 64km) como um elétrico puro. Quando descarregado, entra em ação um motor a gasolina que gera eletricidade para alimentar o motor elétrico, tal qual um híbrido em série convencional (BARAN, 2012).

O lançamento do Leaf foi anunciado pela Nissan em 2009. Trata-se de um carro elétrico a bateria que pode percorrer, de acordo com o fabricante, 100 milhas (ou 160 km) a cada recarga. A Nissan adotou uma política de preços agressiva, com preços bastante competitivos com os MCI. A Figura 13 apresenta as vendas do Leaf e do Volt, no mercado norte-americano, desde o seu lançamento (BARAN, 2012).

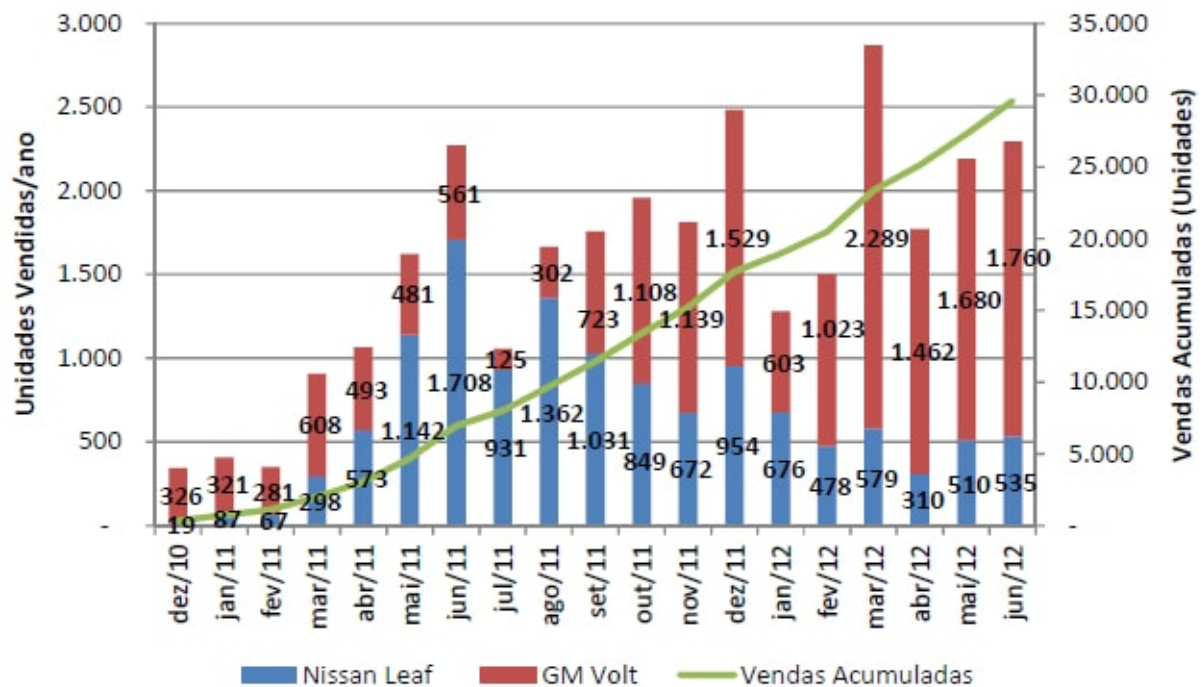
No contexto atual, pode-se afirmar que os veículos elétricos híbridos podem ser considerados o passo intermediário da evolução entre os automóveis convencio-

Figura 12 – Evolução de Vendas de Veículos Híbridos.



Fonte: Baran (2012).

Figura 13 – Evolução de Vendas do GM Volt e Nissan Leaf no Mercado Norte-Americano.



Fonte: Baran (2012).

nais e os elétricos. Mesmo as tecnologias híbrida e elétrica não serem recentes, para a geração atual de consumidores representam uma novidade, e devem, portanto, ser tratadas como um novo produto a ser inserido no mercado (BARAN, 2012).

## 2.2 DEFINIÇÕES DO VEÍCULO ELÉTRICO

É importante definir os conceitos relacionados aos veículos dotados de motor elétrico, um veículo elétrico é aquele que possui seu sistema de tração dotado por pelo menos um motor elétrico. Enquanto os veículos com MCI podem ter um motor elétrico, só nos elétricos é que ele estará direta ou indiretamente ligado à tração do veículo. Os motores elétricos em veículos a combustão interna normalmente estão ligados a sistemas periféricos, como o acionamento de vidros elétricos (CASTRO; FERREIRA, 2010).

### 2.2.1 Veículos Elétricos Puros

Os veículos puramente elétricos possuem como elemento responsável pela tração um ou mais motores elétricos, não havendo MCI. A energia utilizada para movimentar o veículo provém de baterias, ou placas fotovoltaicas (energia solar), ou ligados à rede elétrica como os trólebus, ônibus elétrico alimentado por uma catenária de dois cabos superiores a partir da qual recebe a energia elétrica mediante duas hastes, ou células combustíveis, são células eletroquímicas que convertem combustível em eletricidade, entre outros. As grandes montadoras têm optado pelos modelos a bateria (CASTRO; FERREIRA, 2010).

Os VE's puros utilizam no sistema de propulsão motores elétricos e baterias eletroquímicas (via de regra) como fontes de energia. A seguir são elencadas algumas vantagens dos veículos equipados com propulsão elétrica em relação aos equipados com MCI (TANAKA, 2013):

- Possui eficiência energética maior;
- Produz menos poluentes;
- É possível utilizar em ambientes fechados;
- São mais silenciosos;
- A manutenção é simples e fácil;
- Pode desenvolver alto torque com baixa rotação;

- Em consequência da menor vibração provocam menos fadiga ao motorista;
- Quando parados não consomem energia.

No entanto, há desvantagens, as quais são elencadas abaixo (TANAKA, 2013):

- A autonomia é menor;
- O custo ainda é elevado;
- Necessita substituir as baterias ao final do ciclo de vida;
- O tempo de reabastecimento ainda é alto.

Na Figura 14 é apresentado um conceito do veículo elétrico a bateria. O sistema de tração contém:

- Um conjunto armazenador de energia para estocar energia;
- Um ou mais motores elétricos;
- E um controlador/conversor de potência.

Para recarregar as baterias pode-se utilizar a energia proveniente da rede elétrica, ou outra fonte de energia elétrica. A unidade de recarga de bateria pode ser transportada a bordo do veículo, ou estar disponível no ponto de recarga. A velocidade do veículo é ajustada com o auxílio do controlador que adéqua a energia das baterias às características do motor e gerencia a potência fornecida (TANAKA, 2013).

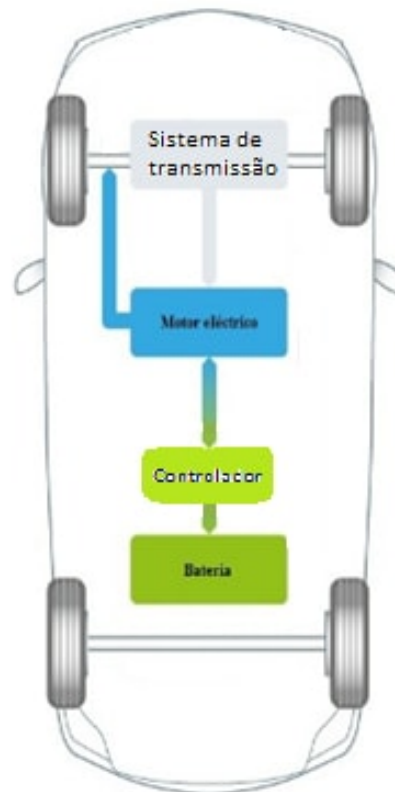
A frenagem regenerativa auxilia na recuperação de energia, bem como proporciona uma frenagem sem atrito (TANAKA, 2013).

Com relação às variações de características de tração elétrica e fontes de energia, é possível uma diversidade de configurações de VE's, conforme apresentado na Figura 15.

Onde, em (a) o MCI é substituído por um motor elétrico, ficando assim constituído o sistema de tração: um motor elétrico, uma embreagem, uma caixa de velocidades e um diferencial. Para ligar ou desligar a potência do ME às rodas motrizes é utilizada a embreagem. Para modificar o perfil velocidade-potência (torque) é utilizada a caixa de velocidade. O diferencial, geralmente um conjunto de engrenagens



**Figura 14 – Conceito de VE com baterias.**



**Fonte: Adaptado de Rodrigues (2013).**

planetárias, pode ser utilizado para acionar as rodas dos dois lados com velocidades diferentes.

Em (b) utiliza um motor que trabalha com potência constante em uma grande faixa de velocidades. É reduzido o tamanho e peso da transmissão mecânica com essa configuração.

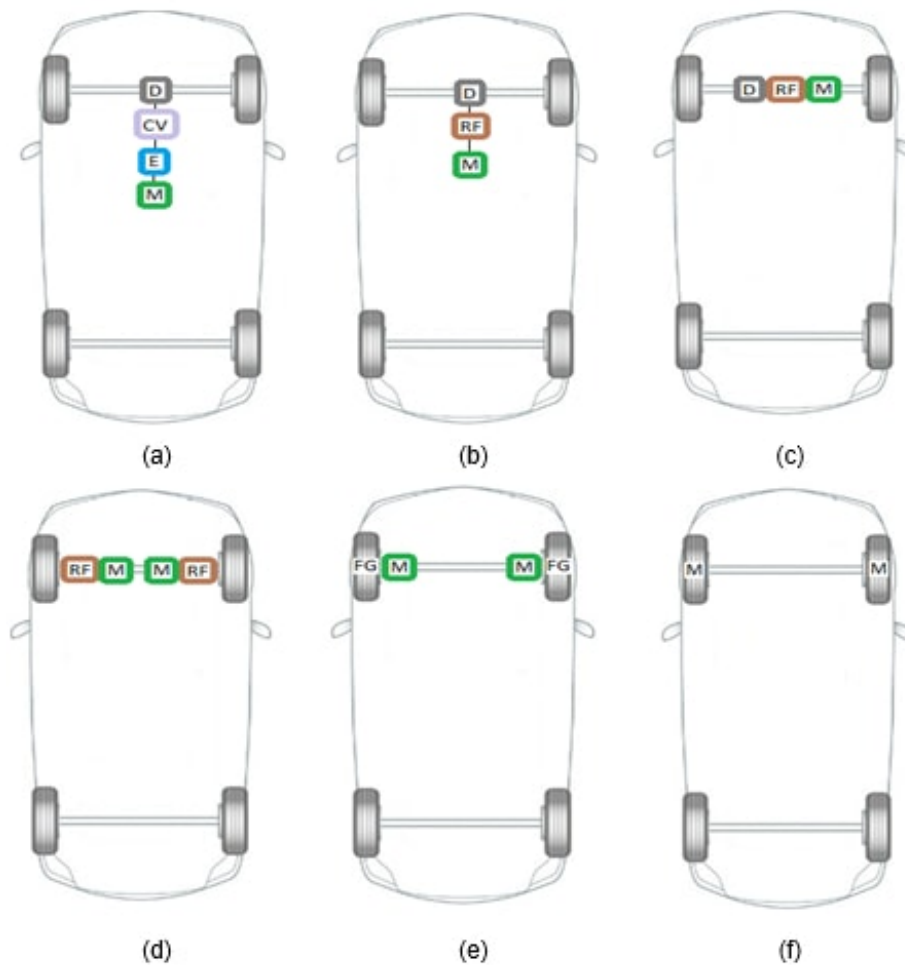
Em (c) o ME, a caixa de redução e o diferencial podem ser incorporados em um único sistema.

Em (d) são utilizados dois motores de tração, sendo assim substituído o diferencial mecânico. Cada motor aciona uma roda, e podem atuar com velocidades diferentes.

Em (e) pode-se utilizar o motor dentro da roda, esse sistema é denominado *in-wheel*. Para aumentar o torque e reduzir a velocidade pode-se utilizar um conjunto de engrenagens planetárias.

Em (f) pode-se eliminar integralmente o sistema de transmissão mecânica entre o ME e a roda de tração, o rotor externo de um ME *in-wheel* de baixa rotação

**Figura 15 – Configurações de VE's puros.**



E = Embreagem; D = Diferencial; RF = Redução Fixa; CV = Caixa de Velocidades  
M = Motor.

**Fonte: Adaptado de Tanaka (2013).**

pode ser conectado diretamente à roda de tração. Porém, é necessário que o motor possua um torque maior para partir e acelerar o veículo.

De maneira simplificada, é possível classificar os veículos elétricos em duas categorias: híbridos e puros. Como neste trabalho somente está sendo realizado o estudo de veículos elétricos puros, as definições a seguir não incluirão os VEH.

Devido à utilização de um MCI os modelos híbridos possuem maior autonomia em relação aos VE's puros, nos demais parâmetros os VEH's e os VE's são similares (CASTRO; FERREIRA, 2010).

### 2.2.2 Veículos Elétricos Híbridos

Os veículos elétricos híbridos possuem essa designação por combinarem um MCI com um gerador, uma bateria e um ou mais ME's. Atualmente a principal função dos VEH's é atuar no auxílio à redução do gasto de energia associado à baixa eficiência dos processos mecânicos quando comparados aos sistemas eletrônicos (CASTRO; FERREIRA, 2010).

Um dos principais motivos da baixa eficiência energética de um MCI deve-se à geração de calor causada pelo atrito entre as partes móveis. É estimado que para movimentar um automóvel somente 15% do potencial energético é aproveitado (CASTRO; FERREIRA, 2010).

### 2.3 ARMAZENADORES DE ENERGIA

Com relação ao armazenadores de energia existem alguns conceitos que são necessários apresentar suas definições (RODRIGUES, 2013):

- Capacidade de armazenamento: É a quantidade efetiva de energia.
- Potência disponível: é expresso com relação à potência máxima de carga e descarga.
- Autonomia: é a razão entre a capacidade de armazenamento de energia e a potência máxima de descarga.
- Rendimento: é a relação entre a energia armazenada e a energia disponibilizada.
- Durabilidade: é referente à quantidade de vezes de carga e descarga (ciclo) que a unidade de armazenamento pode liberar o nível de energia para a qual foi projetada.
- Custos: estão inclusos o investimento inicial e os custos de operação.
- Restrições de operação: está relacionado com a segurança.
- Densidade de energia: é a relação entre a quantidade de energia pelo volume ou massa.

- Densidade de potência: é a taxa temporal de transferência de energia por unidade de volume.

As tecnologias de armazenamento de energia podem ser classificadas conforme apresentado a seguir (RODRIGUES, 2013):

- Armazenamento de energia elétrica: bobinas supercondutoras e supercapacitores.
- Armazenamento de energia eletroquímica: células combustíveis e baterias.
- Armazenamento de energia mecânica: volantes de inércia, aproveitamentos hidroelétricos reversíveis (bombagem de água) e sistemas de ar comprimido.
- Armazenamento de energia térmica: calor em materiais cerâmicos e sais fundidos.

Nos veículos elétricos os armazenadores de energia elétrica são essenciais para o funcionamento do sistema de propulsão elétrico. Dentre os componentes constituintes do sistema responsável pela propulsão em um VE os armazenadores são os maiores responsáveis pelo maior custo, peso e volume (LARMINIE; LOWRY, 2004; BENTO, 2015). Os armazenadores de energia elétrica devem ser dimensionados de maneira a atender os requisitos de fornecimento de potência necessária para o funcionamento do ME, bem como possuir capacidade de armazenamento suficiente para atender o ciclo proposto (BURKE; ZHAO, 2012; TANAKA, 2013). Neste trabalho com relação aos armazenadores serão descritos somente as baterias e supercapacitores.

### 2.3.1 Baterias

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. Por célula entende-se dois eletrodos, um positivo e um negativo, unidos através de um eletrólito que é o meio responsável pela condução dos íons entre dois eletrodos e o separador que divide fisicamente as parcelas com diferentes polaridades. 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. Em baterias recarregáveis, a reação química pode ser revertida através da inversão da corrente elétrica fazendo com que a bateria retorne a um determinado estado de carga (SOC) (REVOREDO, 2007; CORREA et al., 2013).

Nos VE's existe a necessidade de se utilizar bateria tracionaria, que pode ser primária ou secundária. As baterias tracionarias diferem das baterias utilizadas para partida, iluminação entre outras comodidades, pois elas são projetadas para fornecer energia por períodos prolongados, sendo projetadas para altos valores de corrente e para descarga profunda (MACHADO, 2015).

No veículo elétrico puro a bateria é o componente principal. Portanto, deve ser dimensionada de maneira a atender algumas características, seguem as mais importantes (MACHADO, 2015):

- **Segurança:** esse aspecto é de relevante importância, sendo a fuga térmica uma preocupação expressiva. As baterias possuem dispositivos de segurança e invólucros robustos, para evitar tais problemas, porém há possibilidade de acidentes. Também deve ser projetada para o mau uso e tempo de vida.
- **Desempenho:** o funcionamento da bateria é afetado pelas condições do clima, pois são sensíveis ao frio e ao calor, havendo a necessidade de controle de temperatura. Sendo que, a energia para este controle de temperatura vem da própria bateria, fato este que acarreta redução no desempenho.
- **Ciclo de vida:** muitas das baterias utilizadas em VE's possuem garantia entre oito e dez anos ou 100 mil milhas. Principalmente em locais quentes e devido ao envelhecimento as baterias perdem a capacidade. Não existem dados com relação ao ciclo de vida para usos diferentes e outras temperaturas. Para alcançar o tempo de garantia os fabricantes super dimensionam os bancos de bateria, com o objetivo de contrabalançar as perdas de capacidade.
- **Energia específica:** é a densidade de energia, refletindo na autonomia do VE.
- **Potência específica:** referente a capacidade de fornecer energia ao motor elétrico nas acelerações.
- **Custo:** para atender os itens de segurança, ciclo de vida, autonomia. Ainda é um entrave na popularização do VE, pois faz com que o valor final do veículo fique

elevado.

