

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS
Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica

**ESTUDO DO FUNCIONAMENTO DE VEÍCULOS
ELÉTRICOS E CONTRIBUIÇÕES AO SEU
APERFEIÇOAMENTO**

Toshizaemom Noce

Belo Horizonte
2009

Toshizaemom Noce

**ESTUDO DO FUNCIONAMENTO DE VEÍCULOS
ELÉTRICOS E CONTRIBUIÇÕES AO SEU
APERFEIÇOAMENTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Orientador: Prof. Dr.
Denílson Laudaes Rodrigues

Belo Horizonte
2009

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Biblioteca da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

N756e	<p>Noce, Toshizaemom</p> <p>Estudo do funcionamento de veículos elétricos e contribuições ao seu aperfeiçoamento / Toshizaemom Noce. Belo Horizonte, 2010. 127 f.: il.</p> <p>Orientador: Denílson Laudares Rodrigues Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.</p> <p>1. Veículos Elétricos. 2. Efeito Estufa. 3. Baterias Solares. 4. Ar – Poluição. 5. Brasil. I. Rodrigues, Denílson Laudares. II. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 621.335</p>
-------	---

Toshizaemom Noce

Estudo do Funcionamento de Veículos Elétricos e Contribuições ao seu Aperfeiçoamento

Trabalho apresentado para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.
Belo Horizonte, 2009.

Prof. Dr. Denilson Laudares Rodrigues – Orientador

Prof^a. Dr^a. Antônia Sônia Alves Cardoso Diniz

Prof. Dr. Fabrício José Pacheco Pujatti

Às futuras gerações.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho não poderia ser concluído sem a ajuda direta e indireta de várias pessoas as quais algumas, em especial, presto minha sincera homenagem:

Agradeço aos meus pais, familiares, amigos, professores e todos aqueles que ao longo desta grande jornada até aqui, contribuíram para a minha formação e aperfeiçoamento.

Agradeço ao Engenheiro Leandro Quadros pela oportunidade de realizar este trabalho.
Agradeço também ao engenheiro Paulo Matos, ao Sr. Leonardo Gaudêncio Cavaliere, aos demais colegas da Fiat Automóveis S.A. e *Centro Ricerche Fiat* que muito contribuíram para esta realização.

“Se um extraterrestre, chegando a Terra, parasse a nave espacial sobre uma cidade moderna, é possível que sua primeira impressão fosse a de que os habitantes do lugar são os carros e os homens, seus alimentos”.

Isaac Asimov

RESUMO

Nesta dissertação foram realizadas diversas pesquisas sobre o histórico do veículo elétrico no Brasil, desde a sua forma de abastecimento, passando por seu sistema de acumulação de energia e sua dinâmica de funcionamento. O objetivo deste trabalho foi estudar os entraves à inserção do veículo elétrico no mercado nacional. Vários estudos comparativos foram realizados entre o veículo elétrico e o veículo convencional, à combustão, com o intuito de se conhecer melhor sobre os seguintes itens: as emissões de gases/poluentes no meio ambiente, o aproveitamento do potencial energético brasileiro para o abastecimento dos veículos elétricos, a frota potencial de veículos elétricos no país e a redução da autodescarga da bateria. Foram ainda sugeridas melhorias para um veículo elétrico atual, com o objetivo de contribuir para o aumento de sua autonomia e de sua eficiência energética.

Palavras-Chave: Veículos elétricos; Emissão de gases do efeito estufa; Baterias de tração; Sistema elétrico brasileiro; Consumo de energia em veículos elétricos.

ABSTRACT

This dissertation made a search about the history of the electric vehicle, the electricity supply for electric vehicles in Brazil, its energy storage system and its dynamics. Its goal was to analyze the difficulties to introduce the electric vehicle on the Brazilian Market. Some comparison studies between the conventional and the electric vehicle was made in order to know more about the green house gas emissions, energy efficiency, potential fleet, auto discharge mitigation and impacts of substitution of conventional vehicles to electric vehicles in Brazil. Some improvements on commercial electric vehicles were proposed to grow up its range as well energy efficiency.

Key-words: Electric vehicles; Green house effect gas emission; Traction batteries; Brazilian electric grid; Electricity consumption in electric vehicles.

LISTA DE FIGURAS:

Figura 1: Publicidade do veículo <i>Baker Electric</i> – década de 1910 “Chegando com Estilo”- (tradução nossa).....	21
Figura 2: Jenatzy a bordo do seu “ <i>La Jamais Contente</i> ”.....	22
Figura 3: Cadillac 1912 – “o carro sem manivela” (tradução nossa).....	23
Figura 4: Henney Kilowatt.....	24
Figura 5: Chevrolet Corvaair Elétrico “ <i>Electrovair</i> ”.....	24
Figura 6: O Silver Eagle no deserto de Bonneville.....	25
Figura 7: Jipe Lunar sendo utilizado na missão Apollo.....	25
Figura 8: Gurgel Itaipu exibido em exposição de automóveis antigos.....	26
Figura 9: GM EV1.....	27
Figura 10: Fiat Palio Elétrico.....	28
Figura 11: Fiat FCC II.....	28
Figura 12: Diagrama de blocos de um veículo elétrico.....	29
Figura 13: Diagrama de blocos de um veículo elétrico proposto por Barreto acrescido do conversor CC/CC e cargas de serviço.....	30
Figura 14: Brasil – Consumo de gasolina real e previsto.....	33
Figura 15: Brasil – Consumo de etanol real e previsto.....	33
Figura 16: Interligação do sistema elétrico brasileiro.....	36
Figura 17: Estrutura da oferta interna de energia elétrica segundo a natureza da fonte primária de geração no Brasil 2007.....	37
Figura 18: Estrutura da oferta segundo a natureza da fonte primária de geração no Mundo 2006.....	37
Figura 19: Energia específica de diversos tipos de armazenamento.....	41
Figura 20: Pilhas comuns ou alcalinas são exemplos de baterias primárias.....	42
Figura 21: Pilhas recarregáveis são exemplos de baterias secundárias.....	43
Figura 22: Bateria AGM de construção tradicional.....	44
Figura 23: Bateria AGM (de construção espiral) em corte.....	45
Figura 24: Bateria de lítio polímero.....	45
Figura 25: Bateria de chumbo ácido tradicional.....	47
Figura 26: Bateria VRLA ou “livre de manutenção”.....	48
Figura 27: Bateria de gel.....	49
Figura 28: Bateria de níquel-cádmio.....	50
Figura 29: Bateria de níquel-metal-hidreto.....	51
Figura 30: Bateria de sódio-metal-cloreto.....	52
Figura 31: Baterias de lítio-íon ferro.....	54
Figura 32: Bateria de lítio-íon (nano) fosfato.....	55
Figura 33: Bateria de lítio-íon-óxido de titânio.....	56
Figura 34: Bateria de lítio polímero.....	57
Figura 35: Gráfico de descarga de uma bateria de chumbo-ácido em corrente constante.....	59
Figura 36: Gráfico de descarga - tensão vs. tempo para baterias de lítio-íon em diferentes correntes de descarga.....	60
Figura 37: Energia específica de diversas tecnologias de baterias.....	61
Figura 38: Mapa de consumo esquemático de um MCI.....	66
Figura 39: Força de propulsão e força resistente em função da velocidade.....	68
Figura 40: Curva característica de potência e torque de um motor elétrico.....	73
Figura 41: Variação do coeficiente de atrito de rolamento com a pressão, para um pneu diagonal.....	75
Figura 42 – Veículo submetido a teste em túnel de vento.....	77

Figura 43: Conjunto de transmissão – caixa de câmbio, diferencial, juntas e eixos	78
Figura 44: Emissões médias de veículos pequenos em gramas de dióxido de carbono por km, considerando-se a origem da energia.....	83
Figura 45: Energia Natural Afluente do SIN entre maio de 2001 e outubro de 2009 em GWh mensais	87
Figura 46: Geração hidráulica do sistema interligado nacional entre maio de 2001 e outubro de 2009 em GWh mensais. Fonte: ONS	88
Figura 47: Energia armazenada do sistema interligado nacional entre maio de 2001 e outubro de 2009 em GWh mensais. Fonte: ONS.....	89
Figura 48: Energia vertida turbinável, em GWh, anuais de maio de 2001 a outubro de 2009.	90
Figura 49: Demanda de energia em dia típico, feriado típico e carnaval 2009. Fonte: ONS...	90
Figura 50: Ponto inteligente de recarga de veículos elétricos, apresentado no 41º salão do automóvel de Tóquio 2009 – Fabricante Panasonic	92
Figura 51: Ponto inteligente de recarga de veículos elétricos, apresentado no 41º salão do automóvel de Tóquio 2009 – Fabricante Takaoka	93
Figura 52: Custo por Quilômetro Rodado	99
Figura 53: Custo por Passageiro por Quilômetro Transportado.....	100
Figura 54: Instalação de um sistema de geração fotovoltaico para evitar a autodescarga da bateria de níquel metal cloreto.....	102
Figura 55: Reservas Totais de Lítio por País.....	103
Figura 56: Custo das Baterias para Veículos Elétricos	104
Figura 57: Ciclo de Consumo NEDC e sua parte urbana	106
Figura 58: Veículo Atual – Energia de Resistência ao Rolamento	108
Figura 59: Veículo Atual – Energia de Resistência Aerodinâmica	108
Figura 60: Veículo Atual – Energia de Variação de Inércia.....	109
Figura 61: Veículo Atual – Energia total	110
Figura 62: Mapa de Eficiência de Descarga de uma Bateria de Lítio-Íon	111
Figura 63: Mapa de Eficiência de um Motor Elétrico	112
Figura 64: Mapa de eficiências de um inversor de frequência	113
Figura 65: Transformações de Energia e Eficiências em um Veículo Elétrico.....	114
Figura 66: Comparação de energia de resistência ao rolamento – veículo atual e proposto..	117
Figura 67: Comparação de energia de resistência aerodinâmica – veículo atual e proposto .	118
Figura 68: Comparação de energia de resistência à variação de inércia – veículo atual e proposto	119
Figura 69: Comparativo do somatório da energia necessária à movimentação – atual e proposto	120

LISTA DE TABELAS:

Tabela 1: Produção, importação líquida, consumo, reservas e capacidade instalada.....	32
Brasil 2006 e 2007 – BEN 2008.....	32
Tabela 2: Gás Natural – Produção, importação, consumo, reservas e capacidade instalada....	34
Brasil 2006 e 2007 – Fonte BEN 2008.....	34
Tabela 3 – Estrutura do consumo no setor de transportes. - Fonte BEN 2008.....	35
Tabela 4: Potencial hidrelétrico Brasil 1970 a 2007 - Fonte BEN 2008.....	38
Tabela 5: Coeficientes a e b para determinação do coeficiente de atrito ao rolamento	76
Tabela 6: Contribuição para a resistência aerodinâmica	77
Tabela 7: Valores de referência para inércia de conjuntos pneu/roda (fonte: FIAT Automóveis S.A.).....	80
Tabela 8: Emissão de dióxido de carbono em gramas por kWh de energia elétrica gerada pela natureza do combustível – Fonte: Carbon Dioxide Emissions from the Generation of Electric Power in the United States 2000.....	82
Tabela 9: Geração de energia por fonte térmica Brasil 2007 – Fonte: BEN 2008.....	82
Tabela 10: Evolução da demanda global de powertrain – Fonte: PricewaterhouseCoopers....	84
Tabela 11: Oferta interna de energia elétrica e consumo interno de energia elétrica por setor Brasil 2007.....	86
Tabela 12: Custo da energia em dólares americanos por barril equivalente de petróleo	96
Tabela 13: Dados de referência para veículo elétrico atual.....	107
Tabela 14: Valores de consumo calculados para ciclo NEDC – Veículo Atual.....	115
Tabela 15: Fichas Técnicas de Veículos Elétricos (Atual e Proposto).....	116
Tabela 16: Valores de consumo calculados para ciclo NEDC – Veículo Atual e Proposto...	120

LISTA DE QUADROS:

Quadro 1: Energia prática e energia específica de diversas baterias comerciais

62

LISTA DE SIGLAS:

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
AGM – Bateria de Mana de Fibra de Vidro Absorvente (do inglês: *Adsorbed Glass Mat*)
AMB – Anuário Mineral Brasileiro
ANL – Argonne National Laboratories
ANP – Agência Nacional do Petróleo
BEN – Balanço Energético Nacional
CA – Corrente Alternada
CC – Corrente Contínua
CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais
CONPET – Programa Nacional da Racionalização do Uso de Derivados de Petróleo e do Gás Natural
DNA – Ácido Desoxirribonucléico
EV – Veículo Elétrico (do inglês: *Electric Vehicle*)
Flex – Veículo a Combustível Flexível (misturas de etanol e gasolina)
GNV – Gás Natural Veicular
HEV – Veículo Híbrido Elétrico (do inglês: *Hybrid Electric Vehicle*)
ICEV – Veículo a Combustão Interna (do inglês: *Intern Combustion Engine Vehicle*)
IEC – *International Electrotechnical Comission*
Li-Ion – Bateria de Lítio-Íon
MCI – Motor de Combustão Interna
ME – Motor Elétrico
MIT – Instituto de Tecnologia de Massachussets
NEDC – Novo Ciclo Europeu de Consumo
NiCd – Bateria de Níquel-Cádmio
NiMH – Bateria de Níquel-Metal-Hidreto
OECD – Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico
ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico
PCH – Pequena Central Hidrelétrica
PM – Motor de Magneto Permanente (do inglês: *Permanent Magnet*)
Proálcool – Programa Nacional do Álcool (Etanol)
SIN – Sistema Interligado Nacional
SLI – Bateria de Partida, Iluminação e Ignição (do inglês: *Starter, Lightning and Ignition*)
tep – Tonelada Equivalente de Petróleo
USABC – Consórcio Americano para Baterias Avançadas
USGS – Departamento Geológico Norte-Americano (*United States Geological Survey*)
VRLA – Bateria de Chumbo-Ácido Regulada à Válvula (do inglês: *Valve Regulated Lead Acid*)