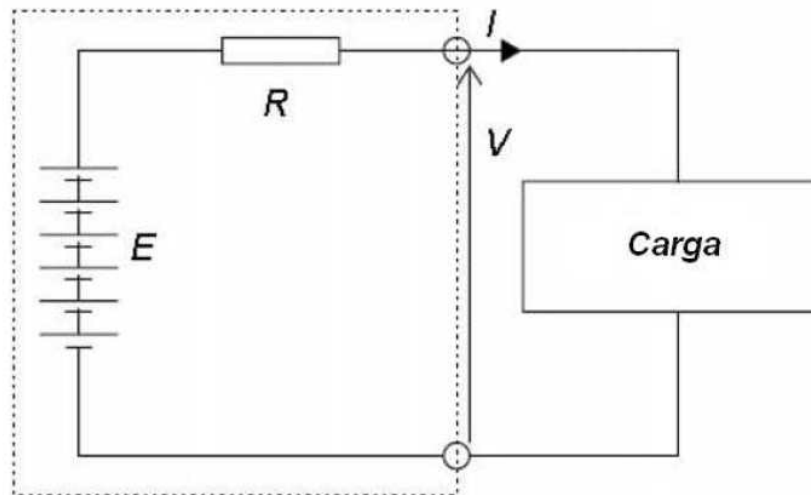
Nas baterias alguns parâmetros são importantes considerar, os quais são apresentados a seguir.

### 2.3.1.1 Tensão

Pode-se representar de maneira simplificada uma bateria, conforme o circuito elétrico apresentado na Figura 16, onde a tensão de circuito aberto é representado por  $E$ ,  $R$  representa a resistência interna, e a tensão entre os polos da bateria é representada por  $V$  (CORREA et al., 2013).

Ainda de acordo com Correa et al. (2013) a tensão entre os polos da bateria tem variação conforme a corrente solicitada pelo circuito. As perdas associadas ao aumento de corrente entre os polos são representadas pela resistência interna. São considerados a queda de tensão por conta do estado de carga da bateria, bem como tensão de operação, em modelos mais detalhados.

**Figura 16 – Circuito elétrico simplificado equivalente a uma bateria.**



**Fonte: Correa et al. (2013).**

### 2.3.1.2 Capacidade de Carga

No sistema internacional de unidades o (Coulomb) é a unidade representativa de carga, sendo esta muito pequena, pois representa o fluxo de um Ampère em um segundo, sendo uma quantidade de energia muito baixa para aplicações como VE's,

portanto a capacidade de carga de uma bateria é geralmente definida em termos de Ampères-hora (Ah). A quantidade de Ampères-hora indica o número de horas que uma bateria é capaz de fornecer 1 Ampère de corrente. Por exemplo, uma bateria com capacidade de 10 Ah é análogo dizer que ela é capaz de fornecer 1 A de corrente durante 10 horas ininterruptas. Contudo, a proporcionalidade não se verifica, ou seja, ao solicitar 2 A, não significa que o tempo de fornecimento de corrente será de 5 horas (CORREA et al., 2013).

A capacidade de carga de uma bateria é comumente especificada pelos fabricantes correlacionada ao tempo de descarga. Em baterias como as utilizadas em VE's, as quais possuem maior capacidade de carga, normalmente são especificadas para tempo de descarga de 5 horas. Por exemplo para uma bateria especificada com capacidade nominal de 30 Ah relacionada ao tempo de descarga de 5 horas, significa dizer que a mesma possui a capacidade de fornecer uma corrente ( $I = \frac{30}{5} = 6 [A]$ ) no período de 5 horas consecutivas, estando completamente descarregada ao final desse tempo (CORREA et al., 2013).

Diante do exposto, para projetos de VE's é importante poder prever o tempo e quantidade de descarga de um banco de baterias considerando a corrente solicitada. Uma das maneiras de realizar essa estimativa é utilizando uma capacidade de referência, a qual é denominada Capacidade de *Peukert* e será definida mais adiante (CORREA et al., 2013).

### 2.3.1.3 Densidade de Energia

A densidade de energia está relacionada com a quantidade de energia armazenada por unidade de volume ou massa, e pode ser denotada em termos de Wh/m<sup>3</sup> ou Wh/Kg, onde Wh = Watt-hora, sendo a quantidade de energia. A quantidade de energia pode ser encontrada através da Equação 1, onde C é a capacidade de carga, em Ah, e V a tensão (Volts) (REVOREDO, 2007; CORREA et al., 2013).

$$Energia = CV \quad (1)$$

Um importante parâmetro a ser considerado para projetos é a densidade de

energia, pois é possível dimensionar o tamanho (volume) de uma bateria relacionado com a capacidade energética necessária/desejada, bastando dividir a quantidade de energia pela densidade de energia (CORREA et al., 2013).

#### 2.3.1.4 Eficiência Energética

A eficiência está relacionada com a quantidade de energia necessária para realizar o carregamento da carga da bateria e a energia realmente entregue ao sistema. A bateria não devolve toda a energia que foi fornecida para seu carregamento devido às perdas, sendo assim, a razão entre a quantidade de energia devolvida e a quantidade de energia utilizada para o carregamento é denominado eficiência da bateria (CORREA et al., 2013).

Diversos fatores afetam a eficiência de uma bateria, sendo alguns deles, temperatura de operação, taxa de carga, tipo de bateria, e também o estado de carga da bateria (CORREA et al., 2013).

#### 2.3.1.5 Capacidade de *Peukert*

Possuindo um tempo de descarga ( $t$ ), e uma capacidade de referência ( $C$ ), para os quais foi especificada uma bateria, é possível calcular o tempo real de descarga de uma bateria considerando a corrente solicitada pela carga (potência solicitada) considerando uma capacidade de carga de referência, a qual é constante, esta é denominada Capacidade de Peukert, conforme Equação 2 (CORREA et al., 2013).

$$C_p = (I_{bat})^k * t \quad (2)$$

Onde,  $I_{bat}$  é a corrente solicitada pela carga, e  $k$  é uma constante denominada de Coeficiente de *Peukert*. Assim, conhecendo a Capacidade de *Peukert*, pode-se calcular a capacidade e o tempo de descarga para os quais a bateria foi fabricada/especificada, podendo determinar o tempo de descarga relacionado a qualquer solicitação de corrente (CORREA et al., 2013).



### 2.3.1.6 Estado de Carga

A carga removida de uma bateria pode ser obtida através da Equação 3, onde  $\delta_t$  é o intervalo de tempo,  $I_{bat}$  é a corrente constante solicitada à bateria (LARMINIE; LOWRY, 2004; CORREA et al., 2013).

$$Q_t = \delta_t * (I_{bat})^k \quad (3)$$

Sendo  $\delta_t$  em segundos, a carga total removida da bateria após n instantes de tempo,  $Q_n$ , em Ah, é obtido pela Equação 4 (CORREA et al., 2013).

$$Q_n = Q_{n-1} + \frac{\delta_t * (I_{bat})^k}{3600} \quad (4)$$

Considerando a Equação 4 um integrador discreto. Em tempo contínuo, fazendo  $\delta_t \rightarrow 0$ , é possível reescrever a equação conforme apresentado na Equação 5, onde é obtido a quantidade de carga (energia) retirada da bateria em um determinado intervalo de tempo (CORREA et al., 2013).

$$Q(t) = \frac{1}{3600} \int_{t_1}^{t_2} I_{bat}^k dt \quad (5)$$

Para encontrar o estado de carga da bateria pode-se utilizar a Equação 6, onde C é a capacidade máxima de carga da bateria (CORREA et al., 2013).

$$SOC = 1 - \frac{1}{3600} \int_{t_1}^{t_2} \frac{I_{bat}^k}{C_p} dt = 1 - \frac{1}{3600} \int_{t_1}^{t_2} \frac{I_{bat}^k}{C} dt \quad (6)$$

Portanto, integrando a corrente elétrica no tempo é obtido a quantidade de energia fornecida pela bateria. Fazendo a razão entre esta energia e a energia máxima da bateria obtém-se a porcentagem de descarga da bateria. Sendo assim, a diferença

entre a carga máxima da bateria e a quantidade de descarga é denominado de estado de carga (CORREA et al., 2013).

Também é encontrado muito na literatura o termo DoD, que significa profundidade de descarga, sendo o inverso do estado de carga, SOC, conforme apresentado na Equação 7 (CORREA et al., 2013).

$$DoD = 1 - SOC \quad (7)$$

A tensão de circuito aberto (E) depende do número de células e do estado de carga da bateria, podendo ser calculada pela Equação 8 (CORREA et al., 2013).

$$E = n * [2 + 0,15(SOC)] \quad (8)$$

Através da lei de Ohm é possível determinar a tensão entre os polos da bateria, conforme Equação 9, onde  $R_{int}$  representa a resistência interna da bateria sendo considerada constante em função da capacidade da bateria e é obtida considerando a corrente que descarregaria a bateria por completo (CORREA et al., 2013).

$$V = E - R_{int}I \quad (9)$$

### 2.3.1.7 Potência Requerida da Bateria

Uma potência P será exigida do ME quando o veículo trafegar a uma determinada velocidade, sendo que nos VE's essa potência será requerida diretamente da bateria. Em geral pode-se obter o valor da potência através da Equação 10 (CORREA et al., 2013).

$$P_b = V_b I \quad (10)$$

Onde,  $P_b \triangleq$  potência da bateria.

Associando a Equação 9 com a Equação 10, é obtida a Equação 11 (CORREA et al., 2013).

$$P_b = V_b I = (E - RI)I = EI - RI^2 \quad (11)$$

Isolando I, é obtida a Equação 12.

$$I = \frac{-E + \sqrt{E^2 + 4RP_b}}{2R} \quad (12)$$

A Equação 12 representa a corrente solicitada pelo ME.

### 2.3.1.8 Tipos de Baterias

Atualmente há cinco principais tipos de bateria utilizadas em VE's, nas subseções a seguir são descritas as principais características delas (BENTO, 2015; COSTA, 2009; MACHADO, 2015; LOPES et al., 2012):

#### 2.3.1.8.1 Chumbo-Ácido (PbA)

- Utilizadas em veículos com MCI, mais comuns e baratas;
- Para utilização em VE's é necessária a substituição do eletrólito líquido por gel, o que aumenta o custo;
- São as recarregáveis mais baratas por kWh de carga;
- Baixa energia específica em torno de 20 a 35 Wh/kg;
- Potência específica em torno de 250 W/kg;
- Ciclos de vida em torno de 800 para 80% de capacidade;

- Não é favorável ao meio ambiente.

#### 2.3.1.8.2 *Níquel*

- Níquel-Zinco: Ciclo de vida curto, menos nociva ao meio ambiente;
- Níquel-Ferro: alto custo de manutenção, pesada, taxa de auto-descarga alta;
- Níquel-Cádmio: Efeito memória, Materiais tóxicos, Custo de manutenção alto, Energia específica duas vezes maior que a de Chumbo-Ácido, Alta potência específica, Ciclo de vida longo, Faixa de temperatura de operação de -40 °C a +80 °C, Baixa auto-descarga, Boa capacidade de armazenamento de energia, Robustas mecânica e eletricamente, Podem ser recarregadas no período de 1 hora, Tensão de operação de cada célula de 1,2vV, o Cádmio tem alto custo e é ambientalmente nocivo;
- Níquel-hidreto metálico: Favorável ao meio ambiente, taxa de auto-descarga alta, energia específica aproximadamente 65 Wh/kg, Potência específica em torno de 200W/kg, difícil obter modelo para tração, Tensão de operação de cada célula de 1,2V, temperatura ambiente para operação, Podem ser recarregadas no período de 1 hora, ciclo de vida longo;
- Cloreto de Níquel-Sódio (ZEBRA): Energia específica em torno de 100 Wh/kg, potência específica em torno de 150 W/kg, tensão de operação de cada célula de 2 V, poucos fornecedores comerciais, quanto a segurança é estável, temperatura de operação entre 300 e 350 °C, taxa de auto-descarga alta, tempo para recarga 8 horas, ciclo de vida longo, resistente à sobrecarga e sobre descarga.

#### 2.3.1.8.3 *Íon-Lítio*

Na Tabela 3, são apresentados os principais tipos de bateria de íon-lítio, especificando a tensão de operação, limite de carga, ciclo de vida, temperatura de funcionamento, energia específica, carregamento, segurança e custo.

**Tabela 3 – Principais Tipos de Baterias de Íon-Lítio**

Especificações	Lítio-Cobalto LiCoO <sub>2</sub> (LCO)	Lítio-Manganês LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub> (LMO)	Lítio-Fosfato LiFePO <sub>4</sub> (LFP)	NMC LiNiMnCoO <sub>2</sub>
Tensão	3,6V	3,8V	3,3V	3,6V; 3,7V
Limite de Carga	4,2V	4,2V	3,6V	4,2V
Ciclo de Vida	500-1000	500-1000	1000-2000	1000-2000
Temperatura de Funcionamento	Média	Média	Boa	Boa
Energia Específica	150-190 Wh/kg	100-135 Wh/kg	90-120 Wh/kg	140-180 Wh/kg
Carregamento	1C	10C, pulso 40C	35C contínua	10C
Segurança	Média. Precisa de circuito de proteção e balanceamento de célula para blocos de múltiplas células .		Muito seguro, precisa de equilíbrio celular e proteção em tensão.	Mais seguro do que LCO. Há necessidade de Proteção celular.
Custo	Matéria prima alta		Alto	Alto

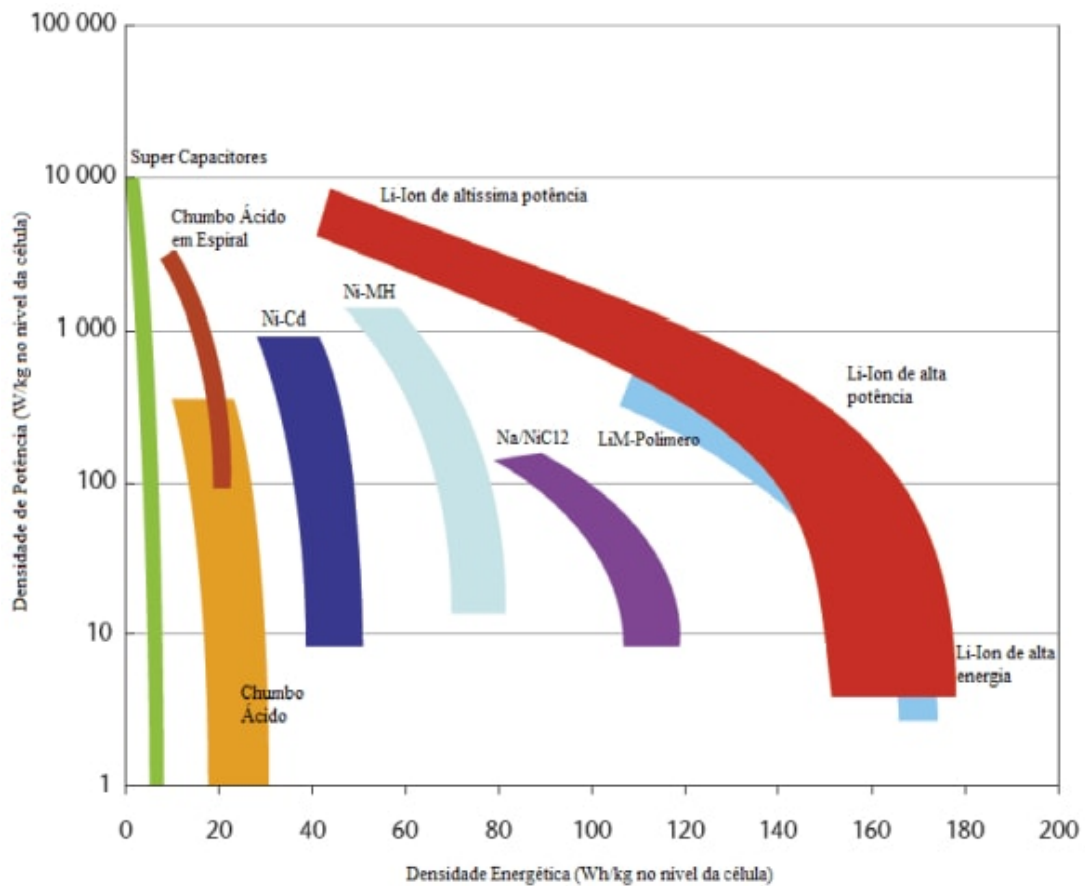
Fonte: MACHADO (2015).

#### 2.3.1.8.4 Zinco-Ar

- Alta energia específica em torno de 230 Wh/kg;
- Alta densidade de energia em comparação com as de Lítio;
- Baixa potência específica em torno de 105 W/kg;
- Ciclo de vida superior a 2000;
- Necessidade de substituição dos elementos;
- Tensão de operação de cada célula de 1,2V;
- Poucos fornecedores;
- Temperatura ambiente para operação;
- Taxa de auto-descarga alta.

Na sequência pode-se observar na Figura 17, a densidade energética pela densidade de potência (curvas de Ragone) para alguns tipos de baterias.

**Figura 17 – Densidade energética e Densidade de Potência de Diferentes Tipos de Bateria.**



Fonte: Freitas (2015).

Contudo, quanto maior a densidade energética ou a densidade de potência, maiores serão os valores das baterias.

### 2.3.2 Supercapacitores

Também chamados de ultracapacitores, são componentes capazes de armazenar energia sobre superfície de placas paralelas. Possuem alta densidade de potência, porém baixa densidade energética, significando alta capacidade de carga e descarga, mas baixa capacidade de armazenamento. As características variam conforme o material utilizado na construção, a densidade energética pode variar entre 4 e 8 Wh/kg, a potência específica fica em torno de 1 a 5 kW/kg (FREITAS, 2015; LOPES et al., 2012).

Na atualidade existem três tipos de supercapacitores utilizados em VE's, capacitores de dupla camada elétrica, pseudocapacitores e capacitores híbridos. O que os difere é o mecanismo de armazenamento de energia e os materiais utilizados nos eletrodos. O tempo de vida de um supercapacitor pode chegar a 40 anos (TIE; TAN, 2013; BENTO, 2015).

Desde os anos 1990 os supercapacitores são desenvolvidos para aplicações automotivas. A maior parte das pesquisas são em cima dos capacitores de dupla camada usando carbono microporoso nos dois eletrodos. Porém os supercapacitores híbridos tem ganhado atenção dos pesquisadores (BURKE, 2007; BURKE; MILLER; ZHAO, 2012; TANAKA, 2013).

Com o objetivo de aumentar a densidade de energia dos supercapacitores, atualmente estão sendo realizadas diversas pesquisas utilizando materiais pseudo capacitivos ou materiais equivalentes ao das baterias em um dos eletrodos, com carbono microporoso no outro eletrodo (BURKE, 2007; BURKE; MILLER; ZHAO, 2012; TANAKA, 2013).

### 2.3.2.1 Princípio de funcionamento

O princípio de funcionamento é igual ao dos capacitores comuns, onde a energia elétrica é armazenada de forma direta armazenando carga elétricas. As cargas podem ser armazenadas em objetos condutores. A capacidade eletrostática é definida pela capacidade desses objetos armazenar cargas elétricas, um condutor carregado com certa quantidade de carga  $Q$  faz com que o mesmo possua um potencial elétrico, conforme Equação 13 (RODRIGUES, 2013).

$$Q = C * V \text{ (em Coulomb)} \quad (13)$$

A permissividade do dielétrico ( $\epsilon$ ), a área das placas ( $A$ ), e a distância entre as placas ( $d$ ) determinam a capacidade, conforme Equação 14. A energia armazenada no capacitor depende da sua capacidade e do quadrado da tensão, conforme Equação 15 (RODRIGUES, 2013).

$$C = \epsilon * \frac{A}{d} * V \text{ (em Farad)} \quad (14)$$

$$C = \frac{1}{2} * C * V^2 \text{ (em Joule)} \quad (15)$$

A quantidade de energia armazenada em um capacitor é proporcional ao quadrado do valor de sua tensão. Entretanto, a tensão é limitada pelo valor máximo de ruptura do dielétrico, o qual depende diretamente da distância entre as placas. Pode-se aumentar a capacidade, aumentando a área das placas, aumentando a permissividade, ou diminuindo a distância entre as placas (RODRIGUES, 2013).

A potência máxima ( $P_{max}$ ) de um supercapacitor pode ser obtida pela Equação 16, onde  $V$  é a tensão da célula, e  $R$  é a resistência série total equivalente do supercapacitor (RODRIGUES, 2013).

$$P_{max} = \frac{V^2}{4 * R} \quad (16)$$

### 2.3.2.2 Critério de Desempenho dos supercapacitores

A taxa de descarga do supercapacitor pode ser rápida, variando entre 0,3 e 30 segundos. A eficiência no processo de descarga nos supercapacitores também é bastante alta e pode ser calculada através da Equação 17, e no processo de recarga conforme Equação 18, onde  $V_t$  é a tensão terminal do supercapacitor e  $V_{SC}$  é a tensão no capacitor (BELHACHEMI; RAEL; DAVAT, 2000; FERREIRA; POMILIO, 2005; LOPES et al., 2012).

$$\eta_d = \frac{V_t}{V_{SC}} \quad (17)$$



$$\eta_c = \frac{V_{SC}}{V_t} \quad (18)$$

Através da energia necessária para carregar um supercapacitor é possível determinar a energia armazenada ( $E_{SC}$ ), conforme apresentado na Equação 19, onde C é a capacitância no supercapacitor (BELHACHEMI; RAEL; DAVAT, 2000; FERREIRA; POMILIO, 2005; LOPES et al., 2012).

$$E_{SC} = \int_0^t V_{SC} * I_{SC} dt = \int_0^t C V_{SC} * dV_{SC} dt = \frac{1}{2} * C V_{SC}^2 \quad (19)$$

A energia armazenada no supercapacitor atinge o valor máximo sob tensão nominal. No entanto, se aumentar a tensão pode ocorrer um aumento significativo na energia armazenada conforme fica indicado na Equação 19. Porém em aplicações reais é impossível utilizar toda a energia armazenada devido à baixa potência em baixo estado de carga. É necessário definir uma tensão limite mínima ( $V_{t_{min}}$ ) abaixo da qual o supercapacitor não libera energia. Sendo assim, a energia disponível é menor do que o valor total, esse valor pode ser obtido através da Equação 20, onde  $V_{t_{max}}$  é a tensão nominal do supercapacitor (EHSANI; GAO; EMADI, 2009; LOPES et al., 2012).

$$E_{SC} = \frac{1}{2} * C * (V_{t_{max}}^2 - V_{t_{min}}^2) \quad (20)$$

Comercialmente podem ser encontrados supercapacitores de carbono/carbono (células individuais e módulos). Podendo ser encontrados dispositivos com altos valores de capacitância de 1000 F a 7000 F, sendo indicados para veículos de alta potência (BURKE, 2007; BURKE; MILLER; ZHAO, 2012).

Na Tabela 4 são apresentadas as características de vários dispositivos comerciais. As densidades de energia (Wh/kg) descritas referem-se à energia utilizável, baseada em testes de descarga constante de  $V_0$  a  $\frac{1}{2} V_0$ . As densidades de potência de

**Tabela 4 – Características Alguns Supercapacitores Comerciais**

Fabric.	Tensão [V]	Capacitância [F]	Resistência [mΩ]	RC [s]	Densidade de energia Wh/kg (1)	Densidade de potência W/kg (2)	Densidade de pot. imp. casada W/kg	M [kg]
Maxwell	2,7	2885	0,375	1,1	4,2	994	8836	0,55
Maxwell	2,7	605	0,90	0,55	2,35	1139	9597	0,20
Vinhatech	2,7	336	3,5	1,2	4,5	1085	9656	0,054
Vinhatech	3,0	342	6,6	2,25	5,6	710	6321	0,054
loxus	2,7	3000	0,45	1,4	4,0	828	7364	0,55
loxus	2,7	2000	0,54	1,1	4,0	923	8210	0,37
Sheleton	2,85	350	1,2	0,42	4,0	2714	24200	0,07
Sheleton	3,4	850	0,8	0,68	6,9	2796	24879	0,145
Yunasko	2,7	510	0,9	0,46	5,0	2919	25962	0,078
Yunasko	2,75	480	0,25	0,12	4,45	10241	91115	0,060
Yunasko	2,75	1275	0,11	0,13	4,55	8791	78125	0,22
Yunasko	2,7	7200	1,4	10	26	1230	10947	0,119
Yunasko	2,7	5200	1,5	7,8	30	3395	30200	0,068
Ness	2,7	1800	0,55	1,00	3,6	975	8674	0,38
Ness	2,7	3640	0,4	1,3	4,4	982	8728	0,522
Ness	2,7	3160	0,24	1,22	4,3	958	8532	0,89
LS Cable	2,8	3200	0,25	0,80	3,7	1400	12400	0,63
BatScap	3,8	2680	0,20	0,54	4,2	2050	18225	0,50
JME	3,8	1100	1,15	1,21	10	2450	21880	0,144
JME	3,8	2300	0,77	1,6	7,6	1366	12200	0,387

[1] Densidade de energia a 400 W/kg potência constante,  $V_{nom} \sim \frac{1}{2} V_{nom}$

[2] Potência baseada em  $P = \frac{9}{16} (1 - EF) \frac{V^2}{R}$ , EF = eficiência da descarga.

Fonte: Burke (2007), Burke, Miller e Zhao (2012)

pico são apresentadas tanto para impedância casada como para pulsos de eficiência a 95% (BURKE, 2007; BURKE; MILLER; ZHAO, 2012).

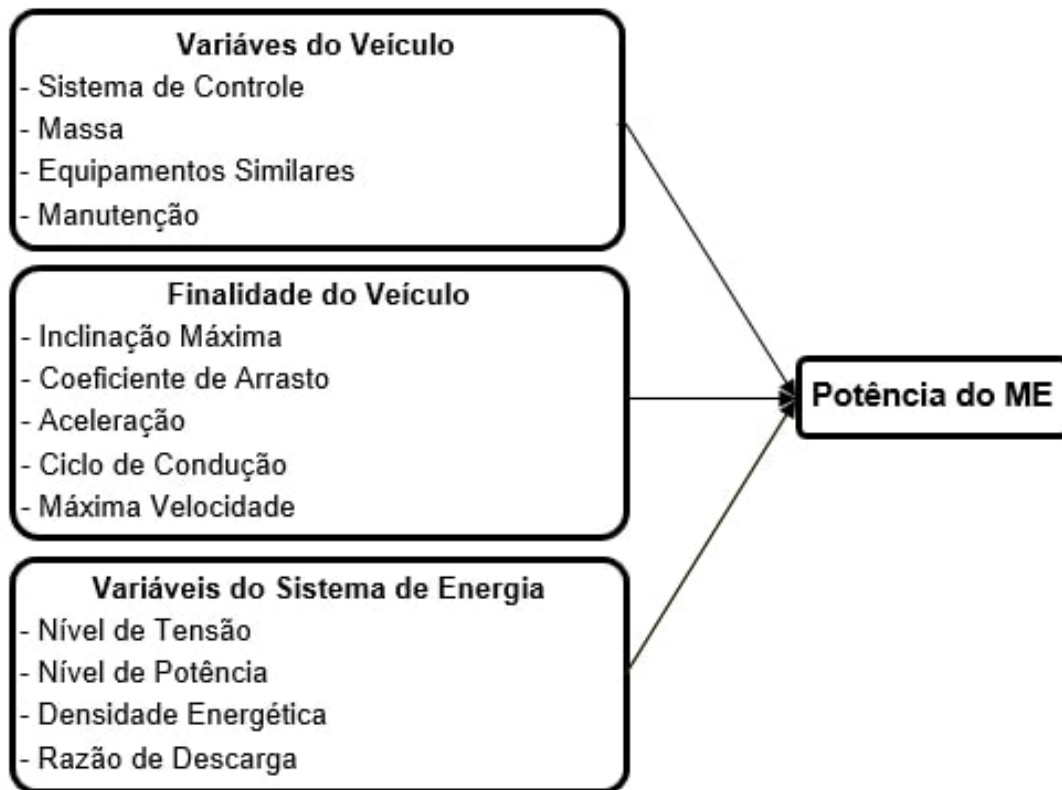
Em grande parte das aplicações com supercapacitores, a medida adequada da capacidade de potência é a densidade de potência de alta eficiência (TANAKA, 2013).

## 2.4 MÁQUINAS ELÉTRICAS

A função do ME é converter energia elétrica em energia mecânica, sendo também realizada a ação inversa, convertendo energia mecânica em energia elétrica, nessa função é um gerador. Essas características são aproveitadas em um VE, pois na função motor é usado para propulsionar o veículo, e durante as frenagens, frenagem regenerativa, funciona como gerador recuperando parte da energia para carregar as baterias (EHSANI; GAO; EMADI, 2009; BENTO, 2015). É necessário considerar algumas condições relevantes para a escolha do ME a ser utilizado para a tração do

VE, sendo elas apresentadas na Figura 18.

**Figura 18 – Interfaces de Potência para Escolha do ME.**



Fonte: Adaptado de Bottura e Barreto (1989), Bento (2015).

Algumas características importantes a ressaltar é que uma máquina elétrica com a mesma potência de um MCI terá menor tamanho e volume, também não são emissores de poluentes (CORREA et al., 2013).

Para aplicações em VE's os principais ME's utilizados são:

#### 2.4.1 Motor de Indução (CA)

Possui construção simples, é confiável, robusto, possui baixa manutenção, baixo custo, podendo operar em ambientes hostis. O limite máximo de velocidade pode ser aumentado devido à ausência de atrito da escova, aumentando o rendimento por conta do limite maior de velocidade. Variando a frequência da tensão consegue-se realizar o controle de velocidade dos motores de indução. Realizando o controle de orientação de campo do motor de indução é possível separar o controle de torque do controle de campo. Permitindo dessa maneira que o motor se comporte como um motor CC excitado separadamente, porém não tendo as mesmas limitações de

velocidade. No entanto, o controlador dos motores de indução tem custo maior em comparação com os controladores dos motores CC (XUE; CHENG; CHEUNG, 2008; BENTO, 2015).

#### 2.4.2 Motor de Relutância Comutada (CA)

A estrutura de rotor é extremamente simples, não possuindo enrolamento, imã, comutadores ou escovas. O motor possui boa tolerância a falhas. Como consequência pela construção simples e baixa inércia de rotor, o motor de relutância comutada possui uma aceleração muito rápida, e capacidade de operação de alta velocidade com uma região de potência constante. Possui torque de partida elevado e alta relação de torque-inércia. O motor de relutância comutada possui desvantagem com relação à ondulação no torque e ruído acústico. Porém, esses problemas não são cruciais na utilização em VE's (XUE; CHENG; CHEUNG, 2008; BENTO, 2015)

#### 2.4.3 Motor de Imã Permanente sem Escovas (CC)

São conhecidos pela elevada eficiência e potência. Com o uso de imãs permanentes é possível eliminar a necessidade de energia para a produção dos polos magnéticos no motor. Em consequência disso é possível alcançar eficiência maior que os motores CC, de indução, e relutância comutada. Ainda, o calor é dissipado de maneira eficaz para o meio. No entanto, a região de potência constante para os motores de imã permanente é menor em comparação aos outros ME's, por conta do enfraquecimento de campo que é bastante limitada, decorrente da presença do campo do imã permanente (ZERAOUZIA; BENBOUZID; DIALLO, 2006; XUE; CHENG; CHEUNG, 2008; BENTO, 2015).

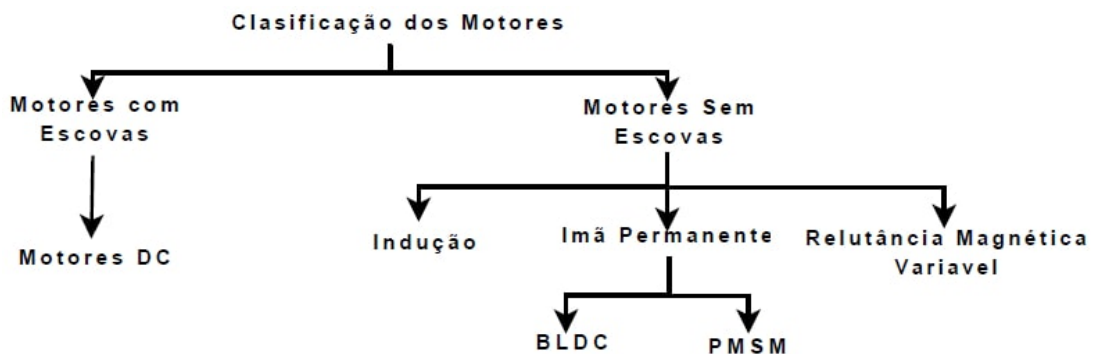
#### 2.4.4 Motor de Corrente Contínua com Escovas (CC)

Em consequência de as características de torque-velocidade atenderem bem os requisitos de tração do VE, bem como o controle de velocidade é relativamente simples, esses motores são utilizados em sistemas de propulsão elétrica. Contudo, o sistema de controle de um motor CC é volumoso, tem baixa eficiência, baixa confiabilidade, e devido a presença da escova requer maior necessidade de manutenção.

Possui alto torque com baixas velocidades, a velocidade é controlada com a variação da tensão. Pode-se encontrar motores com dois, quatro ou seis polos, isso depende da potência de saída e da tensão, podendo ter enrolamento de campo em série ou em derivação. Algumas restrições para o uso desse tipo de motor são tamanho, peso e a restrição da velocidade em razão das escovas e do comutador (ZERAOULIA; BENBOUZID; DIALLO, 2006; XUE; CHENG; CHEUNG, 2008; BENTO, 2015).

Na Figura 19 pode-se observar uma classificação geral dos motores.

**Figura 19 – Classificação Geral dos Motores.**



Fonte: Correa et al. (2013).

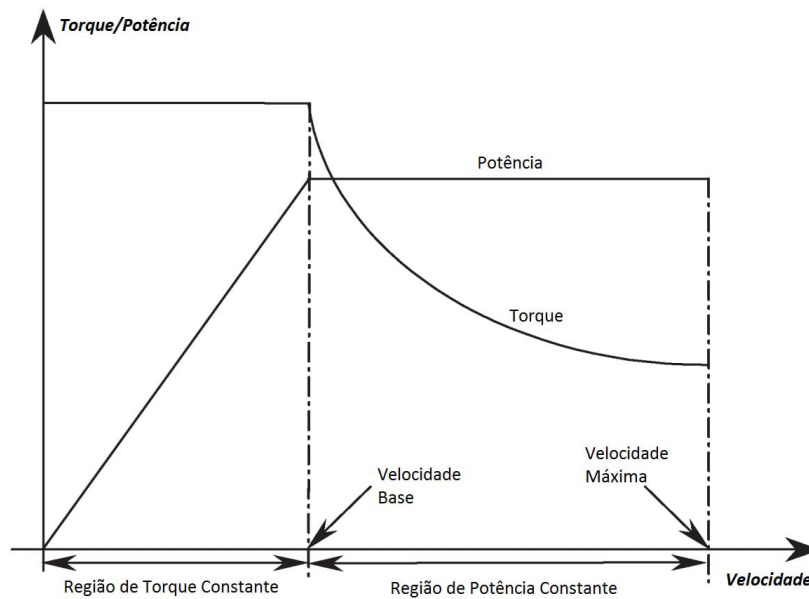
O comportamento dos motores elétricos é basicamente o mesmo com relação a torque e potência. A potência é linearmente crescente e o torque é constante até uma velocidade base, ao chegar a esta velocidade até a velocidade máxima do motor a potência fica constante e o torque sofre um declínio conforme apresentado na Figura 20 (BENTO, 2015).