SUMÁRIO

1	Introdução e Objetivos.....	15
1.1	Objetivo Geral	15
1.2	Metodologia.....	16
1.3	Justificativa.....	17
2	A Poluição nos grandes centros urbanos e os Veículos Elétricos	18
2.1	A Poluição nos grandes centros urbanos	18
2.2	Veículos Elétricos: Histórico e Funcionamento	20
2.2.1	Histórico dos Veículos Elétricos	20
2.2.1.4	Quarta Fase – 1996 em diante:	27
2.2.2	Funcionamento do Veículo Elétrico: Diagrama de Blocos	29
3	Matrizes energética e elétrica Brasileiras e mundial:.....	31
3.1	Matriz Energética Brasileira, Setor de Transportes Terrestres de Passageiros	31
3.1.1	Consumo de Gasolina e Etanol no Setor de Transportes.....	32
3.1.2	Consumo de Gás Natural Veicular	34
3.1.3	Consumo de Energia Elétrica no Setor de Transportes	35
3.2	Matriz Elétrica Brasileira.....	36
3.2.1	Particularidades do Sistema Elétrico Brasileiro	36
3.2.2	Matriz Elétrica Brasileira e Mundial	37
3.2.4	Potencial Hidrelétrico Brasileiro	38
4	Abastecimento e Acumulação de Energia Elétrica.....	39
4.1	Histórico da Eletricidade	39
4.1.1	Cronologia das Baterias.....	40
4.1.2	Energia específica.....	41
4.2	Tipologia das Baterias	42
4.2.1	Baterias Primárias	42
4.2.2	Baterias Secundárias.....	43
4.3	Tipos de Baterias	46
4.3.1	Bateria de Chumbo-Ácido	46
4.3.2	Bateria de Níquel-Cádmio (NiCd).....	49
4.3.3	Bateria de Níquel-Metal-Hidreto	50
4.3.4	Baterias de Zinco-Ar	51
4.3.5	Baterias de Sódio-Metal-Cloreto	51
4.3.6	Baterias de Lítio	52
4.4	Energia Armazenada na Bateria	57
4.5	Recarga das Baterias.....	63
4.5.1	Recarga Lenta	63
4.5.2	Recarga Rápida.....	63
4.5.3	Troca Rápida da Bateria	64
4.5.4	Recarga em Movimento.....	64
4.6	Síntese.....	64
5	Dinâmica do Veículo Elétrico	66
5.1	Motores à Combustão Interna.....	66
5.2	Motores Elétricos.....	67
5.3	Desempenho de um Veículo Elétrico	70
5.4	Dinâmica do Movimento do Veículo Elétrico.....	71
5.4.1	Momento do Motor.....	72
5.4.2	Força Devida ao Aclive ou Declive.....	73

5.4.3 Força de Resistência ao Rolamento.....	74
5.4.4 Força de Resistência Aerodinâmica	76
5.4.5 Resistência Mecânica	78
5.4.6 Inércias.....	79
6 Impactos da inserção do veículo elétrico no Brasil e propostas para aumento da eficiência energética.....	81
6.1 Viabilidade Energética	81
6.1.1 Emissões de Dióxido de Carbono (CO ₂) por kWh de Energia Elétrica Gerada no Brasil e nos Estados Unidos	81
6.1.3 Oportunidades para o abastecimento de veículos elétricos: horários de ociosidade do sistema elétrico	84
6.1.4 Impacto da frota de veículos elétricos no sistema elétrico brasileiro	91
6.2 Custo da Energia Elétrica, dos Combustíveis e do Quilômetro Rodado por Passageiro	94
6.2.1 Custo do Quilômetro Rodado com Veículo Bi combustível Abastecido com Gasolina.....	94
6.2.2 Custo do quilômetro rodado com veículo bicomcombustível abastecido com etanol ...	95
6.2.3 Custo do Quilômetro Rodado com Veículo Elétrico.....	95
6.2.4 Custo do Quilômetro Rodado com Ônibus Urbano	97
6.2.5 Síntese.....	98
6.3 Taxa de Autodescarga	100
6.4 Fornecimento de Matérias-Primas para a Fabricação de Baterias e análise de custos .	103
6.5 Cálculo do Consumo do Veículo Elétrico	105
6.5.1 Energia Necessária ao Deslocamento.....	105
6.5.2 Cálculo do Fornecimento de Energia para o Veículo.....	110
6.6 Propostas para melhoria de autonomia de um veículo elétrico	116
6.7 Medição do consumo no veículo modificado.....	121
7. Conclusões.....	122
8. Sugestões para trabalhos futuros	124

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

A crescente preocupação com a saúde dos habitantes dos grandes centros, a necessidade da redução de emissões de dióxido de carbono e a evolução tecnológica dos meios de acumulação e transformação da energia elétrica em movimento tem aumentado o interesse pela propulsão elétrica para os automóveis nos últimos anos. Os veículos elétricos, que eram comuns no início do século XX, praticamente desapareceram na segunda década do mesmo século. Isoladamente, surgiram alguns novos modelos nos anos 1970 e 1980, porém, sem êxito comercial. Já nos anos 1990 e no início do século XXI, as tecnologias de armazenamento de energia elétrica e a sua conseqüente transformação em movimento foram fortemente desenvolvidas e aprimoradas, viabilizando novamente o veículo elétrico como meio de transporte para os centros urbanos.

1.1 Objetivo Geral

Os objetivos desta dissertação são agrupar o conhecimento sobre veículos elétricos, em especial os sistemas de armazenamento de energia, estudar o impacto da inserção de uma frota de veículos elétricos no Brasil, além de aprofundar o estudo da dinâmica deste tipo de veículo, a fim de aumentar a sua autonomia e eficiência energética.

Tem-se como objetivo também a avaliação da possibilidade de redução das resistências ao movimento dos veículos elétricos, a redução de sua massa e o uso de diferentes soluções para acumulação e de transformação da energia em movimento, visando provocar um conseqüente aumento da autonomia e da eficiência energética destes veículos.

1.2 Metodologia

O trabalho será dividido em duas grandes partes, a saber, uma dedicada à revisão bibliográfica e uma dedicada às contribuições da presente dissertação, sobre o impacto dos veículos elétricos no Brasil e as propostas para o aumento de autonomia.

Na revisão bibliográfica serão pesquisadas a situação atual da poluição nos grandes centros e o veículo elétrico, com um breve histórico deste tipo de veículo; as tecnologias de armazenamento de energia elétrica disponíveis e uma comparação com combustíveis e como se calcula a energia necessária para se movimentar um veículo, visando analisar as diversas forças resistivas que se opõem a esta movimentação.

Em uma segunda parte do trabalho, concentrada no capítulo 6, serão estudados com base na revisão bibliográfica, o impacto dos veículos elétricos por uma hipótese de crescimento da frota segundo uma estimativa mundial e em função da matriz elétrica brasileira, os custos de operação deste veículo em comparação com os veículos tradicionais à combustão, a disponibilidade de matérias primas para a fabricação de baterias e os custos previstos para estas baterias e a apresentação de propostas e de cálculos para a melhoria do aumento de eficiência energética e autonomia de um veículo elétrico atual. Também serão apresentados os resultados dos testes de autonomia do veículo atual e do veículo proposto.

1.3 Justificativa

Embora os veículos elétricos e à combustão interna coexistissem no início do século XX juntamente com os veículos a vapor ou à combustão externa, segundo Husain (2003) na década de 1920, os veículos elétricos praticamente desapareceram em detrimento dos veículos equipados com motor de combustão interna, os quais se tornaram predominantes (tradução nossa) ¹ até os dias de hoje. Tal predominância somada ao aumento da concentração de veículos nos grandes centros urbanos, dentre outros efeitos, resultou e ainda vem resultando em um crescente acréscimo dos níveis de poluição. Este aumento nos níveis de poluição dos grandes centros urbanos favorece o estudo de soluções tidas como “mais limpas” de propulsão, como a instalação de sistemas antipoluição nos veículos com motor à combustão interna e o desenvolvimento veículos elétricos e híbridos (associação de motor à combustão e motor elétrico).

Observa-se que, ultimamente, vem se destacando no mercado, tanto nacional como internacional, o interesse pelo aprimoramento e comercialização de veículos elétricos. Os vários anos de intenso desenvolvimento dos veículos a motor de combustão interna contra o quase nulo desenvolvimento dos veículos elétricos entre as décadas de 1920 e 1980 tornam-se grandes oportunidades para que sejam criadas e aprimoradas soluções que objetivem o aumento da autonomia e da eficiência energética dos veículos elétricos.

¹ 1920s – EVs disappear, and ICEVs become predominant

2 A POLUIÇÃO NOS GRANDES CENTROS URBANOS E OS VEÍCULOS ELÉTRICOS

2.1 A Poluição nos grandes centros urbanos

Segundo Braga (2002), as primeiras preocupações com a qualidade do ar tiveram início na era pré-cristã devido ao uso do carvão e da lenha como combustível. As cidades dessa época já apresentavam ares de qualidade aquém do desejável. No século XIII, a Inglaterra já havia baixado alguns atos de controle de emissão de fumaça.

Na era moderna, após a revolução industrial e a disseminação do automóvel como meio de transporte no decorrer do século XX, os níveis de poluição têm se tornado um problema grave. Alguns casos de mortes por poluição excessiva foram relatados nos Estados Unidos e Europa, ainda segundo Braga (2002):

[...] Alguns anos após, um episódio semelhante ao ocorreu durante os últimos cinco dias do mês de outubro de 1948, na cidade de Donora, Pensilvânia. Os produtos da combustão das indústrias locais permaneceram sobre a cidade devido à ocorrência de inversões térmicas que impediram a dispersão destes poluentes. Inversão térmica é um fenômeno meteorológico onde ocorre a presença de uma camada de ar frio alguns metros acima da superfície que impede a dispersão e a movimentação de massas de ar mais quentes localizadas próximas do solo. Essa camada mais fria age como se fosse a tampa de uma panela concentrando vapor no seu interior. Durante este período foram observadas 20 mortes ao invés das duas mortes esperadas normalmente em uma comunidade de 14.000 pessoas. Porém, o mais clássico e mais grave dos episódios acerca dos efeitos deletérios dos poluentes do ar foi o acontecido em Londres. Durante o inverno de 1952, um episódio de inversão térmica impediu a dispersão de poluentes, gerados então pelas indústrias e pelos aquecedores domiciliares que utilizavam carvão como combustível, e uma nuvem, composta principalmente por material particulado e enxofre (em concentrações até nove vezes maiores do que a média de ambos), permaneceu estacionada sobre a cidade por aproximadamente três dias, levando a um aumento de 4.000 mortes em relação à média de óbitos em períodos semelhantes. (Braga e outros, 2002, p. 2)

Nos dias atuais, em função do crescimento tecnológico e industrial, a poluição tem ultrapassado os limites toleráveis pelo organismo humano para uma boa qualidade de vida. Desta forma, a preocupação em se reduzir o nível de poluição nos grandes centros tem movido

a indústria e o meio acadêmico a buscar soluções alternativas ao sistema de propulsão baseado no motor térmico puro, o qual funciona com combustíveis de origem fóssil ou oriundos da biomassa². Como exemplos destas soluções alternativas podem ser citados aquelas de tração puramente elétrica (EVs) e as de propulsão híbrida (HEVs), que apresentam em comum a menor emissão de gases poluentes quando comparados a um ICEV. Ressalta-se, ainda, que a emissão de poluentes, no caso do EV, é praticamente nula.

Ainda segundo Braga (2002), a exposição prolongada aos níveis atuais de poluição promove:

- Alterações inflamatórias das vias aéreas em animais de experimentação e seres humanos, com prejuízo dos mecanismos de defesa dos pulmões contra microorganismos;
- Indução a danos do DNA (mutações) com favorecimento do surgimento de tumores pulmonares em humanos e animais;
- Caracterização, de forma sistemática, aumentos de morbidade (doenças) e mortalidade por eventos respiratórios e cardiovasculares, após um período desfavorável de inversão térmica com acúmulo de poluentes.

Os efeitos agudos das variações de poluição ocorrem após um período de tempo muito curto (no máximo cinco dias) e não exibem nível de segurança. Ou seja, mesmo quando os padrões da legislação ambiental não são ultrapassados, indivíduos desta nossa comunidade de milhões de habitantes irão experimentar os efeitos adversos graves da poluição sobre a sua saúde.

Segundo Esteves (2003), na cidade de São Paulo, 90% da poluição atmosférica são provenientes de fontes móveis, ou seja, de veículos leves de passageiros, de transporte coletivo e de veículos comerciais de transporte. A substituição, nos veículos urbanos, dos motores térmicos por motores elétricos que utilizam eletricidade gerada a partir de fontes renováveis (hidrelétrica, solar, eólica, fotovoltaica etc.) ou ainda de fontes não renováveis

² Cabe citar aqui a iniciativa brasileira de estimular o uso do álcool combustível proveniente da cana de açúcar. Primeiro, através do Proálcool, que conseguiu uma grande participação deste combustível na frota de automóveis brasileira a partir do início da década de 1980, e que tomou novo impulso com a introdução dos modelos *Flex*, à partir da segunda metade dos anos 2000.

(usinas termoelétricas), sendo estas geradas distantes dos grandes centros urbanos, vislumbra um grande potencial de redução de poluição destes centros, uma vez que a transformação de energia elétrica em energia mecânica para movimentar o veículo não resulta em emissões gasosas tóxicas próximas às grandes concentrações populacionais. Soma-se a isto o fato de a energia elétrica no Brasil ser predominantemente de origem hidroelétrica, gerando poucas emissões gasosas prejudiciais ao meio ambiente e à saúde humana, se comparada às outras fontes de energia.

2.2 Veículos Elétricos: Histórico e Funcionamento

2.2.1 Histórico dos Veículos Elétricos

A história dos veículos elétricos pode ser dividida em quatro fases, que diferem entre si pela tecnologia empregada e pela sua inserção no contexto socioeconômico de cada época, a saber:

2.2.1.1 Primeira fase – 1837 a 1912

Segundo Barreto (1986), em 1837, na Inglaterra, foi construída a primeira carruagem elétrica. Portanto, quase 40 anos antes do primeiro automóvel a motor de combustão interna (ICEV), o *Patentmotorwagen*, de Karl Benz, em 1886. Ainda segundo Barreto (1986), em 1897, surgiu uma frota de táxis elétricos em Londres, sendo que o ápice da produção e comercialização dos veículos elétricos (ou EVs) ocorreu entre os anos de 1890 e 1910. Estes veículos eram preferidos pela população por não trazer os inconvenientes dos automóveis à combustão interna (ICEV) e externa (veículos a vapor), tais como: barulho, fumaça, esforço e riscos à integridade física na partida à manivela, causada por contragolpes do motor de combustão interna, além da demora e do risco de incêndios, no caso dos motores de combustão externa. O veículo elétrico era a escolha de pessoas que o utilizavam para

deslocamentos urbanos curtos e para eventos sociais, como demonstra a publicidade da época, a seguir (figura1).



Figura 1: Publicidade do veículo *Baker Electric* – década de 1910 “Chegando com Estilo”- (tradução nossa)

Fonte: Vintage Ad Browser

Em 1899, foi quebrado o recorde de velocidade pelo belga Jenatzy, a bordo de um veículo elétrico, o “La Jamais Contente”, que atingiu 106km/h (figura 2).

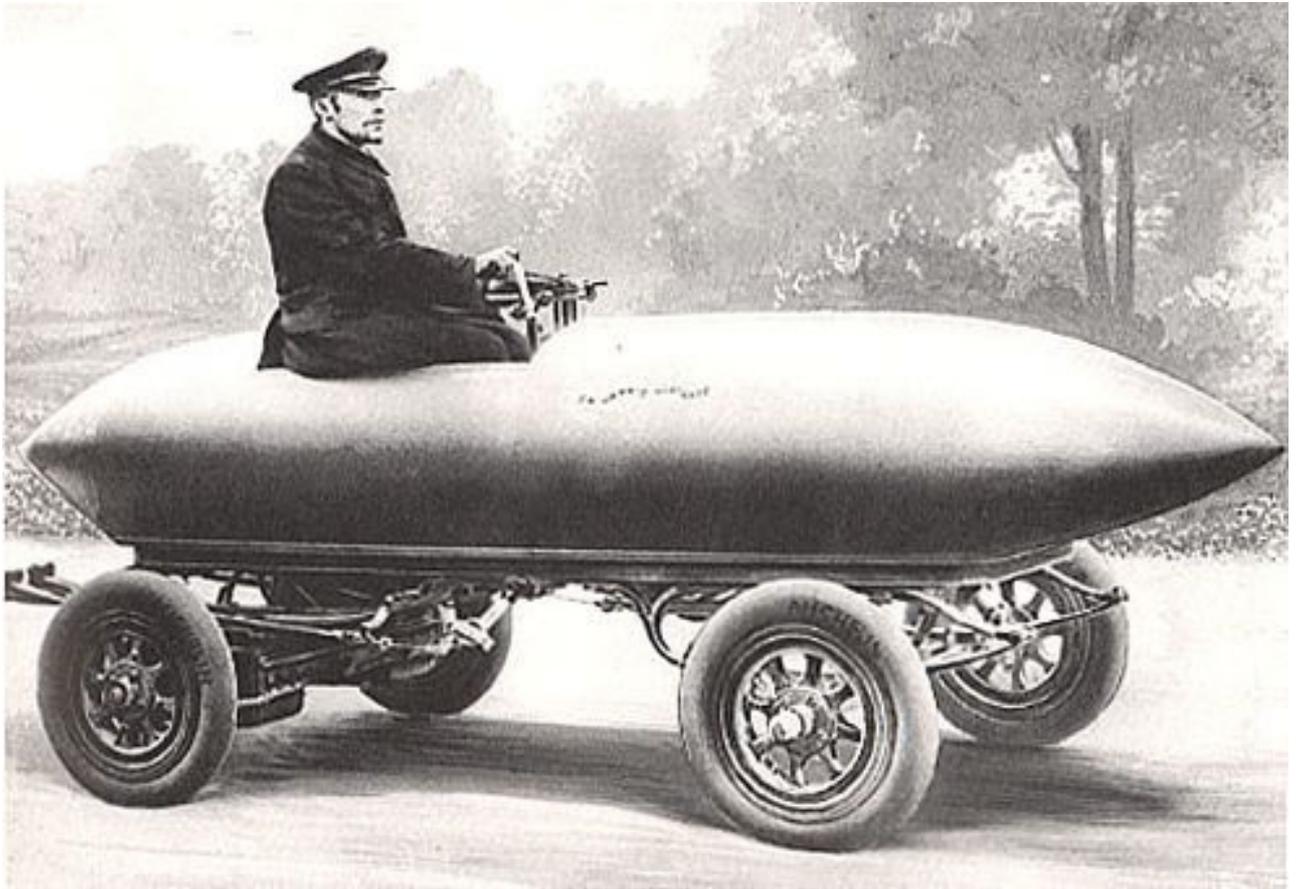


Figura 2: Jenatzy a bordo do seu “La Jamais Contente”
Fonte: Nature

2.2.1.2 Segunda Fase – 1912 a 1973

Após as descobertas de campos de petróleo na virada do século, bem como o desenvolvimento de técnicas de destilação em regime contínuo e o conseqüente custo em redução dos derivados de petróleo, todo o desenvolvimento tecnológico da indústria automobilística foi concentrado para os motores de combustão interna. O Cadillac 1912 (figura 3), por exemplo, marca o fim da primeira fase do carro elétrico por incorporar a partida elétrica ao invés da partida à manivela, característica que se estendeu gradativamente a todos os outros fabricantes. Em 1920, quase todos os automóveis já dispunham da partida elétrica.

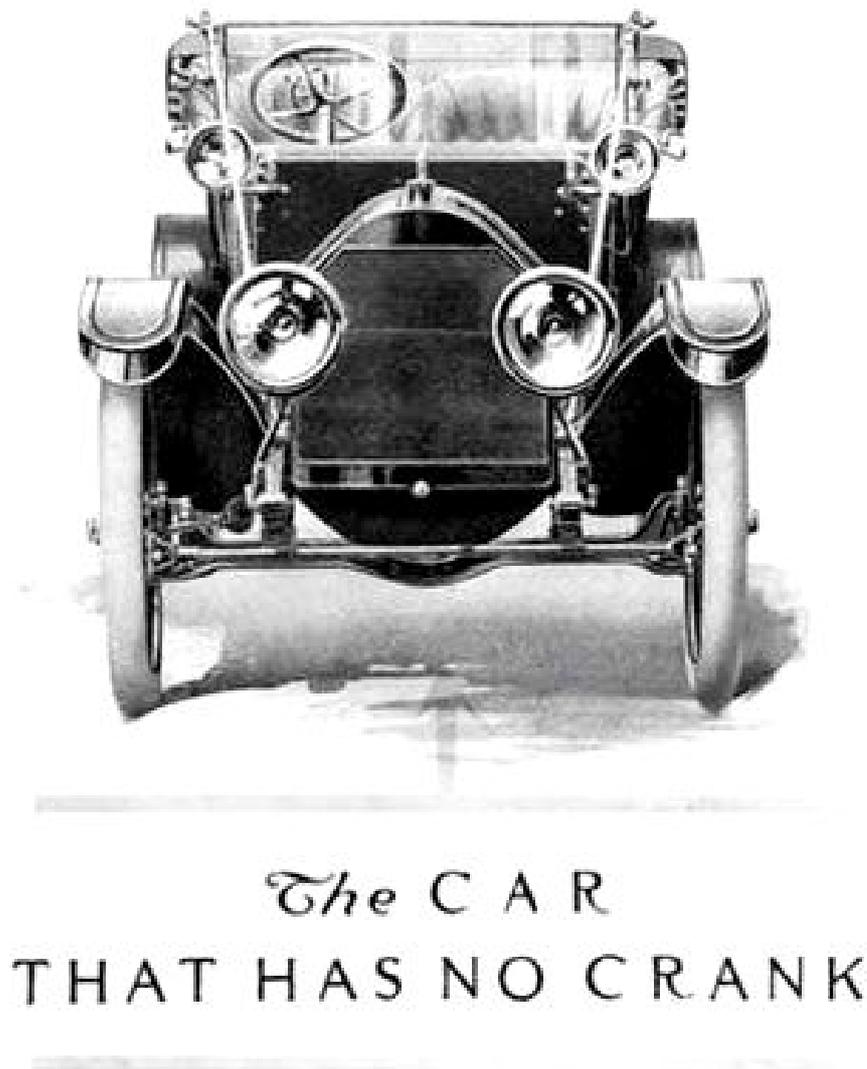


Figura 3: Cadillac 1912 – “o carro sem manivela” (tradução nossa)
Fonte: Wired

Nesta época, poucos foram os veículos elétricos presentes no mercado como, por exemplo, o Brougham, que atingia 51,5km/h e possuía uma autonomia de 97km. Entretanto, as vendas foram mínimas. Segundo Husain (2003), no final da década de 1950 e início da década de 1960, nos Estados Unidos as preocupações com os efeitos da poluição levaram a algumas iniciativas como o Henney Kilowatt (figura 4), o qual era movido a baterias de chumbo-ácido, lançado em 1959 e, segundo Bennet (1960), foi o “primeiro veículo elétrico

transistorizado”³ (tradução nossa), além do Chevrolet Corvair Elétrico, conhecido como Electrovaair, com baterias de zinco e prata (figura 5).

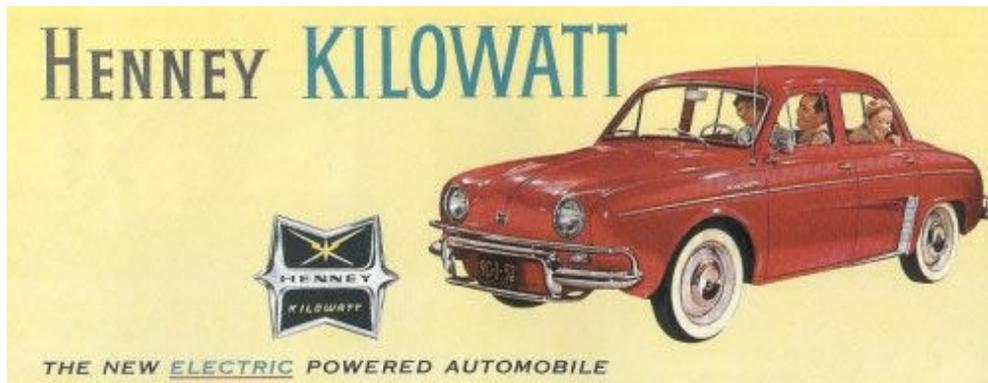


Figura 4: Henney Kilowatt
Fonte: UOL



Figura 5: Chevrolet Corvair Elétrico “Electrovaair”
Fonte: General Motors

Também nesta fase, alguns veículos foram construídos a fim de superar o recorde de velocidade com veículo elétrico, como o Silver Eagle, de 1971, que atingiu 245km/h (figura

³ "the first transistor-based electric car" - Electric Light & Power (industry journal), Ell C. Bennett (editor), v. 38, pp. 61-62, 1960

6). Porém o mais famoso de todos os veículos elétricos que surgiu nesta fase, deveu-se ao programa espacial dos Estados Unidos, que criou o jipe lunar elétrico de 1969 (figura 7).



Figura 6: O Silver Eagle no deserto de Bonneville
Fonte: Speedace

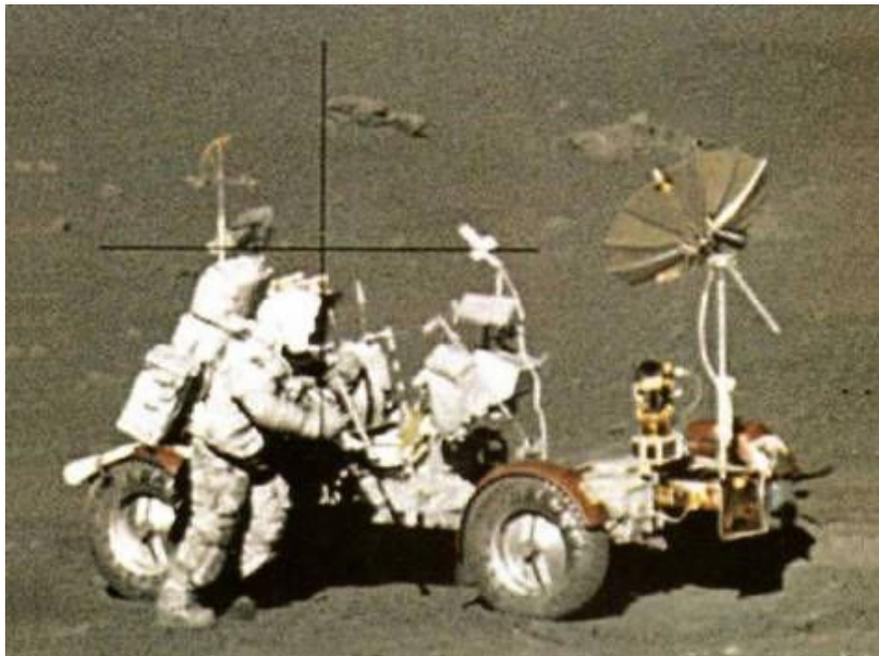


Figura 7: Jipe Lunar sendo utilizado na missão Apollo
Fonte: NASA

Exceto pelos exemplos acima e poucos outros, neste período a tração elétrica ficou quase que reservada aos meios de transporte em massa como ônibus, bondes e trens, e à movimentação de cargas industriais (empilhadeiras e máquinas de tração industriais utilizadas em minas).