## 2.5 ACIONAMENTO DOS MOTORES ELÉTRICOS

Para acionar os ME's é necessário um conversor, o qual tem a função de converter o valor de tensão, corrente ou frequência para um valor adequado para a aplicação nos motores, dessa forma realizando o controle de velocidade. Alguns exemplos típicos utilizados em VE's são os recortadores (CC-CC), os inversores (CC-CA), os retificadores (CA-CC) e os ciclo conversores (CA-CA) (BOTTURA; BARRETO, 1989; BENTO, 2015). Para os projetos de circuitos eletrônicos de potência para VE's é necessário abordar algumas questões (CHAN, 2007; BENTO, 2015), sendo elas:

- Projeto Elétrico: projeto do circuito de comutação, do circuito controlador, dispositivo de seleção de comutação, otimização da conversão de frequência e o

**Figura 20 – Comportamento de Torque e Potência de um ME.**



**Fonte: Zeraoulia, Benbouzid e Diallo (2006), Bento (2015).**

cálculo de perdas;

- Projeto do algoritmo de controle: necessário para alcançar a tensão, corrente e frequência desejada na saída, e para realizar o fluxo de potência bidirecional;
- Projeto magnético: projeto de indutores, capacitores e outros componentes magnéticos necessários para a filtragem, comutação e unidades de acionamento.

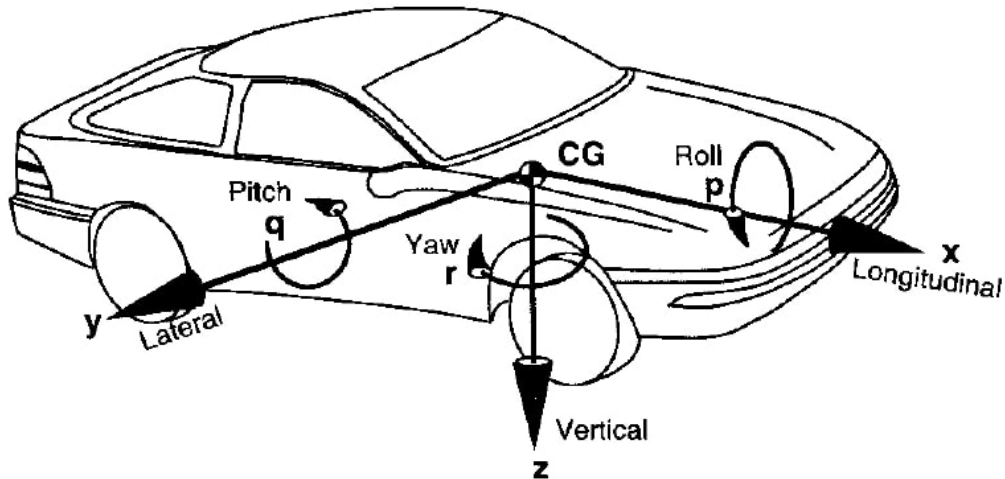
## 2.6 DINÂMICA VEICULAR

Para movimentar um veículo faz-se necessário vencer as forças que se opõem ao movimento (GILLESPIE, 1992; SANTOS, 2012):

- Forças de inércia: são dependentes da massa e das variações de velocidade;
- Forças gravitacionais: são dependentes da massa e da inclinação do pavimento;
- Forças aerodinâmicas: são dependentes do formato do veículo, da velocidade do vento e da velocidade do próprio veículo;
- Fricção interna: são dependentes do atrito das peças rotativas;
- Força de resistência ao rolamento: São dependentes do tipo de pavimento e da pressão dos pneus.

O estudo da dinâmica veicular usualmente é dividido entre três eixos, os quais correspondem aos eixos longitudinal, lateral e vertical. A norma J 670 (*Vehicle Dynamics Terminology*) da Sociedade de Engenheiros Automotivos (SAE), conforme pode ser observada a normatização na Figura 21 (GILLESPIE, 1992; CORREA et al., 2013; DIAS, 2013).

**Figura 21 – Disposição normalizada dos eixos de um automóvel (SAE J670).**



**Fonte: Gillespie (1992).**

Onde:

x - movimentos longitudinais, considerando positivo para frente do veículo;

y - movimentos laterais, sendo positivo para o lado direito do veículo;

z - movimentos verticais, positivos para baixo em relação ao veículo;

p - velocidade de rolagem (*roll*) em torno do eixo x;

q - velocidade de arfagem (*pitch*) em torno do eixo y;

r – velocidade de guinada (*yaw*) em torno do eixo z;

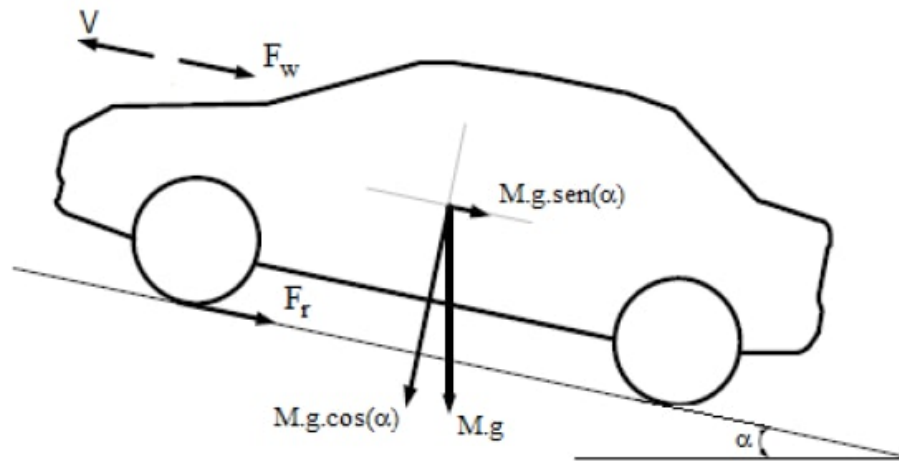
CG – centro de gravidade.

As funções de aceleração e frenagem estão profundamente conexas com a dinâmica longitudinal, a qual está relacionada com o deslocamento do eixo principal do veículo (eixo x), também estuda rotações em torno do eixo y. Os principais componentes dessa dinâmica são carroceria e o conjunto propulsor, onde identifica-se o motor, transmissão e rodas. A dinâmica lateral relaciona-se com o esterçamento das rodas, por meio do eixo do volante, o que possibilita a mudança de direção do veículo deslocamento no eixo y, estuda também rotações em torno do eixo x e z. Já a

dinâmica vertical estuda o movimento vertical no sentido do eixo z, em função das irregularidades do pavimento, estudando também as rotações em torno dos eixos x e y. (GILLESPIE, 1992; CORREA et al., 2013; DIAS, 2013).

Na Figura 22 pode-se observar as forças atuantes na direção longitudinal do movimento de um veículo. Onde, se considerar um veículo com massa  $M$ , subindo uma rampa com angulação  $\alpha$ , se movimentando com uma velocidade  $V$ , a força de tração do veículo deverá vencer a resistência ao rolamento, a resistência aerodinâmica, o acive e fornecer aceleração suficiente para alcançar a velocidade desejada, conforme serão definidas cada uma das resistência nas subseções mais a frente (GILLESPIE, 1992):

**Figura 22 – Forças atuantes em um veículo.**



**Fonte: Gillespie (1992).**

Existem diversas metodologias para dimensionar o sistema de tração para veículos elétricos fundamentada na dinâmica veicular, uma delas considera três condições de operação (EHSANI; RAHMAN; TOLIYAT, 1997):

- Aceleração inicial;
- Velocidade nominal do veículo;
- Velocidade máxima do veículo.

É afirmado que as restrições básicas de projeto para sistemas de tração para VE's são satisfeitas com as três condições, pois ao atender as condições acima elencadas o sistema de tração atuará de maneira satisfatória nos demais regimes de operação (EHSANI; RAHMAN; TOLIYAT, 1997).



As restrições de projeto são definidas pelos parâmetros que seguem:

- Velocidade nominal do veículo;
- Tempo especificado para o veículo atingir a velocidade nominal;
- Velocidade máxima do veículo;
- Massa do veículo (e outras grandezas físicas).

O propósito é satisfazer às restrições de projeto utilizando a menor potência, isto é, otimizar o perfil de torque-velocidade para o sistema de tração elétrica atendendo as condições operacionais, reduzindo peso, volume e custo (EHSANI; RAHMAN; TOLIYAT, 1997; TANAKA, 2013).

A seguir seguem os parâmetros que devem ser considerados para um sistema de tração (EHSANI; RAHMAN; TOLIYAT, 1997; TANAKA, 2013):

- Potência nominal do ME;
- Velocidade nominal do motor;
- Velocidade do motor;
- Extensão além da velocidade nominal do motor na faixa de operação a potência constante;
- Relação de transmissão entre a ponta de eixo do motor e o eixo das rodas.

A modelagem dos sistemas mecânicos proporciona afirmativa indiscutível da performance da aceleração de um veículo para o qual a potência do motor de tração é transmitida ao pavimento. Faz-se necessário considerar alguns pressupostos simplificadores para mensurar a aceleração de um veículo partindo do torque fornecido pelo sistema de propulsão, conforme segue (GILLESPIE, 1992; CORREA et al., 2013):

- Os eixos da roda e do motor são corpos rígidos e possuem massa constante;
- Não existe folga nem deslizamento no contato entre os eixos através do diferencial;
- As variações das grandezas do sistema são desprezíveis, com o objetivo de manter a linearidade no comportamento do sistema.

A potência do motor e o limite de tração nas rodas em contato com o pavimento são dois limitantes da máxima performance da aceleração longitudinal de um veículo motorizado, onde a velocidade é determinante de qual limite prevalece. A tração nos pneus é o fator limitante em baixas velocidades, sendo que a potência disponível no motor é o fator limitante para altas velocidades (GILLESPIE, 1992; CORREA et al., 2013).

Com relação às forças que se opõem ao movimento, pode-se considerar as que seguem nas subseções seguintes (GILLESPIE, 1992; EHSANI; RAHMAN; TOLLYAT, 1997; TANAKA, 2013):

### 2.6.1 Forças de Resistência ao Movimento do Veículo

A velocidade, acelerações e forças de resistência são determinantes para especificar a energia necessária para o movimento do veículo. As forças resistentes que devem ser vencidas podem ser divididas em quatro subgrupos (GILLESPIE, 1992; CORREA et al., 2013):

- Resistência ao rolamento;
- Resistência aerodinâmica;
- Forças devido a inclinação do pavimento;
- Resistência das forças de inércia.

#### 2.6.1.1 Resistência ao rolamento

Também conhecido como rolamento de fricção ou arraste de rolamento, a resistência acontece quando um objeto redondo como uma bola ou cilíndrico como um pneu rola em uma superfície plana, com velocidade constante e em linha reta. Uma das causas principais é a deformação do objeto, da superfície ou ambos. Outros fatores podem contribuir para a resistência, como o raio da roda, a velocidade, adesão superficial, relação de micro deslizamento entre as áreas de contato. Todas essas características são dependentes do material da roda ou pneu e o tipo de pavimento (TANAKA, 2013).

A resistência ao rolamento é proporcional ao peso do veículo os principais fatores que afetam são o tipo e a pressão dos pneus, e o tipo de pavimento. Para calcular a resistência ao rolamento pode-se utilizar a Equação 21 (GILLESPIE, 1992; EHSANI; RAHMAN; TOLIYAT, 1997);

$$F_r = f_r M g \cos(\alpha) \quad (21)$$

Onde:

M = peso do veículo em (kg);

$f_r$  = coeficiente de resistência ao rolamento;

g = aceleração da gravidade;

$\alpha$  = ângulo de inclinação da pista.

O coeficiente de resistência ao rolamento ( $f_r$ ) é dependente de diversos fatores como o tipo do pavimento, pressão interna dos pneus, temperatura, carga radial dos pneus, para veículos de passeio em pista de concreto, é possível calcular utilizando a Equação 22 (FERREIRA et al., 2007).

$$f_r = 0.01 * (1 + 0.01 * v(t)) \quad (22)$$

Onde:  $v(t)$  é a velocidade instantânea do veículo em (m/s).

#### 2.6.1.2 Resistência aerodinâmica

Essa força resistente ao movimento é devido à resistência do ar que age em sentido contrário. É dependente da velocidade do veículo, da velocidade do vento, e da área frontal do veículo (GILLESPIE, 1992; EHSANI; RAHMAN; TOLIYAT, 1997).

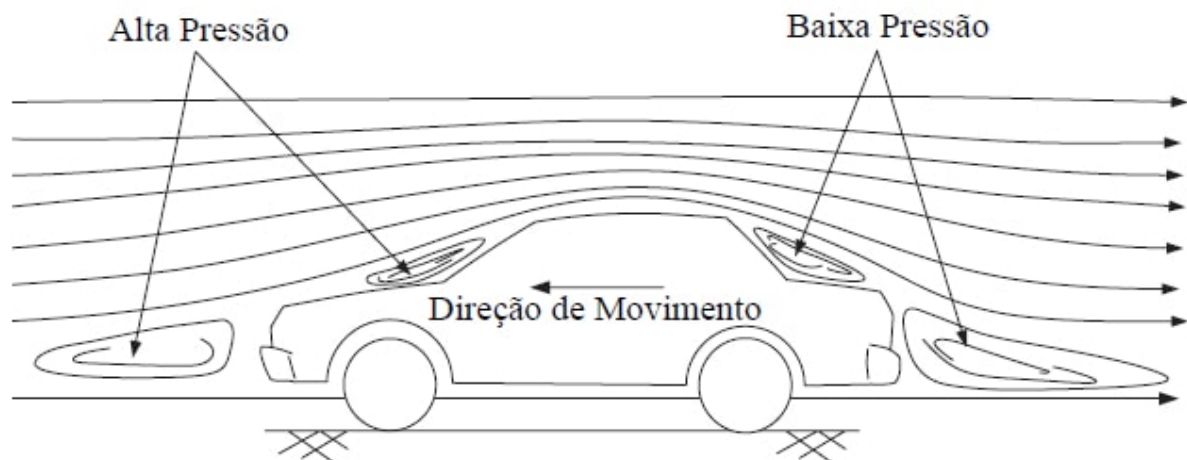
A resistência aerodinâmica tem relação direta com a forma do veículo e a fricção superficial.

- Arrasto de forma: ocorre quando o ar é empurrado pelo movimento do veículo.

Porém o ar não sai imediatamente do caminho, assim a pressão aumenta, o que resulta em alta pressão do ar. Além do mais, não é possível para o ar preencher imediatamente o espaço deixado pelo veículo no movimento para frente, criando uma zona de baixa pressão. Portanto, o movimento do veículo cria uma alta pressão na frente, o que empurra o veículo para trás, e uma baixa pressão na traseira, o que faz puxar o veículo para trás. Essa situação é mostrada na Figura 23. A denominação arrasto de forma deve-se ao fato deste arrasto ser totalmente definido pela forma do veículo (GILLESPIE, 1992).

- Fricção superficial: ocorre quando o ar que está próximo do veículo se desloca quase com a mesma velocidade do veículo, enquanto que o ar mais afastado permanece quase parado. Assim, no meio, as moléculas de ar movem-se com uma abundante gama de velocidades. A diferença de velocidade entre duas moléculas produz a fricção superficial (GILLESPIE, 1992).

**Figura 23 – Arrasto de forma na resistência aerodinâmica.**



Fonte: Ehsani, Gao e Emadi (2009).

Logo, o arrasto aerodinâmico é função da velocidade do veículo  $V$ , da área frontal  $A_f$ , da forma do veículo, e da densidade do ar  $\rho_a$ . Conforme Equação 23

$$F_w = \frac{1}{2} \rho_a A_f C_D (V - V_w)^2 \quad (23)$$

Onde:  $\rho_a$  = densidade do ar;

$A_f$  = área frontal do veículo em ( $m^2$ );

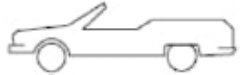
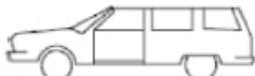





$C_D$  = coeficiente de arrasto aerodinâmico;

$V$  = velocidade do veículo em ( $\frac{m}{s}$ );

$V_w$  = velocidade do vento em ( $\frac{m}{s}$ ).

A temperatura, altitude e umidade influenciam na densidade do ar. Porém, pode-se utilizar o valor de  $1,25 \text{ kgm}^3$ , pois é um valor razoável na maioria dos casos. Na Figura 24, são apresentados alguns valores do coeficiente de arrasto ( $C_D$ ) para diferentes formas de veículos.

**Figura 24 – Coeficientes de arrasto em função da forma do veículo.**

Tipo de Veículo	Coeficiente de Resistência Aerodinâmica
 Conversível aberto	0,5...0,7
 Van	0,5...0,7
 Sedan	0,4...0,55
 Formato de cunha	0,3...0,4
 Formato de cunha com carenagem envolvente	0,2...0,25
 Hatchback	0,23
 Design simplificado otimizado	0,15...0,20
Caminhões	0,8...1,5
Ônibus	0,6...0,7
Ônibus simplificado	0,3...0,4
Motocicletas	0,6...0,7

Fonte: Ehsani, Gao e Emadi (2009).

### 2.6.1.3 Resistência ao aclave

Quando um veículo está em deslocamento em um aclave, uma componente de seu peso irá atuar na direção da descida, conforme ilustrado na Figura 22. Na subida, essa componente do peso se opõem ao movimento, e na descida ajuda o movimento. Contudo, para analisar o desempenho somente é considerado para as subidas. A Equação 24, é conforme apresentada na revisão da bibliografia (GILLESPIE, 1992; EHSANI; GAO; EMADI, 2009).

$$F_g = Mgsen(\alpha) \quad (24)$$

Onde:

M = peso do veículo em (kg);

g = aceleração da gravidade;

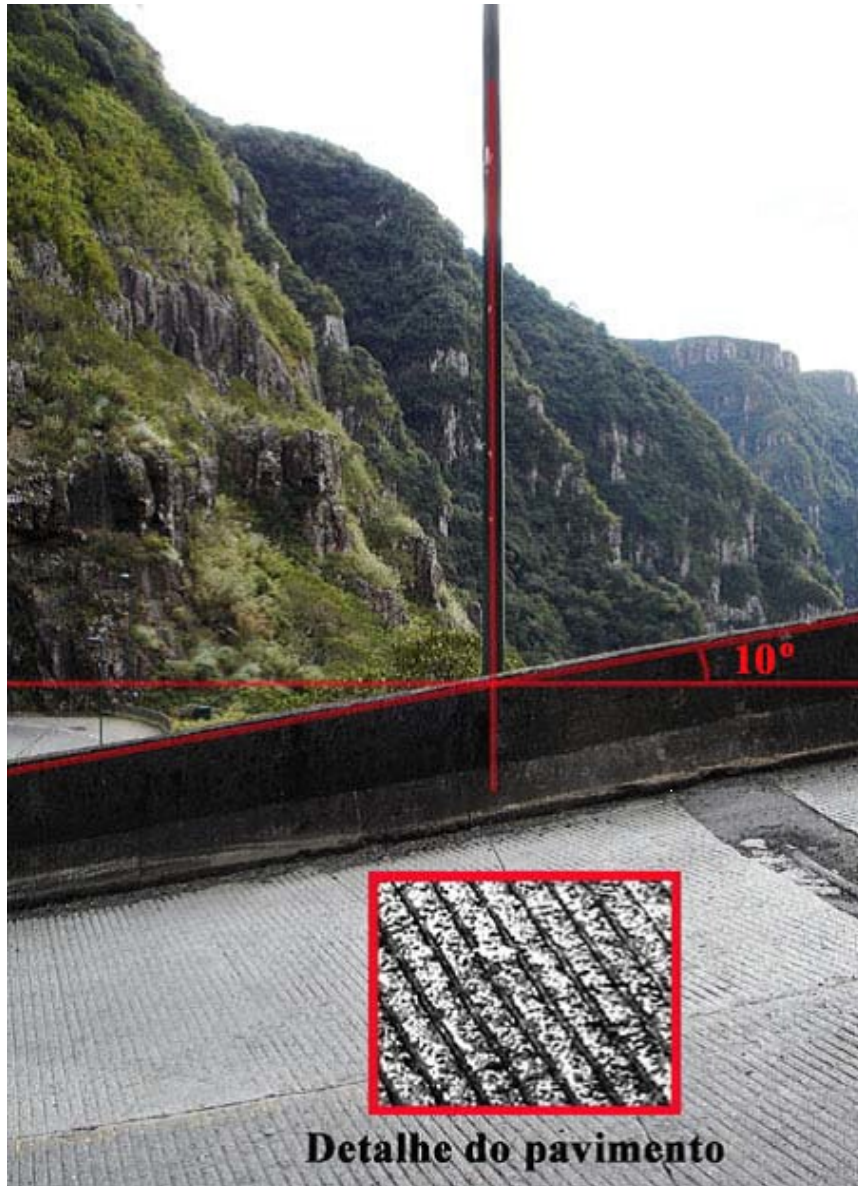
$\alpha$  = ângulo de inclinação da pista.

Com relação à inclinação, de acordo com Sul e Alegre (2007) a inclinação percentual é referida pela tangente, por exemplo para subir 18 m é necessário ocorrer um deslocamento horizontal de 100 m, o que representa uma inclinação de 18%, ou aproximadamente 10°. Ainda, no artigo “*Inclinação das Ruas e Estradas*” Sul e Alegre (2007), apresenta diversos exemplos de inclinação, um bastante conhecido é a Serra do Rio do Rastro em Santa Catarina como apresentado na figura.

### 2.6.1.4 Aceleração

Para um veículo que é um conjunto de inércias em translação e rotação, para calcular a força a ser aplicada para variar a velocidade deve-se considerar, além das massas em translação, as inércias rotativas. Pois, as inércias rotativas durante a aceleração do veículo podem ser responsáveis por uma grande parcela do consumo de força (portanto potência) quando submetidas a acelerações angulares proporcionais a linear, devido às relações de transmissão do diferencial (GILLESPIE, 1992). Para se obter a aceleração necessária pode ser utilizada a Equação 25 (GILLESPIE, 1992; EHSANI; RAHMAN; TOLIYAT, 1997).

Figura 25 – Rampa com inclinação excepcionalmente grande (10° ou 18° Rodovia SC 480 na Serra do Rio do Rastro).



Fonte: Sul e Alegre (2007).

$$a = \left( \frac{F_t - (F_r + F_w + F_g)}{\delta M} \right) \quad (25)$$

Onde:

$F_t$  = força total;

E  $\delta$  é o coeficiente de momento de inércia para equiponderar o aparente aumento na massa do veículo do veículo relacionado ao momento de inércia das massas girantes do sistema de tração.

Pode-se considerar alguns passos para um projeto de um veículo elétrico com tração independente em duas rodas (PEREZ-PINAL et al., 2006);

- Definir a relação entre torque mecânico e o estágio eletrônico de potência incluindo o motor elétrico;
- Definir a potência mecânica necessária;
- Definir a potência elétrica necessária ao estágio eletrônico de potência.

Para definir a potência mecânica pode-se utilizar duas técnicas. Uma considera a potência máxima necessária para o VE realizar um ciclo de condução. A segunda técnica considera a determinação da potência mecânica média necessária, considerando a velocidade inicial, tempo de aceleração e velocidade máxima (EHSANI; RAHMAN; TOLIYAT, 1997).

Para calcular a potência mecânica utilizando o ciclo de condução do veículo é preciso determinar as forças que se opõem ao movimento (EHSANI; RAHMAN; TOLIYAT, 1997).

Para calcular a potência mecânica utilizando e a potência mecânica média são necessárias quatro etapas (EHSANI; RAHMAN; TOLIYAT, 1997);

- Estimar a potência nominal do acionamento do motor;
- Determinar o tempo de aceleração;
- Determinar a distância de aceleração;
- Projetar a relação de transmissão de maneira que o veículo atinja a máxima velocidade na máxima rotação do motor.

A potência de tração total necessária para acelerar o veículo de zero a velocidade  $V_f$  em  $t_a$  segundos pode ser obtida conforme Equação 40 (FERREIRA et al., 2007).

$$P_t = \left[ M \frac{dV}{dt} + Mg \sin(\alpha) + f_r M g \cos(\alpha) + \frac{1}{2} \rho_a A_f C_D (V - V_w)^2 \right] V \quad (26)$$



Se for considerar o fator de massa  $\delta$ , fica como na Equação 27 (FERREIRA et al., 2007; TANAKA, 2013).

$$P_t = \left[ \delta M \frac{dV}{dt} + Mg \sin(\alpha) + f_r Mg \cos(\alpha) + \frac{1}{2} \rho_a A_f C_D (V - V_w)^2 \right] V \quad (27)$$

Para se obter o consumo de energia em um período de tempo, como durante um ciclo de condução, basta integrar o consumo total de energia no tempo. A potência total consumida, em um instante de tempo determinado, pode ser obtida pela Equação 28 (FERREIRA et al., 2007; TANAKA, 2013).

$$P_{tot} = \frac{V}{\eta_t \eta_m \eta_{cc}} \left[ \delta M \frac{dV}{dt} + Mg \sin(\alpha) + f_r Mg \cos(\alpha) + \frac{1}{2} \rho_a A_f C_D (V - V_w)^2 \right] \quad (28)$$

Sendo possível calcular a potência regenerada durante a frenagem regenerativa, conforme a Equação 29 (FERREIRA et al., 2007; TANAKA, 2013).

$$P_{reg} = \frac{\xi V}{\eta_t \eta_m \eta_{cc}} \left[ \delta M \frac{dV}{dt} + Mg \sin(\alpha) + f_r Mg \cos(\alpha) + \frac{1}{2} \rho_a A_f C_D (V - V_w)^2 \right] \quad (29)$$

Onde:  $\xi$  é o fator de frenagem regenerativa, sendo representada em porcentagem da energia total da frenagem que pode ser regenerada, ( $0 < \xi < 1$ ).

Portanto, o balanço do consumo de energia pode ser obtido conforme apresentado na Gráfico 9 (TANAKA, 2013).

$$E_{out} = \int_{tracao} P_{tot} dt + \int_{frenagem} P_{reg} dt \quad (30)$$

É importante observar que nesta equação a potência de frenagem é negativa.

### 3 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE TRAÇÃO

O conjunto composto por motor(es) elétrico(s) de tração, controlador/conversor de potência, e armazenadores de energia é definido como sistema de tração elétrica (TANAKA, 2013).

A energia elétrica é convertida em energia mecânica pelo ME com o objetivo de tracionar o veículo, no momento da frenagem o ME funciona como gerador, transformando energia mecânica em energia elétrica, com a finalidade de recarregar o dispositivo armazenador de energia estando o sistema preparado para esta função, ou simplesmente para frear o veículo.

Para ajustar apropriadamente a alimentação do ME com tensão e corrente é utilizado o controlador/conversor de potência, com o qual são controlados a velocidade e torque solicitados, bem como através do controlador/conversor de potência pode-se realizar o processo de regeneração de energia para o conjunto armazenador de energia, através da frenagem regenerativa.

Para armazenar energia e disponibilizar ao motor por meio do conversor de potência são utilizados dispositivos armazenadores de energia como baterias, supercapacitores e outros.

Para simplificar a abordagem considerou-se apenas a dinâmica longitudinal para efeitos de dimensionamento do sistema de propulsão.

#### 3.1 DEFINIÇÃO DO SISTEMA

Optou-se por realizar a configuração do veículo utilizando os motores *in-wheel* conforme apresentado na Figura 26 onde o motor está diretamente acoplado na roda.

Pode ser observado na Figura 27 (meramente ilustrativa) um sistema onde o motor está acoplado diretamente na roda.

A proposta de uso para o veículo a ser estudado é passeio e transporte pessoal em área urbana. O objetivo é dimensionar o sistema de tração que atenda as especificações e parâmetros de projeto, para tanto foi selecionado o veículo GM Celta para buscar na ficha técnica do veículo as especificações técnicas necessárias ao projeto.

**Figura 26 – Configuração *In-Wheel*.**



**Fonte: Adaptado de Rodrigues (2013).**

**Figura 27 – Exemplo de Motor na Roda.**



**Fonte: Google (2017).**

Com relação a uma das especificações, talvez a mais importante, a massa do veículo, foi considerado que o peso das peças que serão retiradas como MCI, caixa de marchas, sistema de escapamento, tanque de combustível, entre outros será substituído pelo sistema do VE como ME, baterias, banco de capacitores, sistema eletrônico de potência e outros.

### 3.2 ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA

As especificações foram definidas conforme apresentado na Tabela 5, onde estão definidos a massa do veículo, a autonomia desejada, capacidade de carga e a velocidade máxima para o percurso, sendo esse parâmetros definidos pelo projeto, onde a velocidade foi obtida do ciclo de condução urbano brasileiro NBR6601.

**Tabela 5 – Especificações Técnicas**

Parâmetro	Valor	Unidade
Tara	890	[kg]
Autonomia	~2	[h]
- Percurso	60	[km]
- Tempo	Indeterminado	[h]
Capacidade de carga	460	[kg]
Velocidade máxima		
- 100% de carga em acive de 20%	91,2	[km/h]

### 3.3 PARÂMETROS DE PROJETO

As definições de projeto são apresentadas na Tabela 6, onde são especificados os parâmetros do veículo como área frontal, coeficiente aerodinâmico, momentos de inércia, raio do pneu, dados sobre a transmissão, rendimentos da transmissão, do motor e do sistema de potência, aceleração da gravidade e densidade do ar.

Os parâmetros das definições de projeto são muito importantes pois devido a estas especificações é possível determinar as potências necessárias aos dispositivos constituintes do sistema de tração, bem como após definir as potências e conhecendo-se as especificações de massa e volume destes dispositivos pode-se determinar a massa total do sistema de propulsão. Sendo que, os valores de massa, área frontal do veículo, momento de inércia da transmissão, relação de transmissão, raio dinâmico dos pneu, capacidade de carga citado na Tabela 5, foram obtidos da ficha técnica do veículo GM Celta 1.0. Já os valores de aceleração da gravidade, densidade do ar, rendimento total da transmissão e rendimento do sistema de potência foram obtidos da dissertação **Metodologia de Dimensionamento do Sistema de Tração para Veí-**

**culos Elétricos** de Tanaka (2013), e o valor de rendimento do motor considerou-se o valor médio de rendimento para motores BLDC.

**Tabela 6 – Definições de Projeto**

Dados de Projeto	Símbolo	Valor	[Unid.]
Massa (Tara)	M	890	[kg]
Coeficiente de Resistência Rolamento	$f_r$	Eq. 3.2	Adimens.
Coeficiente Aerodinâmico	$C_D$	0,25	Adimens.
Área Frontal do Veículo	$A_f$	2,53	m <sup>2</sup>
Momento de Inércia da Transmissão	I	9,22 E-04	Kg-m <sup>2</sup>
Momento de Inércia das Rodas/Pneus	$I_w$	1,33	Kg-m <sup>2</sup>
Relação da transmissão	$i_g$	4,87	Adimens.
Raio Dinâmico do Pneu	$r_d$	0,3302	[m]
Aceleração da Gravidade	g	9,81	m/s <sup>2</sup>
Densidade do ar	$\rho_a$	1,25	Kg/m <sup>3</sup>
Rendimento da Total da Transmissão	$\eta_t$	0,93	Adimens.
Rendimento do Motor	$\eta_m$	0,95	Adimens.
Rendimento do Sist. de Potência	$\eta_{cC}$	0,95	Adimens.

Utilizando as informações apresentadas no Capítulo 2 primeiramente define-se uma equação para representar as forças atuantes em um veículo para poder definir a força de tração e torque necessários para propulsionar o veículo, sendo que esta força e torque serão transferidos ao solo por meio das rodas/pneus.

### 3.3.1 Força de aceleração

Na subseção 2.6.1.4 contido no Capítulo 2 é descrito a aceleração, no entanto esta força possui componentes distintas, conforme apresentado na subseção 3.3.1.1 e na subseção 3.3.1.2.

### 3.3.1.1 Força de aceleração linear

De acordo com a segunda lei de Newton para ter seu estado de movimento (repouso ou movimento retilíneo uniforme) modificado precisa ser aplicada uma força que será somada às forças de resistência ao movimento ( $F_r, F_w$  e  $F_g$ ). Assim, será fornecido uma aceleração linear ao veículo, conforme Equação 31.

$$F_{la} = M \frac{dV(t)}{dt} \quad (31)$$

Logo, a força de tração necessária é obtida pela Equação 32.

$$F_t = F_{la} + F_r + F_w + F_g \quad (32)$$

Contudo, é importante considerar a força necessária para acelerar as partes rotativas. Sendo assim, deve-se considerar a aceleração angular, bem como a aceleração linear. O problema nesse caso é a maior velocidade angular do motor elétrico (GILLESPIE, 1992).

### 3.3.1.2 Força de aceleração angular

De maneira cautelosa considera-se que todas as massas girantes do sistema de transmissão estão no rotor do motor. E também, a força de aceleração angular está referida à roda/pneu do veículo. Sendo assim, pode-se encontrar a força de aceleração angular conforme Equação 33 (GILLESPIE, 1992).

$$F_{wa} = \frac{i_g^2 I + I_w}{r_d^2} \frac{dV(t)}{dt} \quad (33)$$

## 3.3.2 Força de tração

Para se obter a força de tração necessária para propulsionar um veículo, é apresentada a Equação 34 (TANAKA, 2013).

$$F_t = F_r + F_w + F_g + F_{la} + F_{wa} \quad (34)$$

O que resulta a Equação 35.

$$F_t = f_r M g \cos(\alpha) + \frac{1}{2} \rho_a A_f C_D (V - V_w)^2 + M g \sin(\alpha) + \frac{M dV(t)}{dt} + \frac{i_g^2 I + I_w}{r_d^2} \frac{dV(t)}{dt} \quad (35)$$

### 3.3.3 Aceleração

A Equação 36 apresenta a equação dinâmica do movimento linear (TANAKA, 2013):

$$F_{la} = F_t - (F_r + F_w + F_g + F_{wa}) \quad (36)$$

Onde, é obtida a Equação 42 (TANAKA, 2013):

$$\frac{dV(t)}{dt} = \frac{F_t - \left[ f_r M g \cos(\alpha) + \frac{1}{2} \rho_a A_f C_D (V - V_w)^2 + M g \sin(\alpha) \right]}{\left[ M + \frac{i_g^2 I + I_w}{r_d^2} \right]} \quad (37)$$

### 3.3.4 Torque

Para obter o torque de tração nas rodas deve-se realizar o produto da força de tração com o raio efetivo da roda/pneu, já considerando as deformações, conforme apresentado na Equação 38 (FERREIRA et al., 2007).

$$T_t = \left[ r_d f_r M g \cos(\alpha) + r_d \frac{1}{2} \rho_a A_f C_D (V - V_w)^2 + r_d M g \sin(\alpha) + r_d \frac{M dV(t)}{dt} \right] + \left[ \frac{i_g^2 I + I_w dV(t)}{r_d} \right] \quad (38)$$

O torque no motor depende do rendimento  $\eta_t$  e da relação de transmissão do motor  $i_g$ , conforme apresentado na Equação 44 (FERREIRA et al., 2007).

$$T_m = \frac{1}{\eta_t i_g} \left[ r_d f_r M g \cos(\alpha) + r_d \frac{1}{2} \rho_a A_f C_D (V - V_w)^2 + r_d M g \sin(\alpha) \right] + \left[ r_d \frac{M dV(t)}{dt} + \frac{i_g^2 I + I_w dV(t)}{r_d} \right] \quad (39)$$

### 3.4 CICLO DE CONDUÇÃO

Um ciclo de condução caracteriza o modo como o veículo é guiado em um percurso, representando também as características da estrada. Quem define o percurso, o que acaba gerando uma série de diferentes tipos de situações que envolvem pavimentação, topologia e carga é o motorista, sendo responsável pelo modo que o veículo é conduzido. Foram criados os ciclos padrão de condução pelo fato de cada motorista possuir comportamento diferente em um mesmo trajeto (CORREA et al., 2013).

Para definir os ciclos de condução padrão, são utilizados veículos devidamente instrumentados e gravado o percurso em situações reais de uso. Após coletar os dados, estes são avaliados para obter os níveis de solicitação, desta maneira são criados os ciclos característicos em função da aceleração e velocidade do veículo (CORREA et al., 2013).