2.2.1.3 Terceira Fase – 1973 a 1996

Com os choques do petróleo de 1973 e 1979, voltou-se a se pensar numa forma de substituir parte do petróleo da matriz energética utilizada pelo setor de transportes. Vários experimentos foram feitos e alguns veículos foram comercializados. Uma característica que se observa é que estes veículos utilizavam-se da tecnologia de armazenamento de energia igual àquela utilizada na primeira fase do carro elétrico (1837-1912), ou seja, baterias à base de chumbo-ácido, as quais são compostas basicamente por placas de chumbo imersas em ácido sulfúrico, como nas baterias tradicionais de partida de automóveis, salvo algumas exceções não comerciais. Vale citar o esforço de Gurgel (1926-2009) em produzir o primeiro carro elétrico brasileiro, o Itaipu, em 1974, com autonomia de 60km (figura 8).



Figura 8: Gurgel Itaipu exibido em exposição de automóveis antigos
Fonte: Quatro Rodas

Os esforços em se produzir veículos com maior autonomia duraram até a primeira metade da década de 80, quando foi, enfim, superada a crise do petróleo e os preços no mercado internacional começaram a cair. Também nesta época, os avanços na eletrônica possibilitaram um aumento na eficiência dos motores de combustão e, no Brasil, ainda cabe citar o sucesso do programa governamental “Proálcool”, inviabilizando comercialmente a produção de veículos elétricos.

2.2.1.4 Quarta Fase – 1996 em diante:

Os crescentes aumentos nos níveis de poluição nos grandes centros, o aumento das emissões de gases causadores do efeito estufa e o aquecimento global, dentre outros aspectos de degradação do meio ambiente, pelo homem, sinalizados na Conferência Eco 92, no Rio de Janeiro, culminou com a assinatura do protocolo Kyoto, em 1997, no Japão. Sob a ótica da redução de emissões de gases causadores do efeito estufa e da melhoria de qualidade do ar nos grandes centros urbanos, os veículos elétricos projetados nesta fase não mais possuem a obrigação de ser um substituto completo do veículo de combustão interna, tendo como premissas de sucesso o custo, o desempenho e a autonomia próximos daqueles.

Nesta fase, procura-se projetar e produzir um veículo que, mesmo não tendo o ciclo completo de balanço de emissão de dióxido de carbono nulo ou quase nulo, a exemplo do etanol combustível, contribua para a redução dos níveis de poluição atmosférica e sonora nos grandes centros e que complemente a oferta de meios de transporte autônomos diversificando, assim, a matriz energética para o setor de transportes.

Um marco desta nova maneira de se enxergar o veículo elétrico foi o lançamento do GM EV1, da General Motors, em 1996, conforme mostrado na figura 9. Este automóvel incorporava novas tecnologias em baterias e sistemas de propulsão, tais como motor de corrente alternada e inversor de frequência.



Figura 9: GM EV1
Fonte: General Motors

O veículo EV1 nunca foi vendido, mas alugado em contratos de longa duração. Ao fim do período de vigência dos primeiros contratos, a General Motors não deu continuidade ao projeto em função de razões estratégicas. A configuração do EV1, com baterias de alta energia específica, motor de corrente alternada e inversor de frequência, permanece sendo a alternativa escolhida pelas empresas automotivas para o desenvolvimento dos veículos elétricos atuais (2008).

No Brasil, pode-se citar o Palio Elétrico de 2006 (figura 10) e o Carro Conceito FCC II de 2008 (figura 11), projetados e fabricados no Brasil pela Fiat Automóveis S/A incorporando, entretanto, alguns componentes importados, em especial, as baterias e os motores.



Figura 10: Fiat Palio Elétrico
Fonte: Fiat Automóveis S.A.



Figura 11: Fiat FCC II
Fonte: Fiat Automoveis S.A.

2.2.2 Funcionamento do Veículo Elétrico: Diagrama de Blocos

Segundo Barreto (1986), um veículo elétrico CC/CA (corrente contínua da bateria e corrente alterada no motor), apresenta o seguinte diagrama de blocos, mostrado de modo simplificado e com algumas modificações na figura 12:

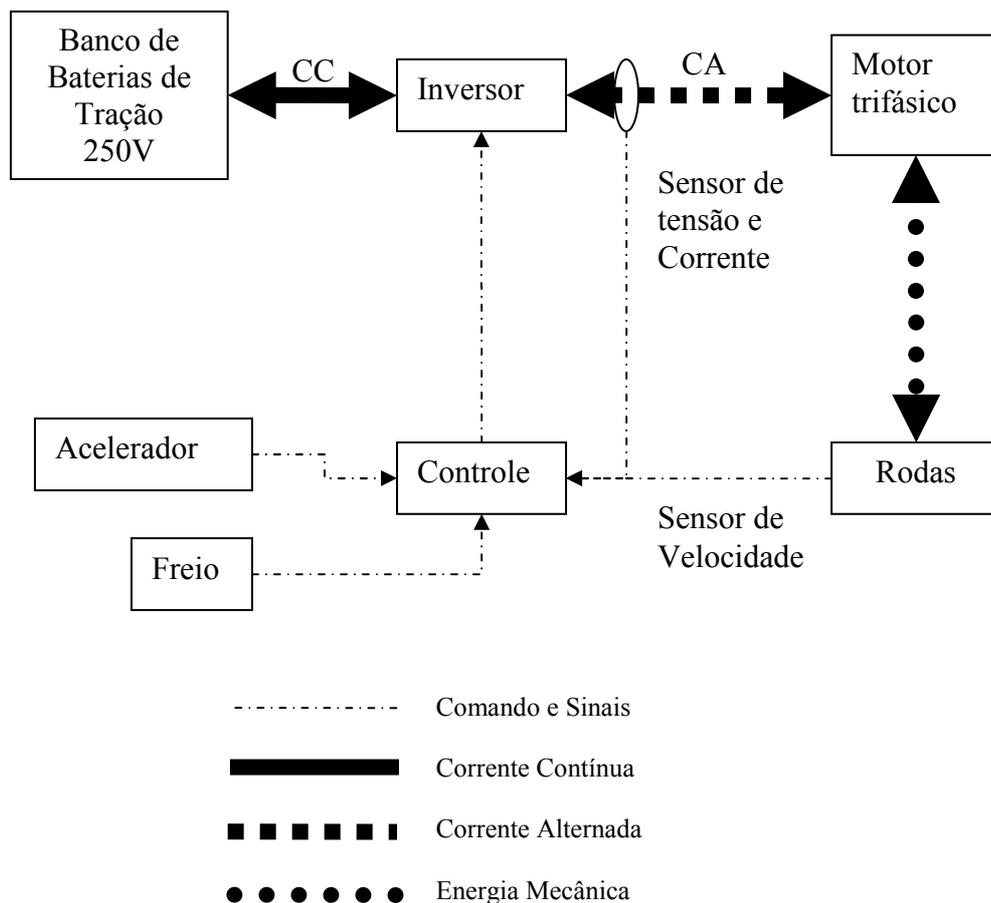


Figura 12: Diagrama de blocos de um veículo elétrico

A seta dupla entre o banco de baterias e o inversor, entre este e o motor trifásico e entre o motor trifásico e as rodas indica que o fluxo de energia ocorre nos dois sentidos, ou seja, o banco de baterias de tração provê energia para a movimentação do veículo e, quando em frenagem, recupera parte da energia cinética do veículo sob a forma de energia eletroquímica, no banco de baterias de tração. Esta é a principal modificação no diagrama proposto por Barreto (1986). Ainda sobre o diagrama de Barreto (1986), pode-se extrapolar adicionando-se as interfaces presentes nos veículos, como o carregamento do banco de baterias de tração e da bateria de serviço (de 12V), encarregada de armazenar e fornecer

energia para o sistema elétrico convencional do veículo, o qual é composto pelas cargas dos sistemas de iluminação, ventilação, arrefecimento, áudio e alarme, dentre outros, conforme mostrado na figura 13.

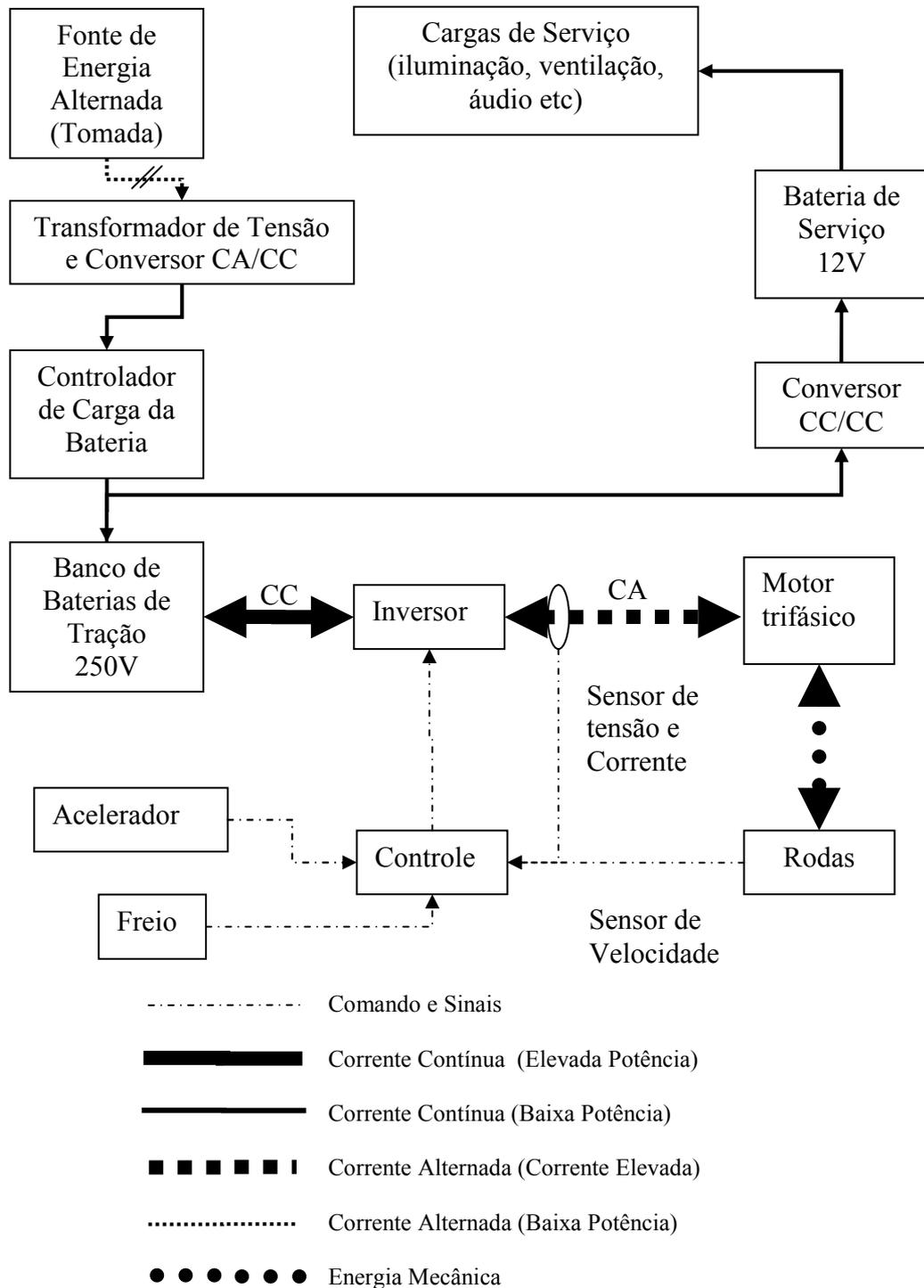


Figura 13: Diagrama de blocos de um veículo elétrico proposto por Barreto acrescido do conversor CC/CC e cargas de serviço.

3 MATRIZES ENERGÉTICA E ELÉTRICA BRASILEIRAS E MUNDIAL:

Este capítulo visa demonstrar como são estruturadas as matrizes energética e elétrica brasileiras, compará-las com as matrizes de outros países e atentar para os aspectos relevantes ao setor de transportes.

3.1 Matriz Energética Brasileira, Setor de Transportes Terrestres de Passageiros

A matriz energética brasileira define a totalidade das fontes de energia empregadas para as mais diversas atividades da sociedade. Analisando-se a matriz brasileira, podem-se verificar quais as fontes de energia utilizadas e quais as participações destas no setor de transportes terrestres de passageiros.

No Brasil, pode-se inferir o consumo de combustível dos automóveis e veículos leves (motos, triciclos e afins) utilizando-se do consumo dos combustíveis disponíveis para estes veículos, uma vez que a legislação brasileira permite a utilização de apenas três tipos, a saber:

- Gasolina,
- Etanol combustível e
- Gás natural veicular.

O óleo diesel é proibido para aplicações em veículos com menos de uma tonelada de carga, sendo permitido apenas em casos especiais como para os jipes, que representam uma parcela desprezível da frota circulante. Sendo assim, a utilização do óleo diesel fica restrita, principalmente, aos ônibus, caminhões e camionetas e não será, portanto, considerada para o estudo. Do mesmo modo, o querosene, que é utilizado principalmente na aviação, não será abordado para a análise de transportes terrestres de passageiros.

A energia elétrica, por sua vez, tem utilização bastante restrita no setor de transportes, visto que é utilizada apenas para o transporte de passageiros em trólebus, trens de superfície e de metrô, estes presentes em apenas algumas regiões metropolitanas do país.

3.1.1 Consumo de Gasolina e Etanol no Setor de Transportes

O Balanço Energético Nacional (BEN) 2008 aponta uma pequena redução do consumo de gasolina veicular, da ordem de 1%, entre os exercícios de 2006 e 2007, conforme tabela 1 a seguir. Esta queda é causada principalmente pelo aumento do consumo de etanol, da ordem de 28%, passando de 6.982 para 8.967 x 10³ toneladas equivalentes de petróleo (TEP), entre os anos 2006 e 2007, em função da substituição à gasolina em veículos *flex*, os quais podem utilizar-se tanto da gasolina quanto do etanol combustível ou, ainda, da mistura destes em qualquer proporção.

Tabela 1: Produção, importação líquida, consumo, reservas e capacidade instalada Brasil 2006 e 2007

	Unidade	2006	2007	% 07/06
Produção de Petróleo e LGN	10 ⁹ bbl/d	1.760,6	1.753,3	-0,4%
Produção de Derivados	10 ⁹ bbl/d	1.815,2	1.894,5	4,4%
Importações Líquidas de Petróleo	10 ⁹ bbl/d	-33,4	-5,8	-82,7%
Importações Líquidas de Derivados	10 ⁹ bbl/d	-17,1	7,7	-145,1%
Consumo de Derivados	10 ⁹ bbl/d	1.740,7	1.818,1	4,4%
Consumo de Gasolina Veicular	10 ⁹ bbl/d	323,1	319,7	-1,1%
Consumo de Óleo Diesel Rodoviário	10 ⁹ bbl/d	532,4	563,7	5,9%
Consumo de Óleo Combustível Industrial	10 ⁹ bbl/d	72,6	76,3	5,1%
Consumo de GLP Residencial	10 ⁹ bbl/d	161,0	166,3	3,3%
Consumo de Coque de Petróleo	10 ⁹ bbl/d	79,8	93,0	16,5%
Reservas Provasdas de Petróleo	10 ⁹ bbl	12,2	11,9	-2,3%
Capacidade Instalada Nominal de Refino	10 ⁹ bbl/d	2.016,7	2.036,2	1,0%

Fonte: BEN 2008

De uma maneira geral, enquanto o BEN analisa o que já ocorreu no tocante ao consumo e oferta de energia, o plano decenal de expansão de energia faz uma previsão e é a base do planejamento para a área de energia. Segundo o plano decenal de expansão de energia 2007 – 2016, o consumo de gasolina e de etanol, tende a passar dos atuais 19 mil metros cúbicos para mais de 25 mil metros cúbicos cada, com um aumento maior para o etanol, até 2016, projetando um aumento de, aproximadamente, 20%, conforme os gráficos apresentados pelas figuras 14 (gasolina) e 15 (etanol) a seguir:

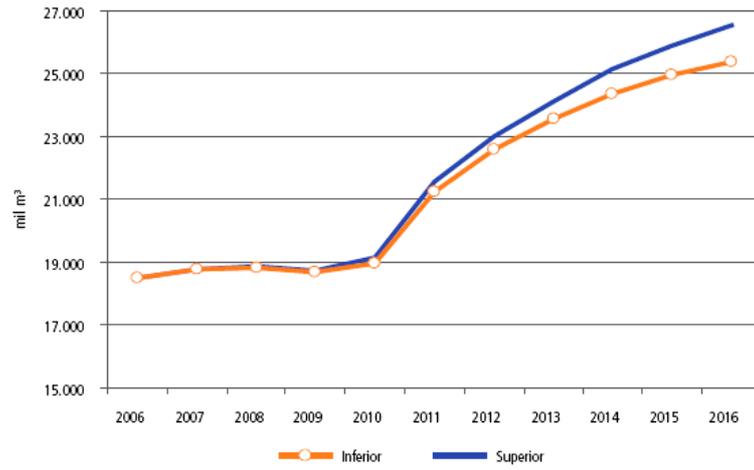


Figura 14: Brasil – Consumo de gasolina real e previsto
Fonte BEN 2008

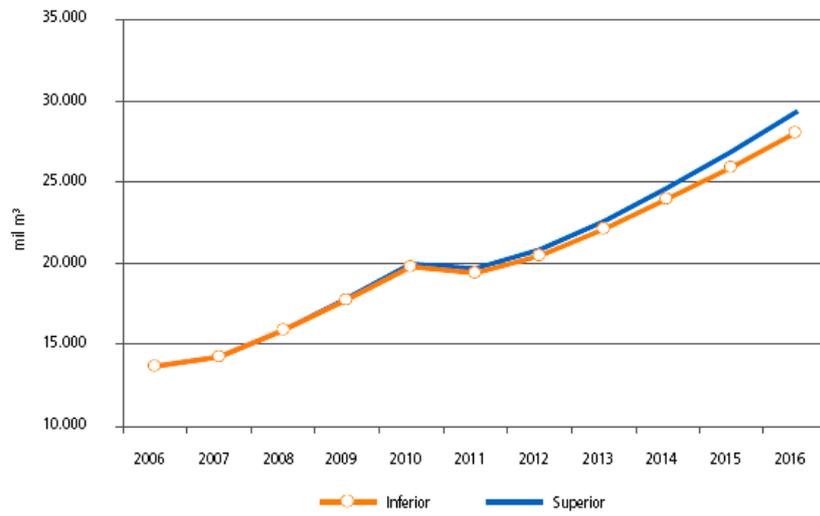


Figura 15: Brasil – Consumo de etanol real e previsto
Fonte BEN 2008

3.1.2 Consumo de Gás Natural Veicular

O consumo de gás natural veicular (GNV) também apresenta aumento da ordem de 10% em relação ao ano anterior, segundo a tabela 2 a seguir, extraída do BEN 2008:

Tabela 2: Gás Natural – Produção, importação, consumo, reservas e capacidade instalada Brasil 2006 e 2007

	Unidade	2006	2007	% 07/06
Produção	10 ⁶ m ³ /d	48,5	49,7	2,5
Importação	10 ⁶ m ³ /d	26,8	28,3	5,6
Uso Térmico do Setor Energético	10 ⁶ m ³ /d	10,2	11,0	8,1
Consumo Industrial	10 ⁶ m ³ /d	23,5	25,2	7,0
Consumo Transporte	10 ⁶ m ³ /d	6,3	7,0	10,9
Consumo na Geração Elétrica CESP ¹	10 ⁶ m ³ /d	8,0	6,6	-18,2
Consumo na Geração Elétrica CEAP ²	10 ⁶ m ³ /d	3,4	3,1	-8,8
Uso Não-Energético	10 ⁶ m ³ /d	2,4	2,4	1,5
Reservas Provadas	10 ⁹ m ³	347,9	365,0	4,9
Capacidade Instalada de Plantas de Gás	10 ⁶ m ³ /d	49,6	49,6	-

¹ CESP - Centrais Elétricas de Serviço Público

² CEAP - Centrais Elétricas Autoprodutoras

Fonte BEN 2008

Recorda-se que o programa de gás natural veicular foi implantado de maneira a diversificar a matriz energética do setor de transportes, aproveitando-se as reservas brasileiras e bolivianas, como uma alternativa de combustível menos poluente em relação à gasolina, recebendo inclusive redução de impostos em alguns estados.

Cabe salientar que o gás natural por ser um hidrocarboneto, também produz gases do efeito estufa quando queimado, portanto, um veículo movido a este combustível não está isento de emissões gasosas.

3.1.3 Consumo de Energia Elétrica no Setor de Transportes

O BEN 2008 aponta que o consumo de energia elétrica para transportes é exclusivamente ferroviário. Analisando-se a tabela 3 a seguir, tem-se que o consumo de energia elétrica representa um valor entre o mínimo de 0,24% e um máximo de 0,54% do total do setor de transporte terrestre de passageiros.

Tabela 3 – Estrutura do consumo no setor de transportes.

Identificação	10 ³ tep									
	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
Gás Natural	116	140	275	503	862	1.169	1.390	1.711	2.030	2.252
Carvão Vapor	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lenha	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Óleo Diesel	23.100	23.395	24.090	24.840	25.834	25.058	26.810	26.685	27.112	28.731
Óleo Combustível	773	755	648	712	742	699	782	806	733	930
Gasolina Automotiva	14.772	13.770	13.261	12.995	12.426	13.115	13.560	13.595	14.440	14.287
Gasolina de Aviação	62	58	58	56	42	47	47	42	54	56
Querosene	3.145	2.931	3.124	3.215	3.092	2.194	2.345	2.553	2.381	2.618
Eleticidade	101	101	107	103	81	84	89	102	126	135
Álcool Etilíco	6.783	6.798	5.820	5.377	6.085	5.794	6.445	6.963	6.395	8.612
Álcool Etilíco Anidro	2.850	3.205	3.046	3.208	3.871	3.875	3.979	4.079	2.777	3.325
Álcool Etilíco Hidratado	3.933	3.594	2.774	2.170	2.214	1.919	2.466	2.885	3.618	5.287
Outras Secundárias de Petróleo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	48.852	47.949	47.385	47.802	49.163	48.160	51.469	52.459	53.270	57.621

Fonte BEN 2008

O valor mínimo foi calculado confrontando-se o consumo de energia elétrica utilizada no setor de transportes contra a soma dos consumos de gasolina, etanol e gás natural, notadamente de uso exclusivo para transporte de passageiros, e do óleo diesel, destinado ao transporte de passageiros e de carga. Neste valor de mínimo do consumo de energia elétrica, admitiu-se uma hipotética destinação de 100% para o transporte de passageiros.

O valor máximo foi calculado confrontando-se o mesmo dado de consumo de energia elétrica considerado no item anterior contra a soma dos consumos de gasolina, etanol e gás natural, diferindo do cálculo do item anterior pela exclusão do óleo diesel. Neste valor de máximo consumo de energia elétrica, admitiu-se uma hipotética destinação de 100% do óleo diesel para o transporte de carga.

3.2 Matriz Elétrica Brasileira

Dentro da matriz energética brasileira, tem-se a matriz elétrica brasileira. A matriz elétrica define as diversas fontes geradoras de energia elétrica e a participação de cada fonte no total de energia elétrica consumida no país.

3.2.1 Particularidades do Sistema Elétrico Brasileiro

Pode-se considerar o sistema elétrico brasileiro como sendo único em âmbito mundial, em função de seu porte e da forte predominância de usinas hidrelétricas de múltiplos proprietários.

Segundo o Plano Decenal de Expansão de Energia 2007-2016 (2007), 97,9% do consumo de energia elétrica do Brasil está interligado. A parcela do consumo não interligada situa-se principalmente em sistemas isolados da região amazônica. O Sistema Nacional Interligado (SIN) é representado pelo mapa da figura 16 a seguir.

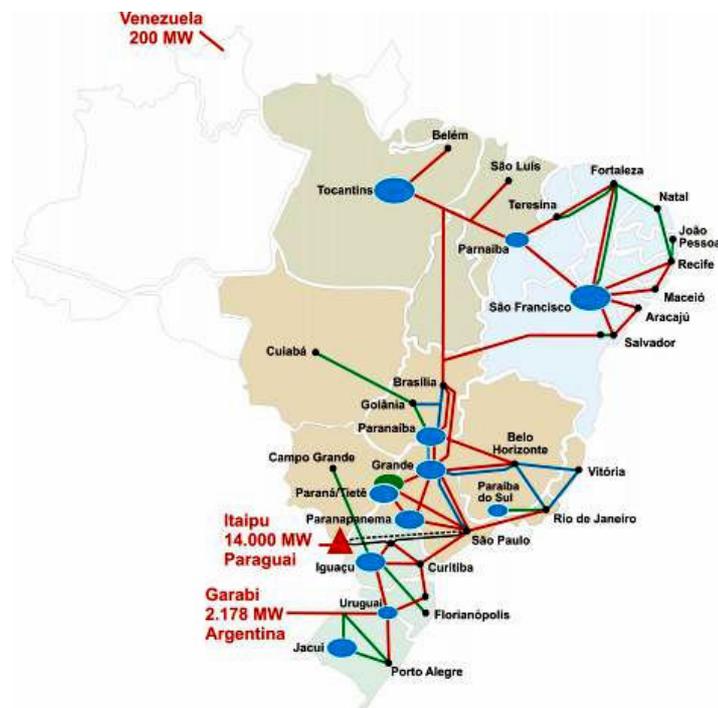


Figura 16: Interligação do sistema elétrico brasileiro
Fonte BEN 2008

3.2.2 Matriz Elétrica Brasileira e Mundial

Segundo o BEN 2008 exercício 2007 (2008), sobre a geração de energia elétrica:

“Pode-se observar que o Brasil apresenta uma matriz de geração de origem predominantemente renovável, com aproximadamente 75% da oferta sendo atendida por geração interna hidráulica. Somando-se às importações, que essencialmente também são de origem renovável, pode-se afirmar que mais de 80% a eletricidade no Brasil é originada de fontes renováveis – sem considerar que parte da geração térmica é originada de biomassa.”(Balanço Energético Nacional 2007, 2008, 12)

Esta estrutura é demonstrada pelo gráfico da figura 17 a seguir:

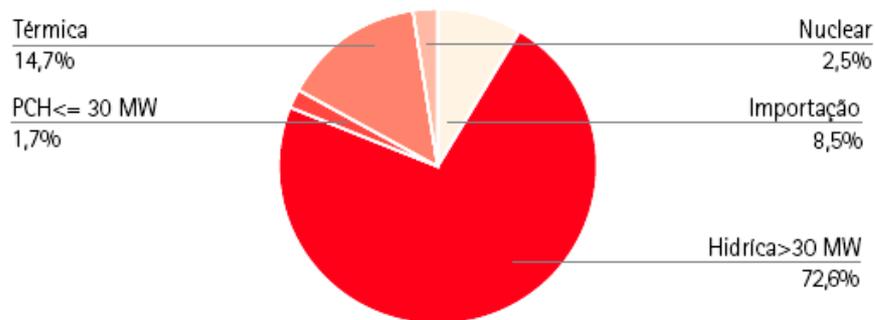


Figura 17: Estrutura da oferta interna de energia elétrica segundo a natureza da fonte primária de geração no Brasil 2007
Fonte BEN 2008

Ainda segundo o BEN 2008, na média da matriz elétrica mundial, a participação de fontes renováveis correspondem a apenas 18,3% da geração de eletricidade, como se pode verificar a partir do gráfico da figura 18 a seguir:

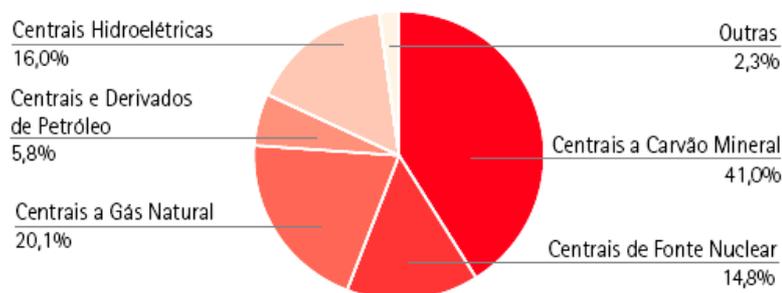


Figura 18: Estrutura da oferta segundo a natureza da fonte primária de geração no Mundo 2006
Fonte BEN 2008

3.2.4 Potencial Hidrelétrico Brasileiro

Entende-se por potencial hidrelétrico, o potencial possível de ser técnica e economicamente aproveitado nas condições atuais de tecnologia. O potencial hidrelétrico é medido em termos de energia firme, que é a geração máxima contínua na hipótese de repetição futura do período hidrológico mais crítico. O potencial hidrelétrico inventariado compreende as usinas em operação ou em construção e os aproveitamentos disponíveis estudados nos níveis de inventário, viabilidade e projeto básico.