Estes ciclos padrão são projetados de forma a reproduzir as condições urbana e extra urbana de condução de veículo, reproduzindo medidas de velocidades em estradas reais (CORREA et al., 2013).



Algumas curvas de ciclo de condução foram elaboradas para descrever os perfis de velocidade em certas aplicações, sendo aplicadas para testar o desempenho do veículo nessas situações. Originalmente esses ciclos de condução foram elaborados para avaliar os parâmetros de consumo de combustível e emissão de poluentes dos veículos com MCI. Para os VE's esses ciclos permitem avaliar o desempenho com relação à demanda de potência e ao consumo de energia (TANAKA, 2013).

Um ciclo de condução é uma padronização referida por meio de uma tabela velocidade-tempo. O percurso a ser representado é fracionado em intervalos de tempo, em geral segundos e a aceleração é considerada constante em um período de tempo. Dessa forma, a velocidade ao longo do intervalo de tempo é uma função linear do tempo, assim, como a velocidade e a aceleração são conhecidas em determinado intervalo de tempo, é possível determinar a potência requerida em função do tempo. Integrando a potência requerida no tempo de duração do ciclo obtêm-se a energia necessária para o ciclo em questão (TANAKA, 2013).

### 3.5 METODOLOGIA DE DIMENSIONAMENTO

Um fator determinante para o projeto de veículos elétricos é o emprego efetivo do veículo, de acordo com a aplicação são definidos os parâmetros da especificação técnica para definição dos parâmetros de projeto, conforme elencados a seguir.

Os parâmetros da especificação técnica são: velocidade nominal de cruzeiro, aceleração para atingir a velocidade nominal de cruzeiro, velocidade máxima, aclave máximo e autonomia.

Já os parâmetros de projeto são: potência do motor e do controlador/conversor, velocidade nominal do motor, velocidade máxima do motor, relação de transmissão, capacidade dos armazenadores de energia.

O projeto de um veículo elétrico busca satisfazer os requisitos das especificações utilizando a mínima potência. No entanto é necessário pesquisar a disponibilidade comercial dos componentes com potência aproximada à definida em projeto, pois nem sempre é possível encontrar equipamentos com a potência especificada. O motor por exemplo, muitas vezes não será encontrado com potência nominal igual à definida, e também as curvas de torque-velocidade podem não ser compatíveis com a relação de transmissão. Deve-se considerar que um conjunto motor-transmissão com

potência superior à especificada poderá apresentar rendimentos melhores na região de operação esperada (TANAKA, 2013).

É importante considerar que a definição dos parâmetros de projeto é um processo incerto, pois há duas variáveis correlatas, a potência do sistema de tração e a massa do veículo, pois se aumentar a potência como consequência a massa total do veículo será acrescida, e se aumentar a massa total do veículo deverá ser redimensionada a potência do veículo.

### 3.5.1 Determinação da potência necessária (nas rodas)

Para se obter o valor necessário da potência para tracionar o VE, atendendo as especificações técnicas de projeto, pode-se utilizar a Equação 40, como discriminado em (FERREIRA et al., 2007).

$$P_t = \left[ f_r M g \cos(\alpha) + \frac{1}{2} \rho_a A_f C_D (V - V_w)^2 + M g \sin(\alpha) + M \frac{dV(t)}{dt} + \left[ + \frac{(i_g^2 I + I_w)}{r_d^2} \frac{dV(t)}{dt} \right] V(t) \right] \quad (40)$$

Onde os parâmetros do projeto mecânico  $A_f$ ,  $C_D$ ,  $I$ ,  $I_w$ ,  $i_g$ ,  $n_t$ ,  $r_d$  tem valores conhecidos, o coeficiente de resistência ao rolamento  $f_r$ , é determinado conforme a velocidade. Os valores de  $\alpha$ ,  $V$  e  $\frac{dV(t)}{dt}$  são fatores da especificação técnica. E a densidade do ar  $\rho_a$ , e a aceleração da gravidade  $g$ , são valores disponíveis na literatura.

A massa  $M$  do veículo é o único parâmetro incógnito, pois como será utilizado um modelo comercial, GM Celta, para realizar o dimensionamento, a ficha técnica do veículo apresenta um valor para o peso onde são considerados todos os componentes mecânicos como MCI, caixa de marchas, sistema de exaustão de gases, diferencial, tanque de combustível, entre outros. Será considerado de maneira aproximada que o conjunto de tração elétrica, ME, diferencial, armazenadores, conversores de potência, possuem massa equivalente aos componentes originais que não serão utilizados, sendo assim será considerada a massa apresentada na ficha técnica do veículo.

Os valores de potência serão calculados para atender as condições definidas na especificação técnica, para um veículo que será aplicado no uso urbano, será utilizado o ciclo NBR6601 conforme apresentado na seção 3.4, para realização dos

cálculos.

É considerável destacar que o valor de potência fornecido pela Equação 40 é a potência de tração necessária nas rodas.

Para tanto, para obter o valor de potência requerida no eixo do motor deve-se considerar o rendimento do sistema de transmissão. Sendo assim, como está sendo utilizada a configuração com motores nas rodas dianteiras, o valor total deverá ser dividido por dois, fornecendo o valor da potência para cada motor. O mesmo ocorre para definir o valor de potência do conversor de potência, alimentação do motor, pois também será necessário considerar o rendimento, nesse caso o rendimento do motor. E para realizar o cálculo da potência necessária das baterias deverá ser considerado o valor de rendimento do conversor de potência.

Para o dimensionamento do sistema de propulsão do veículo serão considerados os rendimentos típicos médios do sistema de transmissão, do motor, e do controlador/conversor de potência.

### 3.5.2 Dimensionamento do motor elétrico

Para dimensionar o ME utilizando o resultado obtido na Equação 40, é necessário considerar o rendimento, sendo assim para obter o valor de potência para motor elétrico, considera-se a potência total ( $P_t$ ) nas rodas, associado ao rendimento do sistema de transmissão obtido na especificação técnica, conforme apresentado na Equação 41.

$$P_m = \frac{P_t}{\eta_t} \quad (41)$$

#### 3.5.2.1 Determinação da rotação nominal e rotação máxima do motor

Para determinar a rotação ( $N_t$ ) nas rodas/pneus em [rpm] partindo da velocidade do veículo ( $V_k$ ) em [km/h], é necessário seguir os seguintes passos, onde através

da Equação 42 será obtido o valor da rotação da roda/pneu em [rpm] (TANAKA, 2013).

$$V = \frac{V_k}{3,6}$$

$$V = \omega r_d$$

$$V = \frac{2\pi N_t r_d}{60} \quad [m/s]$$

$$N_t = \frac{30V}{r_d}$$
(42)

Para determinar a rotação do motor em [rpm], é preciso considerar a relação de transmissão, assim multiplicando o valor obtido para a rotação na roda/pneu ( $N_t$ ) pelo valor da especificação técnica da relação de transmissão total ( $i_g$ ), é determinado o valor da rotação do motor em [rpm] através da Equação 43 (TANAKA, 2013).

$$N_m = \beta_g * N_t$$
(43)

Realizando os cálculos mencionados são obtidos os valores de rotação do motor à velocidade nominal de cruzeiro e à velocidade máxima do veículo, respectivamente.

### 3.5.2.2 Verificação da curva de torque

Considerando que o objetivo é prever o desempenho do veículo, é especialmente importante essa avaliação, pois terá influência na aceleração e consumo de energia, em todo o ciclo de condução, principalmente nas condições mais severas como a máxima velocidade, o máximo aclave com a máxima carga e a aceleração máxima com a máxima carga (TANAKA, 2013).

Os resultados serão fundamentais para avaliar se a relação de transmissão pode ser mantida ou deve ser modificada, bem como utilizar um motor com características que proporcionem o melhor desempenho ao veículo (TANAKA, 2013).

Para obter a curva de demanda de torque do motor pode-se utilizar a Equação 44.

$$\begin{aligned}
T_m = & \frac{1}{\eta_t i_g} \left[ r_d f_r M g \cos(\alpha) + r_d \frac{1}{2} \rho_a A_f C_D (V - V_w)^2 + r_d M g \sin(\alpha) \right] + \\
& + \left[ r_d \frac{M dV(t)}{dt} + \frac{(i_g^2 I + I_w) dV(t)}{r_d} \right]
\end{aligned} \tag{44}$$

Um fator importante a considerar é a aderência solo/pneu e também a máxima força de tração. Equação 45 explicita a força de tração aplicada por um motor nas rodas/pneus (TANAKA, 2013).

$$F_t = \frac{T_m i_g \eta_t}{r_d} \tag{45}$$

### 3.5.3 Dimensionamento do controlador/conversor de potência

O controlador do motor e o conversor de potência são dispositivos distintos, no entanto, com a finalidade de otimização de funcionamento, espaço, volume, entre outros motivos os pesquisadores têm buscado unificar a construção dos mesmos.

O controlador é específico para cada tipo de motor, independentemente da complexidade de sua concepção, a programação e as interfaces amigáveis elaboradas pelos fabricantes tem facilitado seu uso.

O controlador tem a função de gerenciar o perfil de torque-velocidade pretendido por meio do controle de tensão e corrente fornecido ao mesmo. Além disso, pode realizar outras funções como proteção do motor e própria, testar conexões, monitorar parâmetros, entre outras funções.

É possível calcular a potência necessária para o funcionamento do controlador/conversor através das Equação 46 e Equação 47.

$$P_{cc} = \frac{P_m}{\eta_m} \tag{46}$$

E também,

$$P_{cc} = \frac{P_t}{\eta_m \eta_t} \quad (47)$$

### 3.5.4 Dimensionamento da capacidade das baterias

Fatores como aplicação do veículo e autonomia desejável são determinantes para o projeto da capacidade de energia e capacidade de potência das baterias.

Assim, utilizando o ciclo de condução obtém-se a curva de potência, é realizado o produto pela força de tração e pela velocidade instantânea, faz-se a integração no tempo, integra-se no tempo, o resultado obtido é a energia consumida para realizar o percurso, como descrito na Gráfico 9 visto na revisão bibliográfica (TANAKA, 2013).

$$E_{out} = \int_{tracao} P_{tot} dt + \int_{frenagem} P_{reg} dt \quad (48)$$

A potência instantânea total consumida pode ser obtida pela Equação 49 (FERREIRA et al., 2007; TANAKA, 2013).

$$P_{tot} = \frac{1}{\eta_m \eta_t \eta_{cc}} \left[ Mg(f_r \cos(\alpha) + \sin(\alpha)) + \frac{1}{2} \rho_a A_f C_D (V - V_w)^2 \right] + \left[ \left( M + \frac{(i_g^2 I + I_w)}{r_d^2} \frac{dV(t)}{dt} \right) \right] \quad (49)$$

Assim como, a potência instantânea total regenerada pode ser calculada através da Equação 50, conforme descrito na revisão bibliográfica (FERREIRA et al., 2007; TANAKA, 2013).

$$P_{reg} = \frac{\xi}{\eta_m \eta_t \eta_{cc}} \left[ Mg(f_r \cos(\alpha) + \sin(\alpha)) + \frac{1}{2} \rho_a A_f C_D (V - V_w)^2 \right] + \left[ \left( M + \frac{(i_g^2 I + I_w)}{r_d^2} \frac{dV(t)}{dt} \right) \right] \quad (50)$$

Conhecendo-se a autonomia desejável para o veículo, é possível definir a quantidade de energia necessária para as baterias. No entanto, deve ser observado que para algumas baterias a capacidade nominal é diferente da capacidade de fornecimento de energia útil.

Em caso de utilização de outros dispositivos armazenadores de energia, como os supercapacitores por exemplo, a capacidade de potência do banco de baterias deverá ser igual ou superior à potência total consumida menos a capacidade de potência dos supercapacitores. No caso de utilizar somente baterias como armazenadores de energia, a capacidade de potência deverá ser igual ou superior à potência total consumida (TANAKA, 2013).

### 3.5.5 Dimensionamento do banco de supercapacitores

A utilização de um banco de supercapacitores auxilia no desempenho e rendimento de VE's submetidos a frequentes acelerações e desacelerações, também contribui para prolongar a vida útil das baterias. Também auxilia na recuperação da energia, na hipótese de utilizar frenagem regenerativa, conforme descrito no Capítulo 2 na subseção 2.3.2.

O custo dos supercapacitores ainda é elevado, porém dependendo da aplicação e do uso do VE pode ser um ótimo dispositivo armazenador de energia para auxiliar na otimização do desempenho e rendimento do sistema de tração, pois os supercapacitores possuem a capacidade de fornecer grande quantidade de energia em curto intervalo de tempo, bem como recuperar grande quantidade de energia em curto intervalo de tempo.

O supercapacitor possui alta densidade de potência, com isso este elemento armazenador de energia tem capacidade de fornecer altos valores de corrente, assim, o dimensionamento da capacitância é quantidade de energia útil que o dispositivo deve ter a capacidade de transferir conforme descrito no Capítulo 2 na subseção 2.3.2.

Os supercapacitores devem ser dimensionados de maneira a fornecer o máximo de energia, para assegurar melhor resposta dinâmica do veículo, e não para a condição de máxima regeneração de energia ou potência, pois nessa situação pouco colabora para melhorar o desempenho dinâmico (TANAKA, 2013).

Logo, a capacitância do supercapacitor ( $C_{sc}$ ) é definida com relação à energia

útil ( $E_{sc}$ ) e das tensões de operação mínima ( $U_{sc\_min}$ ) e máxima ( $U_{sc\_max}$ ). Considerando que a tensão de operação do supercapacitor relaciona-se à condição de energia média entre as tensões máxima e mínima, para que tenha condições de absorver ou fornecer energia, assim, a capacitância pode ser obtida através da Equação 60 apresentada no Capítulo 2 na subseção 2.3.2.

$$C_{sc} = 2 \frac{2E_{sc}}{U_{sc\_max}^2 - U_{sc\_min}^2} \quad (51)$$

Pode-se adotar como método para dimensionar a capacidade de potência do banco de baterias e do banco de supercapacitores, definindo a potência fornecida pelas baterias como sendo a potência média consumida pelo veículo em um ciclo de percurso e os supercapacitores fornecerem a diferença entre a potência total máxima consumida e a potência média consumida, conforme Equação 52 e Equação 53 (TANAKA, 2013).

$$P_{bat} = \frac{1}{t} \int_0^t P_{tot} dt \quad (52)$$

E

$$P_{sc} = P_{tot} - P_{bat} \quad (53)$$

Para realizar o dimensionamento da capacidade de energia dos supercapacitores, é considerado o pulso de potência que resultar em maior energia, o qual será fornecido pelos supercapacitores, integrando esse pulso de potência no intervalo de tempo de duração, é obtida a quantidade de energia, conforme Equação 54 (TANAKA, 2013).

$$E_{sc} = \int_{t_1}^{t_2} P_{sc}(t) dt \quad (54)$$

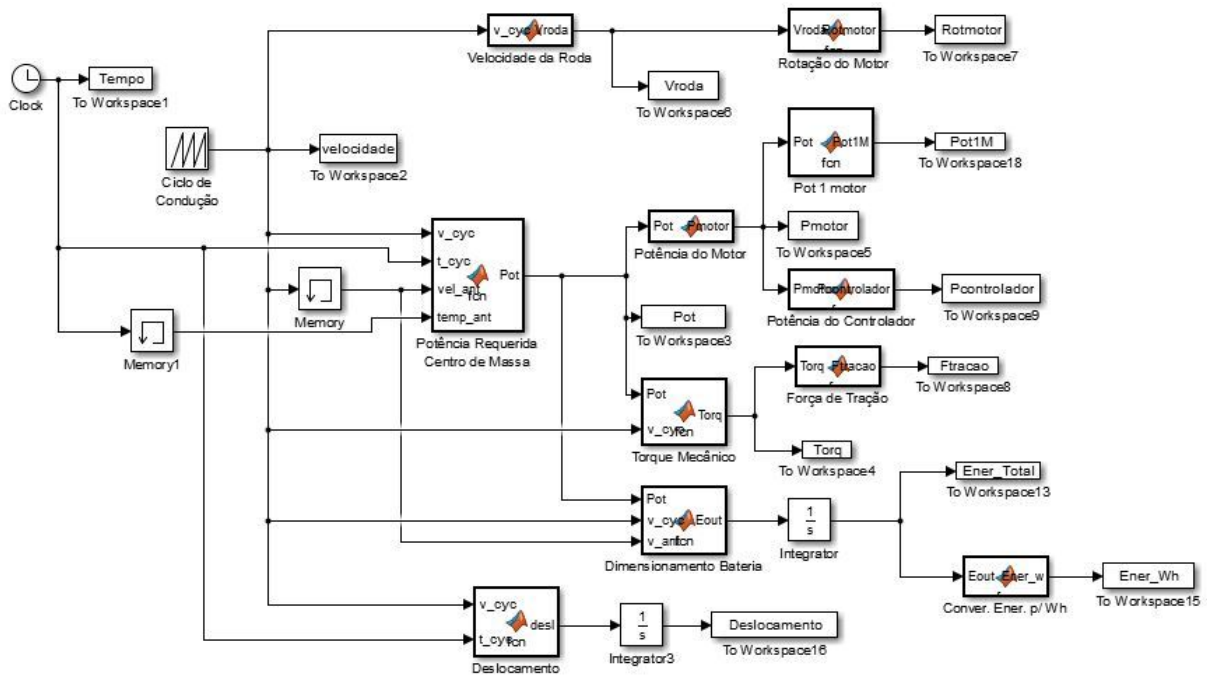
É considerado ser suficiente o tempo para recarregar os supercapacitores no intervalo de tempo entre dois picos de potência sucessivos (TANAKA, 2013).