Tomando-se por base o inventário como etapa em que se mede com toda precisão o potencial hidrelétrico, pode-se avaliar a precisão dos valores obtidos para o potencial estimado. De acordo com estudos de avaliação já procedidos, os valores estimados situam-se em até cerca de 35% abaixo do valor final inventariado, donde se conclui que o potencial estimado é bastante conservador. A tabela 4 a seguir apresenta a evolução do potencial hidrelétrico no Brasil entre os anos de 1970 e 2007.

Tabela 4: Potencial hidrelétrico Brasil 1970 a 2007

			MW
	Inventariado + Aproveitado	Estimado	Total
1970/79	36.977	42.370	79.347
1980/85	66.470	40.100	106.570
1986/90	75.766	51.778	127.543
1991/92	77.200	51.800	129.000
1993/94	82.686	51.800	134.486
1995/2005	92.880	50.500	143.380
2006/2007	112.200	26.200	138.400

(*) Energia firme

Fonte BEN 2008

Atualmente o Brasil possui uma capacidade instalada em torno de 100.000MW, restando ainda 38.400MW a serem instalados.

4 ABASTECIMENTO E ACUMULAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.

Neste capítulo serão abordadas as técnicas de abastecimento e de acumulação de energia, de uma maneira geral, e as especificidades deste tema para os veículos elétricos.

4.1 Histórico da Eletricidade

Segundo Buchmann. (2001), embora a eletricidade faça parte da história humanidade desde os primórdios da vida na terra, ela tornou-se efetivamente conhecida a partir do século XVII. Em 1660, Otto Von Guericke demonstrou na Alemanha que era possível se obter energia a partir do atrito. Em 1800, Alessandro Volta demonstrou a possibilidade se obter eletricidade por meio de reações químicas de oxidação e redução. E, finalmente, André-Marie Ampère, em 1820, demonstrou que se poderia obter a eletricidade também através do magnetismo. Esta última descoberta permitiu a geração de energia elétrica e sua democratização, por volta da segunda metade do século XIX.

O armazenamento de eletricidade, embora dominado a mais tempo, teve seu desenvolvimento deixado para segundo plano devido não só às descobertas de Ampère, como também aquelas que se seguiram no campo da eletricidade, aliada ao advento do petróleo como fonte portátil de energia. Com o surgimento dos equipamentos eletrônicos portáteis desde a década de 70, e mais ultimamente com o retorno pelo interesse pelo desenvolvimento e fabricação de veículos de propulsão elétrica e híbrida, a tecnologia relativa a baterias vem se desenvolvendo muito rapidamente estando, por várias vezes, o nível de conhecimento presente na literatura impressa já defasado pelos avanços tecnológicos desenvolvidos pelas empresas de ponta.

4.1.1 Cronologia das Baterias

Ainda segundo Buchmann. (2001), o italiano Alessandro Volta, baseado nos experimentos de outro italiano, Luigi Galvani, iniciou uma série de experimentos relativos ao armazenamento de energia, usando zinco, chumbo, estanho ou ferro como placas positivas, e cobre, prata, ouro ou grafite como placas negativas. No ano de 1800, ele descobriu que um fluxo contínuo de elétrons era produzido quando eram utilizados certos fluidos como condutores para promover a reação química entre as placas de metal (ou grafite). Esta descoberta permitiu a invenção da primeira “pilha” da história. Esta primeira pilha, também conhecida como “Pilha de Volta,” devido ao empilhamento das várias células para se aumentar a tensão, foi apresentada à real sociedade de Londres no mesmo ano. Até então, os primeiros experimentos produziam apenas faíscas de curta duração, a partir da descoberta de Volta, a energia elétrica era disponível de uma maneira contínua jamais vista.

No ano de 1802, o inglês Dr. William Cruickshank projetou a primeira bateria de produção em massa. Cruickshank desenvolveu chapas quadradas de cobre, soldadas entre si em suas extremidades, e chapas de zinco de igual disposição e dimensões. Estas chapas eram colocadas em caixas de madeira calafetadas e com sulcos de forma a se garantir que as mesmas ficassem em suas posições predeterminadas. A caixa era, então, enchida com uma solução de ácido diluído em água.

Em 1859, o físico francês Gastón Platé inventou a primeira bateria recarregável, a qual era baseada no princípio de chumbo e ácido, sistema utilizado até os dias de hoje. Desde a invenção de Platé as baterias (ou pilhas) se dividem em dois tipos: as primárias, que não podem ser recarregadas e as secundárias, que podem, dentro de certo limite de ciclos e segundo condições limites de temperatura e tensão, serem recarregadas.

Em 1899, o sueco Waldmar Jungner inventou a bateria de níquel-cádmio. Dois anos mais tarde, Thomas Alva Edison criou um projeto alternativo ao de Jungner, trocando o cádmio por ferro.

Em 1932, Schlecht e Ackermann inventaram a placa de pólo sinterizada, que aumentou significativamente a durabilidade e a corrente de descarga das baterias de chumbo-ácido.

Em 1947, Neumann tornou a bateria de níquel-cádmio semelhante à que conhecemos hoje, popularizando-a através da selagem completa.

Na década de 60, foram desenvolvidas pela empresa Union Carbide as pilhas alcalinas.

Na década de 70, surgiram as primeiras baterias chumbo-ácido reguladas à válvula.

Em 1990, teve início a comercialização da bateria de Níquel-Metal Hidreto (NiMH); em 1992, comercializada a bateria alcalina recarregável e, finalmente, em 1999, a comercialização da bateria de Lítio-Íon Polímero.

4.1.2 Energia específica

Mesmo com todo este desenvolvimento através dos anos, segundo Husain (2003), a bateria ainda possui uma energia específica baixa se comparada a outras formas de armazenamento de energia conhecidas, conforme o gráfico da figura 19 a seguir:

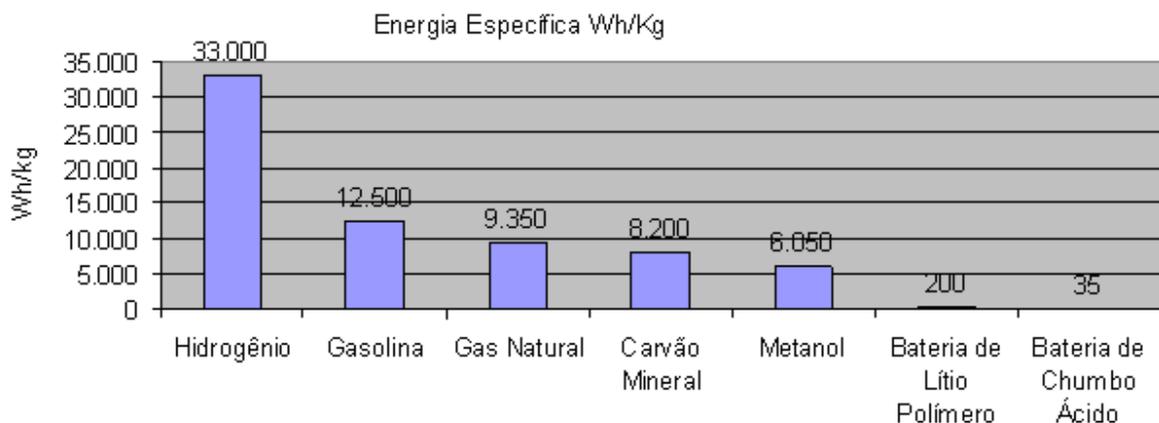


Figura 19: Energia específica de diversos tipos de armazenamento
Fonte: Dados da pesquisa.

Baseado no gráfico acima se pode definir, de uma maneira geral, que a bateria de tecnologia mais avançada comercialmente (lítio polímero) possui uma energia específica da ordem de 60 vezes menos do que a gasolina, que é o combustível mais utilizado atualmente para a propulsão automotiva mundialmente. Observa-se, entretanto, que no estudo de Husain, é contemplada a gasolina sem etanol. Isto implica que, para se ter a mesma energia contida em um litro de gasolina (gasolina sem etanol com densidade em torno de 0,75kg/l), deve se prever em torno de 47kg de bateria de lítio-polímero ou, ainda, 350kg de bateria de chumbo-ácido. Isto é, em parte, compensado pelo alto rendimento do veículo elétrico (da ordem de 80%) em

comparação ao veículo a motor de combustão (limitado pelo ciclo termodinâmico de Carnot, atualmente em torno de 20% para os veículos de produção).

4.2 Tipologia das Baterias

Pode-se classificar as baterias em dois grandes grupos:

Baterias Primárias e
Baterias Secundárias.

4.2.1 Baterias Primárias

As baterias primárias são aquelas que não podem ser carregadas, ou seja, o processo químico de geração de energia é irreversível. Um exemplo são as pilhas comuns (pilhas de zinco-carbono) e as pilhas alcalinas comuns, como mostrado na figura 20 a seguir (pilhas à base de material alcalino e manganês), disponíveis comercialmente em tensão de 1,5V e em diversos tamanhos (segundo ABNT e IEC nos tamanhos mais comuns AA, A, C, D etc.). Existem, porém, vários outros tipos de baterias primárias, muitas não fabricadas no Brasil, para aplicações especiais como a médica, a informática, espacial etc.



Figura 20: Pilhas comuns ou alcalinas são exemplos de baterias primárias
Fonte: Procter and Gamble

4.2.2 Baterias Secundárias

As baterias secundárias são aquelas que podem ser recarregadas em um determinado número de ciclos, observados diversos requisitos, dentre eles: tensão, temperatura e corrente de recarga. Podem-se citar como exemplo as baterias de automóvel (geralmente de chumbo-ácido), as baterias de computadores portáteis e de telefones celulares (estas duas últimas geralmente de níquel-hidreto metálico ou de lítio-íon), além das antigas pilhas de níquel-cádmio recarregáveis, como a mostrada na figura 21 a seguir.



Figura 21: Pilhas recarregáveis são exemplos de baterias secundárias
Fonte: Buchmann

Por ter um foco em baterias para tração automotiva, este estudo irá analisar as baterias secundárias.

4.2.2.1 Baterias de Eletrólito Livre

No grande grupo das baterias secundárias, pode-se fazer uma nova divisão, avaliada quanto ao tipo de eletrólito utilizado. Pode-se classificar as baterias, de uma maneira geral,

como eletrólito livre (tradução do termo inglês de origem, *wet*: úmido. Ou seja, indica que o eletrólito é livre e envolve as placas).

As baterias de chumbo-ácido de automóvel, também designadas comumente na literatura como bateria SLI (do inglês: *Starter-Lightning-Ignition* ou arranque, iluminação e ignição), é um exemplo de bateria de eletrólito livre, onde se tem o mesmo inundando as placas de chumbo e os separadores de antimônio. O eletrólito é formado por uma solução aquosa de ácido sulfúrico, e por isso, possui limitações quanto à posição de trabalho. As baterias de eletrólito livre possuem várias características que limitam a utilização deste tipo de bateria. Como limitações comuns, podem ser citadas a posição de operação, a emissão de gases inerentes aos processos de carga e descarga de energia e a necessidade de se completar, em intervalos periódicos, a fração aquosa do eletrólito perdida por evaporação (estas últimas bastante minimizadas com as tecnologias mais modernas).

4.2.2.2 Baterias de Eletrólito Retido

O outro tipo de classificação complementar ao citado no item anterior é o de eletrólito retido em que, mesmo líquido, o eletrólito fica retido em um tecido ou em um gel.

Uma evolução das baterias de chumbo-ácido que, conforme descrito no item anterior, é uma bateria de eletrólito livre, a bateria tipo AGM (do inglês: *Adsorbed Glass Mat* ou Manta de Fibra de Vidro Absorvente) é classificada como bateria de eletrólito retido, uma vez que este se situa entre as placas metálicas, sendo retido por uma fibra de vidro altamente absorvente, que pode possuir construção tradicional, ou seja, placas retangulares como nas chumbo-ácido ou enrolada em espiral, conforme demonstrado nas figuras 22 e 23 a seguir.



Figura 22: Bateria AGM de construção tradicional
Fonte: Robert Bosch Latin America



Figura 23: Bateria AGM (de construção espiral) em corte
Fonte: Exide Battery

As baterias de níquel-hidreto metálico, conhecidas pela sigla NiMH e as baterias de lítio-íon e lítio-polímero, conhecidas pelas siglas Li-íon e Li-P, respectivamente, também são exemplos de baterias de eletrólito retido, ou seja, não possuem o eletrólito líquido inundando as placas, de forma a possibilitar seu uso em qualquer posição. Um exemplo de bateria de lítio-polímero é mostrado na figura 24 a seguir.



Figura 24: Bateria de lítio polímero
Fonte: Thundersky Battery

4.3 Tipos de Baterias

4.3.1 Bateria de Chumbo-Ácido

Segundo Husain (2003), a bateria de chumbo ácido, inventada pelo francês Gastón Planté, em 1859, além de possuir tecnologia mais madura, pois é produzida desde a segunda metade do século XIX, é também a mais produzida do mundo, totalizando mais de 100 milhões de baterias fabricadas anualmente.

Partindo-se do princípio que cada um dos mais de 60 milhões de automóveis produzidos anualmente no mundo é equipado com uma bateria de chumbo-ácido nova e que a vida útil de uma bateria deste tipo é de aproximadamente três anos, tem-se uma produção de mais milhares baterias novas anuais para manter a frota circulante.

Ainda segundo Husain (2003), podem-se listar as vantagens que garantem a longa existência da bateria de chumbo-ácido:

- Custo relativamente baixo;
- Facilidade de obtenção de matérias primas (chumbo, enxofre);
- Facilidade de fabricação e
- Características eletroquímicas favoráveis ao armazenamento de energia.

Por se tratar de uma das tecnologias mais antigas e seguramente a mais madura e difusa, a partir da tecnologia de chumbo-ácido tem-se várias alternativas de construção de baterias que utilizam este conceito, conforme melhor descrito a seguir.

4.3.1.1 Bateria Chumbo-Ácido Tradicional

É basicamente a mesma bateria de chumbo-ácido inventada por Planté e vem sendo utilizada sem grandes modificações desde fins do século XIX. Consiste de uma caixa impermeável, onde são armazenadas as placas de chumbo e o eletrólito de ácido sulfúrico. Também é conhecida como bateria SLI (do inglês: *Starter, Lightning and Ignition* ou Partida, Iluminação e Ignição – tradução nossa). Uma bateria tradicional de chumbo-ácido é mostrada na figura 25 a seguir e se caracteriza, principalmente, pela existência de tampas para se completar a parcela de água perdida por evaporação do eletrólito.



Figura 25: Bateria de chumbo ácido tradicional
Fonte: Battery World

4.3.1.2 Bateria VRLA

A bateria VRLA, cujo significado vem do inglês: *Valve-Regulated Lead-Acid*, é basicamente a bateria chumbo-ácido SLI, também com o eletrólito inundando as placas, porém com caixa hermética e regulada por uma válvula de segurança, que não permite, no uso normal, a evaporação da porção aquosa do eletrólito, que implicaria a necessidade de se completar seu nível com água destilada. Atualmente, a maioria das baterias de automóvel em produção, as chamadas baterias sem manutenção, empregam a tecnologia VRLA, como ilustrado na figura 26 a seguir:



Figura 26: Bateria VRLA ou “livre de manutenção”
Fonte: Delphi Battery Products

4.3.1.1.1 Bateria AGM

No grupo das baterias VRLA, pode-se citar ainda o grupo das baterias AGM (do inglês: *Adsorbed Glass Mat*), cujo eletrólito, ainda que líquido, está retido por uma manta de fibra de vidro, não permitindo a inundação das placas. Neste tipo de bateria, o eletrólito continua entre as placas, que podem ser planas como na bateria SLI ou enroladas em espiral, como já explicado no item 3.2.2.2 e figuras 22 e 23.

4.3.1.1.2 Bateria de Gel

Alternativamente à bateria SLI, tem-se a bateria de gel, que se assemelha em muito à bateria AGM, diferindo apenas pela substituição da manta de fibra de vidro absorvente por uma substância gelificante à base de sílica, a fim de melhorar o desempenho do eletrólito. Nas baterias de gel normalmente se utilizam separadores de cálcio, ao invés de antimônio, entre as placas de chumbo. Devido a esta característica, as baterias de gel vêm sendo comumente chamadas de baterias de chumbo-cálcio. Uma bateria de gel é mostrada na figura 27 a seguir.



Figura 27: Bateria de gel
Fonte: Shenzhen Ritar Power Co.

4.3.2 Bateria de Níquel-Cádmio (NiCd)

A partir dos anos 1990, com o aumento da necessidade de portabilidade, aliada ao crescente aumento de consumo dos aparelhos eletrônicos, começou a surgir a necessidade de se ter baterias secundárias de capacidades de acumulação de energia cada vez maiores.

Segundo Buchmann. (2001), o primeiro tipo de bateria com estas características foi a bateria alcalina secundária, sendo rapidamente suplantada pela bateria de níquel-cádmio (NiCd). A bateria de níquel-cádmio, ainda que utilizada por mais de uma década, já nasceu com um problema latente: o impacto no meio ambiente, quando de seu descarte inadequado, devido à ação cumulativa do cádmio no organismo humano. O cádmio da bateria descartada inadequadamente pode contaminar os lençóis freáticos, vindo a se depositar no organismo humano, caso o homem beba da água contaminada ou consuma animais que também a consumiram. O risco do acúmulo de metais pesados no organismo humano, aliado ao desenvolvimento de novas tecnologias, praticamente inviabilizou a produção de baterias de níquel-cádmio. Outra desvantagem deste tipo de bateria é o chamado efeito memória, em que a bateria tende à formação de dendritos (cristais) no eletrólito quando recarregada antes de atingir sua descarga completa. Estes cristais diminuem a capacidade de armazenagem de energia da bateria, fazendo com que as mesmas se descarreguem antes do previsto, dando a impressão de que estavam comprometidas. A alternativa encontrada, principalmente quando

do aparecimento dos primeiros telefones celulares, foi a utilização de carregadores “inteligentes”. Uma bateria de níquel-cádmio é mostrada na figura 28 a seguir.



Figura 28: Bateria de níquel-cádmio
Fonte: JCI - Johnson Controls Inc.

4.3.3 Bateria de Níquel-Metal-Hidreto

A alternativa subsequente à bateria de níquel-cádmio foi a bateria de níquel-metal hidreto (NiMH). Esta bateria apresenta maiores valores de capacidade de armazenamento de energia que a de níquel-cádmio, além de não apresentar o problema do efeito memória, quando carregada de maneira correta utilizando-se de carregadores específicos, nem mesmo os inconvenientes de toxicidade do cádmio.

A bateria de NiMH foi a primeira bateria utilizada em larga escala após a de chumbo-ácido para aplicações tracionárias. Os primeiros veículos elétricos modernos de larga escala (EV1 General Motors, embora lançado com baterias de chumbo-ácido em 1997, passou à tecnologia de NiMH em 1999) dos anos 90 e os primeiros veículos híbridos da Toyota (Toyota Prius) e Honda (Honda Insight) utilizavam a tecnologia Ni-MH por sua alta capacidade de armazenamento de energia e pela maturação da tecnologia adquirida em equipamentos eletro-eletrônicos portáteis. Uma bateria de Ni-MH é mostrada na figura 29 a seguir, em formatos ABNT e IEC AA.



Figura 29: Bateria de níquel-metal-hidreto
Fonte: Matsushita Electric Industrial Co.

4.3.4 Baterias de Zinco-Ar

As baterias secundárias de zinco-ar têm um eletrodo positivo gasoso de oxigênio e um eletrodo de sacrifício de zinco metálico. A bateria de zinco, na prática, possui a recarga somente pela via mecânica, ou seja, pela troca do eletrodo sacrificado (oxidado) e seus resíduos por um eletrodo novo. O eletrodo sacrificado e os resíduos gerados, em sua maioria o eletrólito de hidróxido de potássio, são facilmente reciclados. De certa forma, pode-se dizer que a bateria de zinco-ar é uma célula de combustível onde este é o zinco metálico.

4.3.5 Baterias de Sódio-Metal-Cloreto

Segundo Buchmann. (2001), originalmente desenvolvida para aplicação militar, as baterias sódio-metal-cloreto, também denominadas de metal-cloreto apresentaram, principalmente na Europa, aplicações para tração como uma alternativa à bateria de chumbo-ácido, devido a sua elevada capacidade de armazenamento de energia e, sobretudo, por sua eficiência na carga e descarga. A bateria de sódio-metal-cloreto, segundo Husain (2003), é uma evolução da bateria de sódio-enxofre. Em ambas as baterias o eletrólito, que é sólido à temperatura ambiente, é aquecido a uma temperatura de 250 à 350°C para que a bateria funcione.

Dentre os tipos mais comuns estão o NaS (sódio-enxofre) e o Ni-NaCl₂, este último denominado comercialmente como bateria ZEBRA, devido a uma patente do sistema sendo

também mais adequada à denominação moderna de metal-cloreto, embora ambos os tipos sejam de sal fundido. As baterias de metal-cloreto apresentam o inconveniente da alta temperatura de operação, em geral, acima de 270°C, o que exige que a bateria seja ligada a uma fonte de carregamento, quando fora de uso, para impedir que o eletrólito se solidifique. Caso isso ocorra, deve ser feito o reaquecimento da bateria, fato que pode exigir de um a dois dias para que a bateria se carregue novamente. Este tipo de bateria ainda é amplamente utilizado em várias aplicações de veículos de tração puramente elétrica de alta taxa de utilização como, por exemplo, veículos de frota de empresas.

Muito embora este tipo de bateria apresente um processo de fabricação bastante complexo, é bastante seguro, mesmo com o inconveniente da alta temperatura, além de apresentar alta reciclabilidade, pois a bateria contém apenas níquel e cloreto de sódio em sua composição majoritária. Uma bateria de sódio-metal-cloreto é mostrada na figura 30 a seguir.



Figura 30: Bateria de sódio-metal-cloreto
Fonte: MES-DEA

4.3.6 Baterias de Lítio

Segundo Buchmann. (2001), as baterias de lítio são atualmente as mais promissoras para aplicação portátil. Possuem alta capacidade de armazenamento de energia, baixa toxicidade e não apresentam efeito memória. Trabalham a temperaturas não muito diferentes da temperatura ambiente e podem ser carregadas em pouco tempo. Segundo Husain, o lítio é o metal com maior potencial de redução (3,045V) e a menor massa atômica (6,94), sendo que sua pesquisa como eletrodo para baterias começou no início dos anos 70, mas a natureza reativa do lítio associada à umidade restringiu o seu uso com eletrólitos convencionais.

Entretanto, foi descoberto pela universidade de Oxford, no final da década de 70, que o lítio poderia ser intercalado ou absorvido pelo retículo cristalino de cobalto ou níquel, formando o LiCoO_2 ou LiNiO_2 .

O termo “bateria de lítio” representa uma numerosa família de subtipos, primários e secundários, dentre os quais podem-se citar, dentre as secundárias, segundo Buchmann. (2001):

4.3.6.1 Baterias de Lítio-Íon-Cobalto

São caracterizadas pela movimentação de íons de lítio entre o catodo e o anodo, geralmente através de um solvente orgânico. As primeiras baterias de íon-lítio foram comercializadas pela Sony, em 1991. Estas células utilizavam óxido de lítio e cobalto no catodo e um anodo de grafite. Atualmente, a Sony e a Sanyo são as empresas líderes na fabricação de baterias de lítio-íon para aplicações diversas. Existem ainda várias empresas de menor porte, japonesas, chinesas e sul-coreanas que produzem baterias na tecnologia lítio-íon-cobalto. Esta tecnologia, porém, não vem sendo utilizada em módulos de grande energia (acima de 1kWh) nem em aplicações automotivas de tração, pois o controle de carga e descarga é complexo e o risco de explosão devido à alta reatividade do catodo de cobalto é elevado.

4.3.6.2 Lítio-Íon-Manganês

A empresa sul-coreana LG, que é a terceira maior produtora de baterias de lítio-íon da atualidade, utiliza a tecnologia de catodo de manganês. Este tipo de bateria apresenta maior segurança quanto à explosão como principal vantagem em relação à de lítio-íon-cobalto. Como desvantagem pode-se citar uma pequena perda de densidade de energia desta em relação ao tipo anteriormente citado. Outras empresas que utilizam semelhante tecnologia são a NEC e a Samsung.

4.3.6.3 Lítio-Ion-(Fosfato de) Ferro (Magnésio)

Desenvolvida inicialmente pela Universidade do Texas, atualmente é produzida pela empresa Valence Technologies e empregada em veículos tipo patinete Segway. As baterias desta tecnologia, assim como as de lítio-íon-manganês, apresentam mais segurança contra explosão devido à baixa reatividade do catodo frente à tecnologia de lítio-íon-cobalto. Alguns fabricantes declaram utilizar outros materiais na composição do catodo além do ferro como, por exemplo, o magnésio.

Um modelo de bateria de lítio-íon -ferro é mostrado na figura 31 a seguir.



Figura 31: Baterias de lítio-íon ferro
Fonte: Centro Ricerche Fiat

4.3.6.4 Lítio-Íon-(Nano) Fosfato

Desenvolvida pela A123 Systems, empresa criada em 2001 para produzir, em escala, a bateria inicialmente criada pelo Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT), é uma das grandes promessas na área de baterias automotivas. Esta é uma empresa de capital de risco, mantida pelos investidores GE, Motorola, Qualcomm Procter&Gamble entre outros. Está prevista a utilização deste tipo de bateria no Chevrolet Volt e em ônibus híbridos e elétricos. Não existem ainda muitos dados sobre os resultados destas baterias, mas o fabricante declara uma potência em torno de 3000W/kg e uma durabilidade de 10 vezes mais ciclos que uma

bateria de lítio-íon convencional. Uma bateria de lítio-íon (nano) fosfato é mostrada na figura 32 a seguir.



Figura 32: Bateria de lítio-íon (nano) fosfato
Fonte: A123

4.3.6.5 Lítio-Ion-Óxido de Titânio (LTO – Lithium Titanium Oxide)

Altairnano, uma empresa norte-americana, desenvolveu uma bateria em que o nano óxido de titânio substitui o grafite, no anodo. Embora a capacidade anunciada seja a metade da energia das células convencionais de lítio-íon, a empresa anuncia uma vida de 20.000 ciclos e 20 anos, com temperaturas de operação variando entre -50°C e 75°C , sem riscos de explosão uma vez que é eliminado o grafite da bateria. O fabricante também divulga através de seu site que, embora a energia específica não supere aquela da bateria de lítio-polímero, a potência específica é bem elevada, chegando a valores de até a 4kW/kg .

A empresa Enerdel (associação da empresa Ener1 e Delphi) também desenvolve baterias com a tecnologia LTO e ambas declaram um tempo menor de recarga se comparado às baterias convencionais. Uma bateria de lítio-íon-óxido de titânio é apresentada na figura 33 a seguir.