### 3.5.6 Diagrama de Blocos Utilizado no Simulink/Matlab™

Utilizou-se na ferramenta Simulink/Matlab™ os blocos padrões básicos. utilizou-se blocos de memória para segurar o valor anterior de velocidade e tempo os quais foram utilizados nos cálculos. Blocos integradores para obter os valores totais no ciclo. No Bloco Ciclo de Condução foi inserido o mapa de valores para o ciclo de condução brasileiro NBR 6601. Os blocos *To Workspace* foram utilizados para enviar os valores para a área de trabalho do Matlab™. Os blocos onde realizou-se os cálculos, os mesmos foram realizados através de linhas de códigos. Na Figura 28 pode-se observar a disposição dos blocos na ferramenta Simulink. Utilizou-se o *clock* para sincronizar o tempo da simulação com o tempo do ciclo de condução, onde utilizou-se 1372 pontos (segundos). Foi utilizado passo de integração fixo de 1 ms, o integrador utilizado foi *ode3 (Bogacki-Shampine)*.

**Figura 28 – Diagrama de Blocos no Simulink.**



Fonte: Autoria Própria.

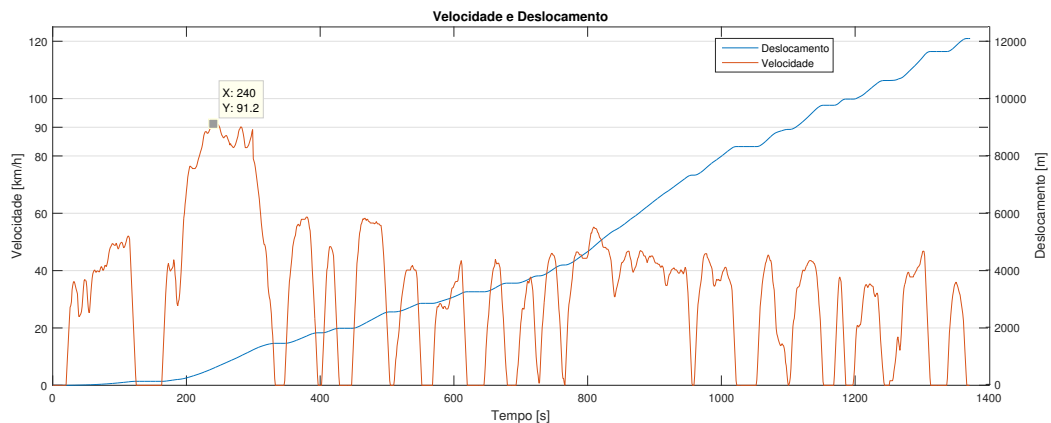
## 4 APLICAÇÕES E RESULTADOS

Neste capítulo será desenvolvida a aplicação da metodologia apresentada no Capítulo 2 e Capítulo 3 e apresentado os resultados obtidos para a opção escolhida de configuração e modelo de veículo escolhido, atendendo as especificações técnicas e dados de projeto.

### 4.1 DESLOCAMENTO

Para realizar a simulação foi utilizado o ciclo NBR6601. Este ciclo representa a condução de um veículo em um ambiente urbano. Onde, no Gráfico 1 podem ser observados a variação da velocidade e a distância total percorrida, onde conforme apresentado na seção 3.4 a velocidade máxima é de 91,2 km/h, sendo que a distância total percorrida em um ciclo de condução perfaz 12 km. Sendo assim conforme definido na seção 3.2 o percurso desejado é de 60 km, então serão necessários 5 ciclos NBR6601 para satisfazer as especificações técnicas. É importante esclarecer que para a realização dos cálculos considerou-se um caso extremo, onde o veículo trafega com carga máxima em aclive de 18% ( 10°).

**Gráfico 1 – Ciclo de Condução NBR 6601 e Deslocamento.**



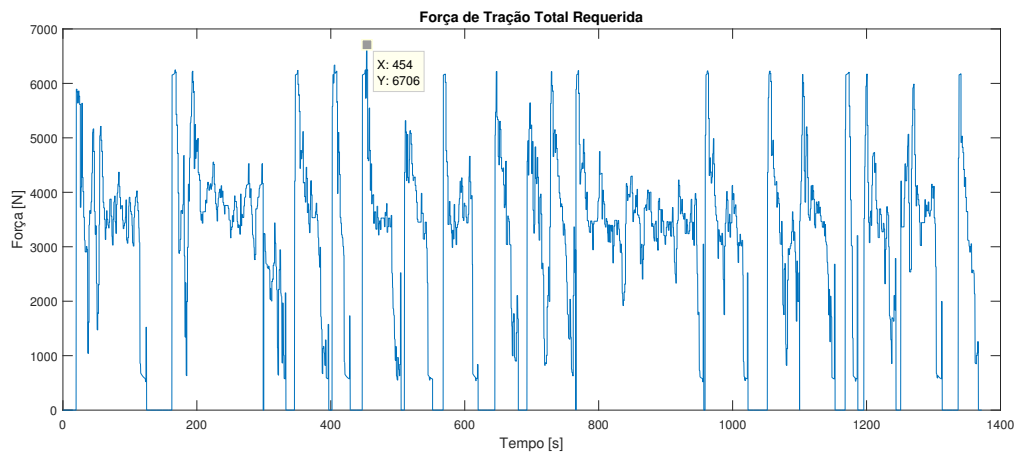
**Fonte: Autoria Própria.**

## 4.2 SIMULAÇÃO DO SISTEMA

Com o auxílio da ferramenta SIMULINK/MatLab<sup>TM</sup> foram inseridos os parâmetros de projeto, bem como as equações apresentadas no Capítulo 2 e Capítulo 3, onde realizou-se simulação numérica do sistema e foram obtidos os resultados que serão apresentados nas subseções seguintes.

Para obter os valores de potência requerida nas rodas é necessário conhecer a força de tração necessária, a qual pode ser observada no Gráfico 2, onde é observado que a máxima força de tração requisitada acontece em 454 s, sendo que é requerido 6.706 N.

**Gráfico 2 – Força de Tração para 1 Ciclo.**

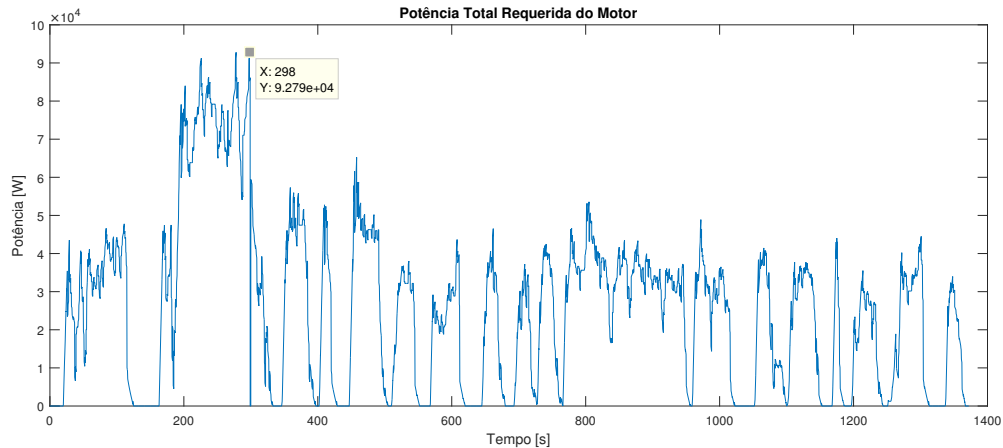


**Fonte: Autoria Própria.**

## 4.3 DETERMINAÇÃO DO MOTOR ELÉTRICO

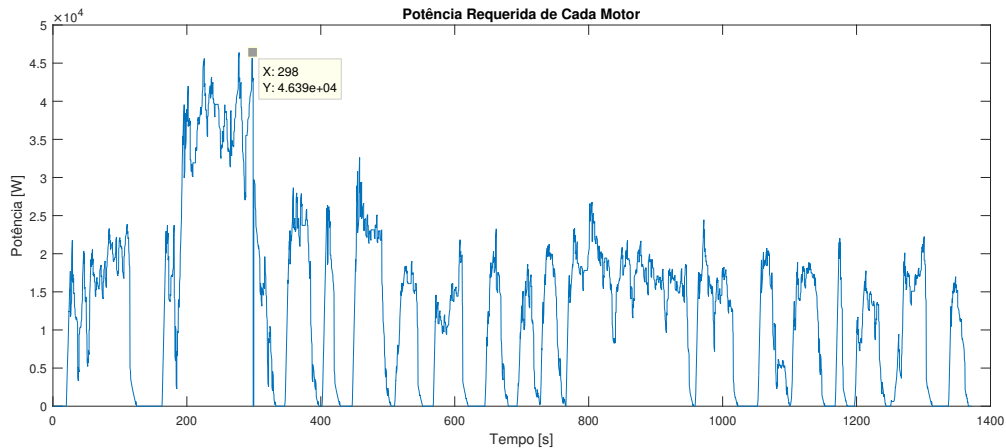
Para definir o ME que satisfaça as condições dos parâmetros técnicos, é preciso determinar a potência máxima requerida, o torque máximo requerido, e a rotação do motor. Assim, com base nos resultados obtidos na simulação do sistema, a potência requerida na roda para percorrer o ciclo gerou o Gráfico 3. Onde pode-se observar que no instante de tempo 298 s, a potência total requerida nas rodas para tração do veículo é de 92.789 W. No entanto, como está sendo dimensionado o sistema de tração considerando dois motores, então a potência requerida de cada motor pode ser observada no Gráfico 4, onde a potência total requerida é de 46.395 W. Para a obtenção da potência considerou-se o rendimento do sistema de transmissão.

**Gráfico 3 – Potência Requerida nas Rodas para 1 Ciclo.**



Fonte: Autoria Própria.

**Gráfico 4 – Potência Requerida de Cada Motor para 1 Ciclo.**



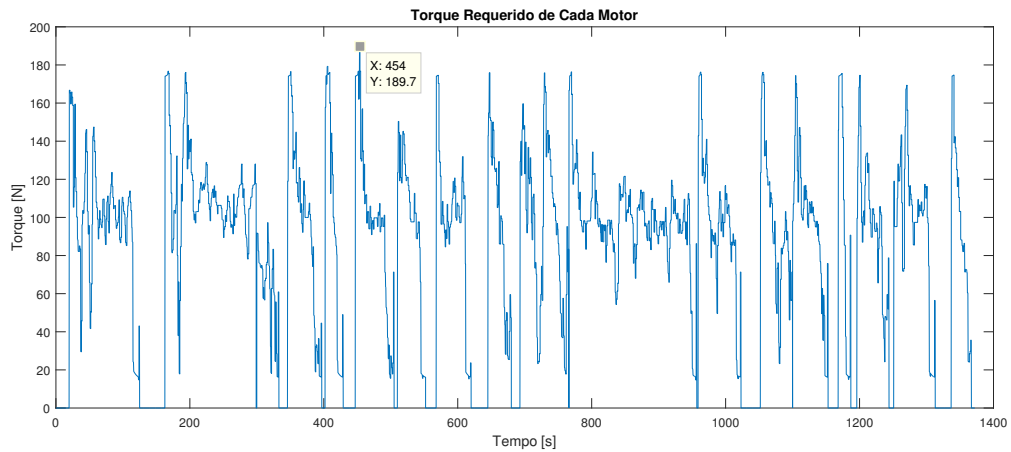
Fonte: Autoria Própria.

Com relação ao torque requerido já considerou-se a utilização dos dois motores, sendo apresentado no Gráfico 5 o torque requerido em um motor. Onde pode ser observado que havendo a solicitação de aceleração é requerido maior torque do motor, logo quanto maior a variação da velocidade maior será o torque, verifica-se que a maior solicitação de torque ocorre em 454, onde é solicitado 189,7 N. É importante expor que a máxima velocidade ocorre no instante de tempo 298 s.

Com relação à rotação do motor e considerando a relação de transmissão é apresentado no Gráfico 6, onde pode ser observado que a máxima rotação ocorre, como esperado, quando ocorre a máxima velocidade em 240 s.

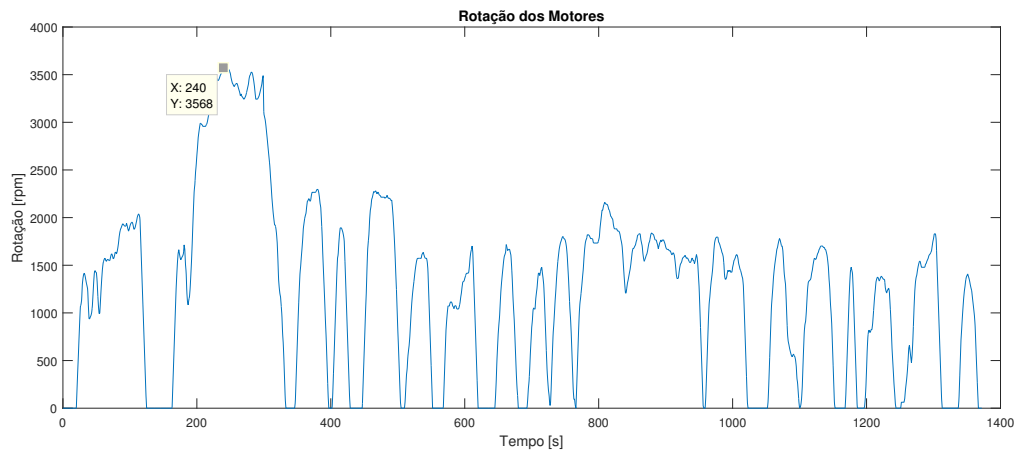
Na Tabela 7, são apresentados os valores máximos requeridos para potência, torque e rotação do motor de acordo com os gráficos, para a potência do motor deve-se considerar o rendimento da transmissão conforme apresentado na subseção 3.5.2,

**Gráfico 5 – Torque Requerido de Cada Motor para o 1 Ciclo.**



Fonte: Autoria Própria.

**Gráfico 6 – Rotação do Motor.**



Fonte: Autoria Própria.

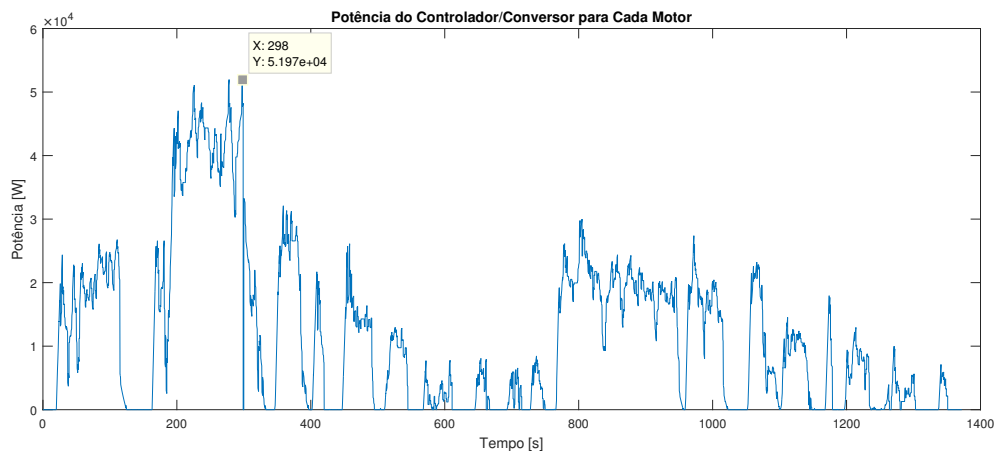
**Tabela 7 – Especificações do Motor**

Requisitos para o Motor	Valor	Unidade
Potência Máxima	46.395	W
Torque Máximo	189,7	N m
Rotação Máxima	3568	rpm
Eficiência Mínima	93	%

#### 4.4 DETERMINAÇÃO DO CONTROLADOR/CONVERSOR DE POTÊNCIA

Com relação à potência máxima requerida para o controlador/conversor de potência, considerando que são necessários dois controladores/conversores um para cada motor, no Gráfico 7 pode ser observado a potência requerida para cada motor, onde a potência máxima requerida ocorre em 298 s, quando é requerida a máxima potência pelo motor, sendo a potência requerida 51.965 W.

**Gráfico 7 – Potência Requerida do Controlador/Conversor.**



**Fonte: Autoria Própria.**

É apresentado na Tabela 8 os valores de potência, tensão e eficiência para cada um dos controladores/conversores de potência.

**Tabela 8 – Especificação do Controlador/Conversor**

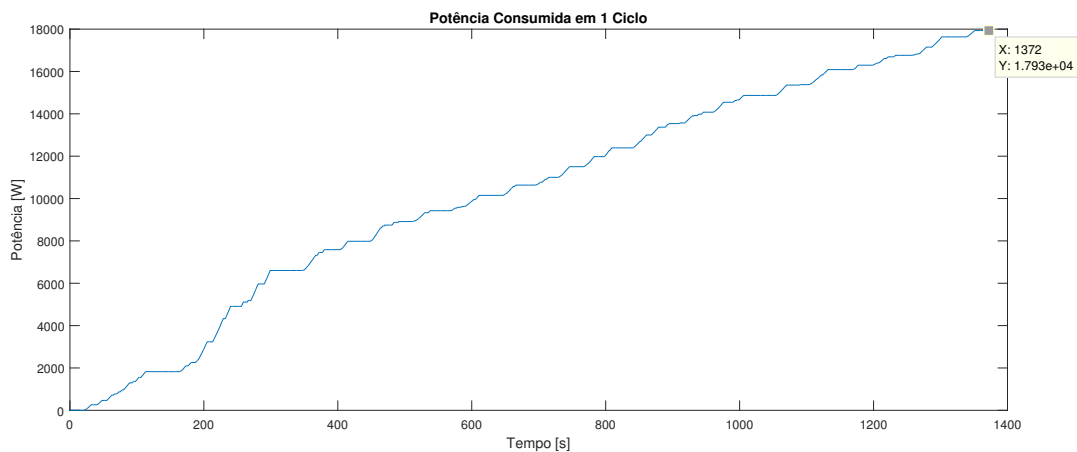
Requisitos para o Control./Conv.	Valor	Unidade
Potência Máxima	51.965	W
Tensão Nominal	400	$V_{CC}$
Eficiência Mínima	93	%

Com relação ao valor de tensão deve-se esclarecer que o mesmo foi escolhido e apresentado após realizar pesquisa com relação a dispositivos implementados comercialmente. A vantagem de utilizar-se dispositivos com valores de tensão elevados, deve-se à redução nos valores de corrente e conseqüentemente a redução da dimensão dos condutores.

#### 4.5 DETERMINAÇÃO DAS BATERIAS

Para determinar a potência necessária ao banco de baterias deve-se considerar o consumo total de potência, ou seja, deve-se considerar o consumo dos motores e dos controladores/ conversores de potência. A potência consumida em 1 ciclo é apresentada no Gráfico 8, onde verifica-se um consumo de 17.930 W. Logo, como o objetivo é atender uma autonomia de 60 km, sendo necessários 5 ciclos de condução para atender o requisito, então para obter a potência total do banco de baterias, o resultado de 1 ciclo deve ser multiplicado por 5 ciclos.

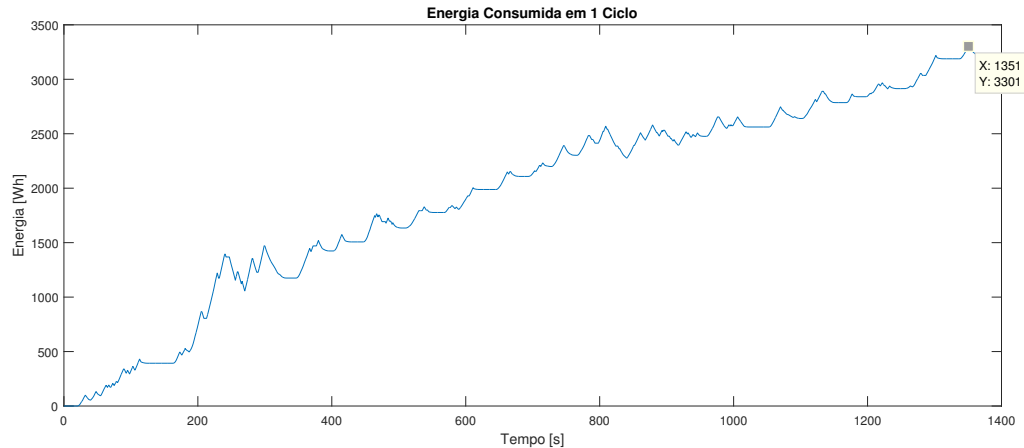
**Gráfico 8 – Consumo de Potência da Bateria em um Ciclo de Condução.**



**Fonte: Autoria Própria.**

Para definir a capacidade de energia do banco de baterias é necessário verificar o consumo de energia durante o ciclo, conforme é apresentado no Gráfico 9. Onde, pode ser observado que o consumo total de energia é de 3.301 Wh, porém esse valor é relativo a um ciclo de condução, sendo assim a mesma condição relatada com relação à potência necessária ao banco de baterias aplica-se para a energia, logo o valor supra apresentado necessita ser multiplicado por 5 ciclos.

Conforme já declarado acima, os requisitos de projeto preveem que se tenha autonomia para 5 ciclos de condução. Assim, a potência total e a energia total para atender os requisitos são apresentados na Tabela 9, onde detalhou-se os valores para 1 ciclo de condução e para 5 ciclos de condução.

**Gráfico 9 – Consumo de Energia em um Ciclo de Condução.**

Fonte: Autoria Própria.

**Tabela 9 – Requisito para o Banco de Baterias**

Requisitos para o Banco de Baterias	Valor para 1 Ciclo	Valor para 5 Ciclos	Unidade
Capacidade de Energia Útil	3.301	16.505	Wh
Capacidade de Potência	17.930	89.650	W
Tensão Nominal	96	96	V

#### 4.6 DETERMINAÇÃO DOS SUPERCAPACITORES

Para definir os valores de capacitância e potência total útil dos supercapacitores, será utilizada como estratégia de dimensionamento fazer as baterias suprir a potência média e o excedente até a potência máxima será suprida pelos supercapacitores. Assim, para determinar a potência média basta dividir a energia total consumida em um ciclo de condução pelo tempo do ciclo. Como na Equação 56.

$$P_{med\_bat} = \frac{En_{total}}{t_{ciclo}} \quad (55)$$

Logo:

$$P_{med\_bat} = \frac{1,188E + 7}{1371} = 8.607 \quad [W] \quad (56)$$

Então, para definir a potência do banco de supercapacitores, pode-se utilizar



a Equação 58.

$$P_{sc} = P_{total} - P_{med\_bat} \quad (57)$$

Assim:

$$P_{sc} = (17.930) - (8.607) = 9.323 \text{ [W]} \quad (58)$$

Para definir a capacitância foi utilizado a Equação 60

$$C_{sc} = 2 * \frac{2E_{sc}}{U_{sc\_max}^2 - U_{sc\_min}^2} \quad (59)$$

Logo:

$$C_{sc} = 2 * \frac{2 * (3.302 - 2.121) * 3600}{410^2 - 390^2} \approx 1.063 \text{ [F]} \quad (60)$$

Na Tabela 10 são apresentados os requisitos para o banco de supercapacitores, são apresentados os valores necessários para a capacitância, a capacidade de energia, a capacidade de potência e as tensões de operação. É considerado que o intervalo de tempo entre dois picos de potência é tempo suficiente para realizar a recarga dos supercapacitores.

**Tabela 10 – Requisitos para o Banco de Supercapacitores**

Requisito para o Banco de Supercapacitores	Valor	Unidade
Capacitância	1.063	F
Capacidade de Energia	3.302	Wh
Capacidade de Potência	9.323	W
Tensão Mínima de Operação	390	V
Tensão Máxima de Operação	410	V

As tensões, mínima e máxima, de operação dos supercapacitores são definições de projeto, deve-se principalmente, em detrimento dos requisitos do conversor de potência a ser utilizado.

## 5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Dimensionar o sistema de tração para veículos automotores é algo bastante difundido, contudo a metodologia para realização dessa tarefa tem evoluído com a utilização de novas ferramentas, em especial softwares, novas técnicas, em consequência da ampla disponibilização de informações.

Devido às questões ambientais como poluição, aumento no valor dos combustíveis fósseis, grande quantidade de pesquisas relacionadas aos armazenadores de energia, o interesse pela utilização de VE's tem aumentado consideravelmente, tornando essa área de estudo e desenvolvimento bastante promissora.

Portanto, o estudo com relação a técnicas de dimensionamento de sistemas de tração para VE's é aplicável na academia e na indústria. Assim, esse trabalho é justificável, pois apresenta um procedimento de fácil compreensão para o dimensionamento do conjunto de tração para veículos elétricos a bateria.

Com o objetivo de obter valores bastante próximos à exatidão, foram utilizadas equações completas. No entanto, na hipótese de não conhecer os valores dos momentos de inércia das partes girantes, pode-se utilizar o fator de massa, conforme apresentado na revisão da literatura.

Foram apresentados apenas os valores teóricos para o dimensionamento dos componentes do sistema de tração, um próximo passo seria realizar a pesquisa de mercado para os componentes e ajustar as características comerciais de maneira a corresponder com os valores teóricos, um exemplo, utilizar baterias em série para elevar a tensão nominal.

Considerando os resultados obtidos conclui-se que, a técnica de dimensionamento do sistema de tração para veículos elétricos puros apresentada neste trabalho, é válida e pode ser utilizada para outros tipos de veículos, bastando determinar as características de projeto e conhecer as especificações técnicas para o protótipo.

Após observar os resultados obtidos neste trabalho considerou-se a possibilidade de verificar a eficiência energética. Porém, para realizar a verificação da eficiência energética são necessários parâmetros de comparação. Para isso é proposto como trabalhos futuros realizar o dimensionamento do sistema de tração para outras configurações de veículos elétricos puros, e utilizando *softwares* de simulação compa-

rar a eficiência entre as arquiteturas.

## REFERÊNCIAS

ÅHMAN, Max. Government policy and the development of electric vehicles in Japan. **Energy Policy**, Elsevier, v. 34, n. 4, p. 433–443, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 33.

ANDERSON, Curtis D; ANDERSON, Judy. **Electric and hybrid cars: A history**. [S.l.]: McFarland, 2010. Citado na página 31.

ARAÚJO, Bruno José de Oliveira. **Desenvolvimento de um modelo de caracterização energética de ciclos de condução**. 2015. Tese (Doutorado), 2015. Citado na página 31.

BARAN, Renato. **A introdução de veículos elétricos no Brasil: Avaliação do impacto no consumo de gasolina e eletricidade**. 2012. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012. Citado 8 vezes nas páginas 16, 17, 18, 29, 34, 35, 36 e 37.

BARASSA, Edgar et al. **Trajectoria tecnológica do veículo elétrico: atores, políticas e esforços tecnológicos no Brasil**. Campinas, SP, 2015. Citado 9 vezes nas páginas 21, 25, 27, 30, 31, 32, 33, 34 e 35.

BELHACHEMI, Farid; RAEL, Stéphane; DAVAT, Bernard. A physical based model of power electric double-layer supercapacitors. In: IEEE. **Industry Applications Conference, 2000. Conference Record of the 2000 IEEE**. [S.l.], 2000. v. 5, p. 3069–3076. Citado 2 vezes nas páginas 55 e 56.

BENTO, João Paulo Moreira. **Análise da viabilidade de adaptação de motores elétricos nos cubos de rodas traseiros de veículos de passeio**. 2015. Citado 8 vezes nas páginas 43, 50, 54, 57, 58, 59, 60 e 61.

BOTTURA, Celso Pascoli; BARRETO, Gilmar. **Veículos elétricos**. [S.l.]: Ed. da UNICAMP, 1989. Citado 2 vezes nas páginas 58 e 60.

BURKE, Andrew; MILLER, Marshall; ZHAO, Hengbing. **Ultracapacitors in hybrid vehicle applications: Testing of new high power devices and prospects for increased energy density**. [S.l.], 2012. Citado 3 vezes nas páginas 54, 56 e 57.

BURKE, Andrew; ZHAO, Hengbing. **Energy Saving and Cost Projections for Advanced Hybrid, Battery Electric, and Fuel Cell Vehicles in 2015-2030**. [S.l.], 2012. Citado na página 43.

BURKE, Andrew F. Batteries and ultracapacitors for electric, hybrid, and fuel cell vehicles. **Proceedings of the IEEE**, IEEE, v. 95, n. 4, p. 806–820, 2007. Citado 3 vezes nas páginas 54, 56 e 57.

CARVALHO, Carlos Henrique Ribeiro de. **Emissões relativas de poluentes do transporte motorizado de passageiros nos grandes centros urbanos brasileiros**. [S.l.], 2011. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 16.

CASTRO, Bernardo Hauch Ribeiro de; FERREIRA, Tiago Toledo. Veículos elétricos: aspectos básicos, perspectivas e oportunidades. **BNDES Setorial**, n. 32, set. 2010, p. 267-310, Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2010. Citado 5 vezes nas páginas 18, 20, 38, 41 e 42.

CHAN, Ching Chue. The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicles. **Proceedings of the IEEE**, IEEE, v. 95, n. 4, p. 704–718, 2007. Citado 4 vezes nas páginas 23, 27, 34 e 60.

CHAN, Ching Chuen. The rise & fall of electric vehicles in 1828–1930: Lessons learned [scanning our past]. **Proceedings of the IEEE**, IEEE, v. 101, n. 1, p. 206–212, 2013. Citado na página 21.

CORREA, Fernanda Cristina et al. Desenvolvimento e análise de estratégias de gerenciamento de potência em veículo elétrico híbrido de configuração paralela. Campinas, SP, 2013. Citado 20 vezes nas páginas 21, 22, 23, 25, 29, 30, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 58, 60, 62, 63, 64, 65 e 79.

COSTA, Washington da. **Metodologia para conversão de veículos equipados com motores a combustão interna para tração elétrica: aplicação de motor síncrono de ímã permanente com fluxo magnético radial a um furgão**. 2009. Tese (Doutorado) — Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro, 2009. Citado na página 50.

COWAN, Robin; HULTÉN, Staffan. Escaping lock-in: the case of the electric vehicle. **Technological forecasting and social change**, Elsevier, v. 53, n. 1, p. 61–79, 1996. Citado 4 vezes nas páginas 21, 30, 31 e 32.

DIAS, Jullierme Emiliano Alves. Modelagem longitudinal e controle de velocidade de um carro autônomo. **Universidade Federal de Minas Gerais**, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 62 e 63.

EHSANI, Mehrdad; GAO, Yimin; EMADI, Ali. **Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: fundamentals, theory, and design**. [S.l.]: CRC press, 2009. Citado 6 vezes nas páginas 22, 56, 57, 67, 68 e 69.

EHSANI, Mehrdad; RAHMAN, Khwaja M; TOLIYAT, Hamid A. Propulsion system design of electric and hybrid vehicles. **IEEE Transactions on industrial electronics**, IEEE, v. 44, n. 1, p. 19–27, 1997. Citado 6 vezes nas páginas 63, 64, 65, 66, 69 e 71.

FERREIRA, AA; POMILIO, JA. Estado da arte sobre a aplicação de supercapacitores em eletrônica de potência. **Eletrônica de Potência**, v. 10, n. 2, p. 25–32, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 55 e 56.

FERREIRA, Andre Augusto et al. Sistema supervisorio de gestão de múltiplas fontes de suprimento para aplicações em veículos elétricos. Campinas, SP, 2007. Citado 7 vezes nas páginas 66, 71, 72, 78, 79, 81 e 85.

FERREIRA, Tarcísio José Pedrobon et al. Sistema de gerenciamento de energia para controle de carga/descarga entre baterias de lítio e ultracapacitores, envolvendo sistema de tração elétrica com frenagem regenerativa. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2014. Citado 4 vezes nas páginas 26, 27, 28 e 29.

FREITAS, Daniel Zacarias. **Análise de Eficiência e Controle de um Sistema Integrado Roda-Motor Elétrico**. 2015. Tese (Doutorado) — PUC-Rio, 2015. Citado 4 vezes nas páginas 23, 24, 25 e 53.

GILLESPIE, Thomas D. **Fundamentals of vehicle dynamics**. [S.l.], 1992. Citado 9 vezes nas páginas 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 69 e 77.

GOOGLE. **Imagens do Google**. 2017. Disponível em: <<https://www.google.com/imghp?hl=pt-BR>>. Citado 3 vezes nas páginas 22, 26 e 74.

HØYER, Karl Georg. The history of alternative fuels in transportation: The case of electric and hybrid cars. **Utilities Policy**, Elsevier, v. 16, n. 2, p. 63–71, 2008. Citado 8 vezes nas páginas 17, 21, 22, 23, 25, 30, 32 e 34.

LARMINIE, James; LOWRY, John. **Electric vehicle technology explained**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2004. Citado 2 vezes nas páginas 43 e 48.

LOPES, Juliana. **Estratégias de gerenciamento de potência em ônibus de transporte urbano elétrico híbrido série**. 2008. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2008. Citado 7 vezes nas páginas 21, 22, 23, 25, 26, 29 e 30.

LOPES, Juliana et al. Metodologias de dimensionamento e de gestão de fontes de energia para veículos elétricos. [sn], 2012. Citado 5 vezes nas páginas 21, 50, 53, 55 e 56.

MACHADO, FELIPE FERRAZ. Brasil, automóvel elétrico no. 2015. Citado 3 vezes nas páginas 44, 50 e 52.

MATTOS, Laura Bedeschi Rego de. **A importância do setor de transportes na emissão de gases do efeito estufa-o caso do município do rio de janeiro**. 2001. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2001. Citado na página 15.

PEREZ-PINAL, Francisco J et al. Step by step design procedure of an independent-wheeled small ev applying evls. In: IEEE. **IEEE Industrial Electronics, IECON 2006-32nd Annual Conference on**. [S.l.], 2006. p. 1176–1181. Citado na página 71.

REVOREDO, Téo Cerqueira. Modelagem e gerenciamento de potência de um veículo elétrico híbrido de célula a combustível. **Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Tese de Mestrado**, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 44 e 46.

RODRIGUES, José António Costa. **Armazenamento de energia e uso de supercondensadores em sistema de mobilidade eléctrica**. 2013. Tese (Doutorado) — Instituto Politécnico de Viseu. Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu, 2013. Citado 6 vezes nas páginas 40, 42, 43, 54, 55 e 74.

SANTOS, Nuno Filipe Parreira Leitão. Medição experimental do coeficiente de resistência ao rolamento e do coeficiente de arrasto aerodinâmico de um veículo automóvel de elevada eficiência energética. In: **Medição Experimental do Coeficiente de Resistência ao Rolamento e do Coeficiente de Arrasto Aerodinâmico de um Veículo Automóvel de Elevada Eficiência Energética**. [S.l.: s.n.], 2012. Citado na página 61.

SUL, Porto do Rio Grande do; ALEGRE, RS. Fernando lang da silveira. 2007. Citado 2 vezes nas páginas 69 e 70.

TANAKA, Carlos Naomi. **Metodologia de dimensionamento do sistema de tração para veículos elétricos**. 2013. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2013. Citado 20 vezes nas páginas 38, 39, 41, 43, 54, 57, 64, 65, 72, 73, 76, 77, 78, 80, 81, 83, 84, 85, 86 e 87.

TIE, Siang Fui; TAN, Chee Wei. A review of energy sources and energy management system in electric vehicles. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 20, p. 82–102, 2013. Citado na página 54.

XUE, XD; CHENG, KWE; CHEUNG, NC. Selection of electric motor drives for electric vehicles. In: IEEE. **Power Engineering Conference, 2008. AUPEC'08. Australasian Universities**. [S.l.], 2008. p. 1–6. Citado 2 vezes nas páginas 59 e 60.

ZERAOULIA, Mounir; BENBOUZID, Mohamed El Hachemi; DIALLO, Demba. Electric motor drive selection issues for hev propulsion systems: A comparative study. **IEEE Transactions on Vehicular technology**, IEEE, v. 55, n. 6, p. 1756–1764, 2006. Citado 3 vezes nas páginas 59, 60 e 61.

ZH, BACEN e. **Evolução do Preço do Barril do Petróleo**. 2017. Acionista.com.br. Disponível em: <[http://www.acionista.com.br/graficos\\_comparativos/petroleo.html](http://www.acionista.com.br/graficos_comparativos/petroleo.html)>. Citado na página 17.