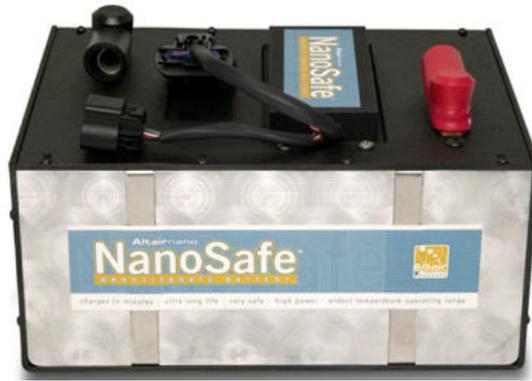


Figura 33: Bateria de lítio-íon-óxido de titânio
Fonte: Altair Nano

4.3.6.6 Lítio Polímero

É uma evolução das baterias de lítio-íon, em que o trânsito de íons é feito através de um polímero sólido, geralmente óxido de polietileno ou o poliacrilonitrila, que substitui o eletrólito de lítio-sal diluído em um solvente. Geralmente abreviadas como Li-poly, Li-Pol, LiPo, LiP, PLI ou LiP, estas baterias são mais resistentes e possuem um custo de produção mais baixo.

Segundo Husain (2003), as baterias de lítio-polímero são consideradas baterias de estado sólido, pois o eletrólito não se apresenta mais como líquido. O mais promissor eletrólito para este tipo de bateria é o óxido de vanádio, V_6O_{13} .

Ainda segundo Husain (2003), as baterias de lítio-polímero apresentam potencial para alcançar a mais alta energia e potência específicas, pois os polímeros sólidos, substituindo os eletrólitos de líquidos inflamáveis presentes em outros tipos de baterias, podem conduzir os íons a temperaturas acima de 60°C . O uso do polímero sólido apresenta também uma grande vantagem de segurança no caso de acidentes envolvendo veículos elétricos e híbridos. Devido à apresentação do lítio na forma iônica ao invés da forma metálica, seu poder de reatividade fica reduzido. A bateria de lítio-polímero também tem a vantagem de ser fabricada em vários formatos e tamanhos, de maneira a ocupar mais eficientemente os espaços disponíveis no veículo, além de possuir uma boa vida útil. A maior desvantagem das baterias de lítio-polímero é sua sensibilidade à temperatura pois, conforme Husain (2003), estas operam até a faixa de 80 a 120°C .

Pode-se citar o fabricante sul-coreano Kokam como um dos produtores de maior sucesso nesta tecnologia.

Uma bateria de lítio-polímero é mostrada na figura 34 a seguir.



Figura 34: Bateria de lítio polímero
Fonte: Kokam Battery

4.4 Energia Armazenada na Bateria

Segundo Husain (2003), a energia teórica (E_t) de uma bateria é medida em termos de sua capacidade Q , em *Amperes-hora* (Ah), e de sua tensão de descarga, em Volts, (V_{bat}).

$$E_t = V_{bat} \times Q_{total} \quad (1)$$

O resultado deste produto é expresso em Wh . Assim, uma bateria de automóvel tradicional de, por exemplo, $12V$ e $100Ah$ possui uma energia teórica (E_t) de:

$$E_t = 12V \times 100Ah = 1200Wh \quad (2)$$

Estes valores, porém, são meramente indicativos, uma vez que são baseados na tensão nominal da bateria, que é definida como a tensão média entre o início e o fim do procedimento de descarga, e também na capacidade determinada segundo um ensaio, onde a corrente da bateria é mantida constante.

A corrente de descarga pode variar muito de um tipo de bateria para outro, pois podem ter sido utilizados métodos de medição diferentes. As correntes de descarga são medidas em taxas de C definidas por:

$$C = \frac{I_{desc}}{Q_{total}} \quad (3)$$

Onde Q_{total} é a capacidade da bateria, em Ah , e I_{desc} é a corrente de descarga do teste.

As baterias de chumbo-ácido automotivas são, segundo as normas mais comuns como, por exemplo, a NBR 6581, descarregadas em $C/20$ (ou $0,05C$), o que equivale a dizer que o processo de descarga segundo a norma utilizada para medir a capacidade desta bateria dura 20 horas. Como a corrente do teste deve ser mantida constante, o valor da capacidade da bateria, por exemplo, $100Ah$ é multiplicado pela taxa C ($C/20 = 0,05C$). Ou seja, a corrente de teste será de 5A. Desta forma, baseando-se na norma NBR 6581, pode-se dizer que uma bateria de chumbo-ácido automotiva de $100Ah$ é capaz de fornecer 5A ($100/20$), durante 20 horas, com uma tensão média em torno de 12V, que é a tensão nominal da bateria.

Se essa mesma bateria fosse submetida a uma descarga mais intensa como, por exemplo, 10A, sua taxa seria de $C/10$ (ou $0,1C$) e a energia total entregue pode sofrer uma queda. Neste caso, não se pode afirmar que esta mesma bateria poderia fornecer 10A durante 10 horas.

A lei de Peukert, apresentada pelo cientista alemão W. Peukert em 1897, relaciona a queda de capacidade (ou energia total) ao aumento da corrente de descarga em baterias de chumbo-ácido. À medida que a corrente de descarga aumenta, a capacidade da bateria diminui, segundo a equação:

$$t = H \left(\frac{Q_{total}}{I \times H} \right)^k \quad (4)$$

Onde:

H : tempo de descarga, em horas, do teste em que se obteve a capacidade nominal da bateria

Q_{total} : capacidade nominal da bateria, em Ah , segundo um teste de descarga constante, à H horas

t : tempo de descarga na situação real em horas

I : corrente de descarga na situação real em Amperes

k : constante de Peukert (adimensional)

Em geral, a constante de Peukert para as baterias de chumbo-ácido varia entre 1,1 e 1,3 e pode ser determinada através de duas descargas completas da bateria à mesma temperatura de referência.

Nas baterias de tração para uso automotivo é fundamental conhecer a energia disponível para movimentação do veículo e, embora a equação de Peukert forneça valores fundamentais para os cálculos de autonomia, esta lei vale somente para as baterias de chumbo-ácido, onde o gráfico de descarga da bateria segue o padrão exponencial da equação de Peukert, como mostrado na figura 35 a seguir:

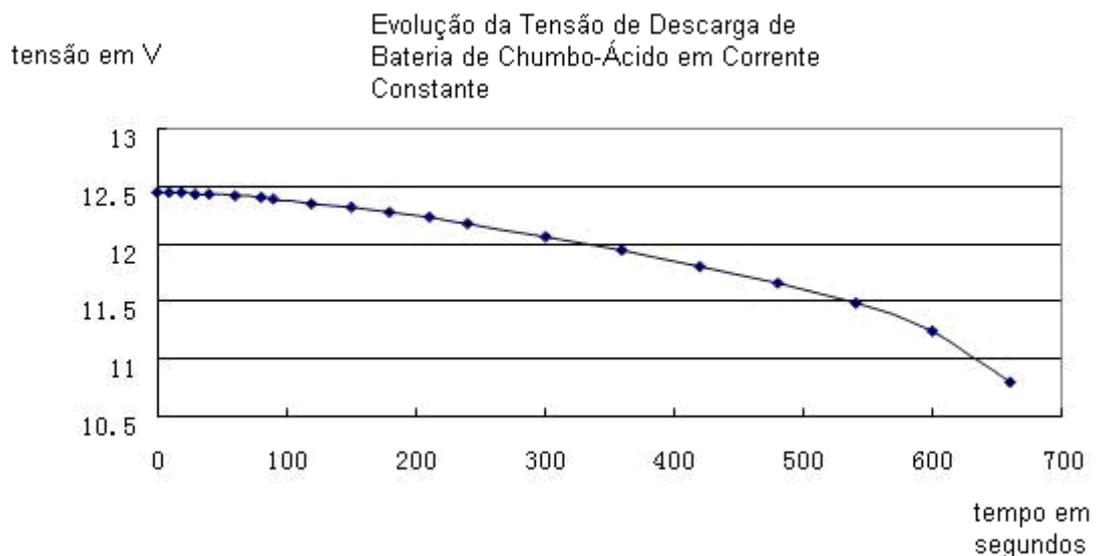


Figura 35: Gráfico de descarga de uma bateria de chumbo-ácido em corrente constante
Fonte: Fiat Automoveis S.A.

Já para as baterias de lítio-íon, por exemplo, o gráfico de descarga segue um padrão diverso do chumbo-ácido como se pode verificar na figura 36 a seguir:

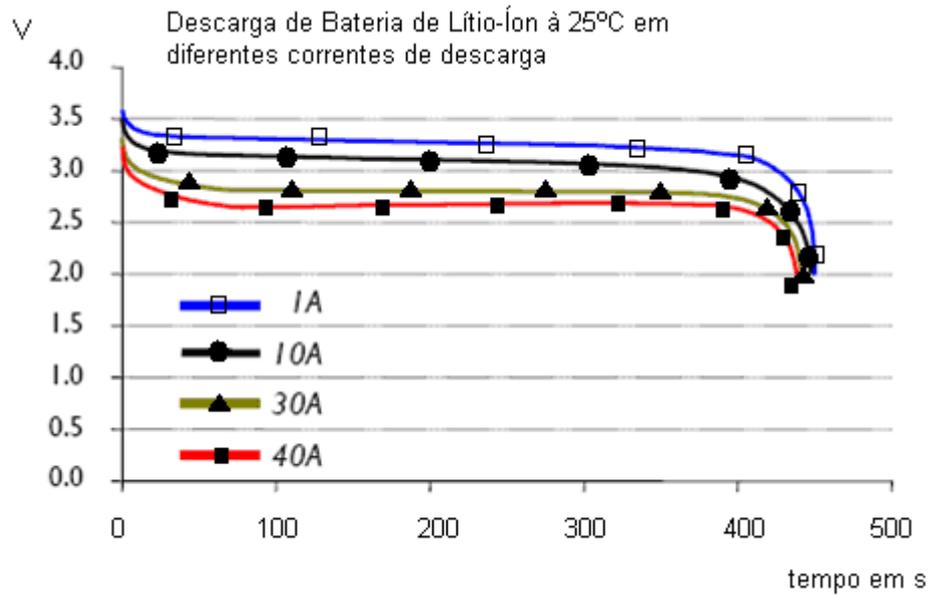


Figura 36: Gráfico de descarga - tensão vs. tempo para baterias de lítio-íon em diferentes correntes de descarga
Fonte: Thundersky Battery

Quando não se é conhecido o gráfico de descarga de determinada bateria, torna-se necessário realizar alguns ensaios para se determinar a energia prática das baterias, ou seja, a energia utilizável para que um veículo seja colocado em movimento.

Segundo Husain (2003) a energia prática da bateria (E_p) pode ser definida por:

$$E_p = \int_{t=0}^{t=corte} (V \times i) dt \quad (5)$$

Onde

V : tensão nominal da bateria

i : corrente de descarga

t_0 : tempo inicial no qual a bateria se encontra completamente carregada

t_{corte} : tempo final no qual a bateria se encontra completamente descarregada

Como tanto na utilização real como nos ciclos de simulação de consumo de energia para veículos encontramos várias situações de fornecimento de corrente variável, a energia total pode ser calculada pelo somatório das “n” integrais de energia prática à corrente constante acima mencionada.

$$E_p total = \sum_{n=1}^{\infty} E_p \quad (6)$$

Uma visão geral sobre a energia específica das tecnologias de baterias mais utilizadas pode ser vista na figura 37 a seguir.

Os dados para construção do gráfico da figura 37 foram obtidos de consultas às fichas técnicas de fabricantes de bateria, os quais podem ser mais bem visualizados no quadro 1, a seguir, que também apresenta os valores de energia prática para cada bateria.

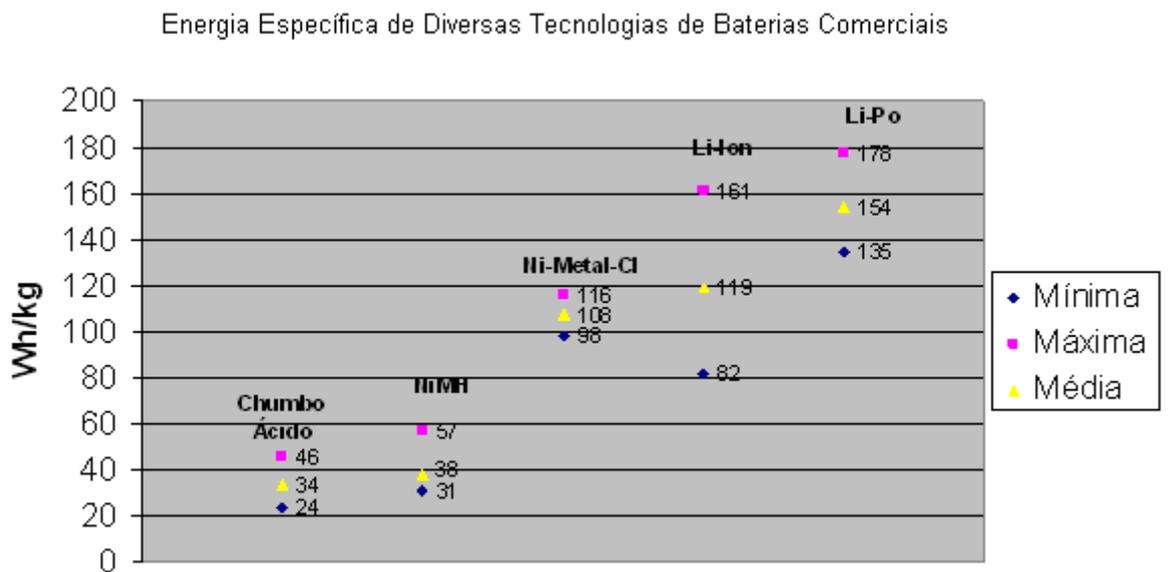


Figura 37: Energia específica de diversas tecnologias de baterias
Fonte: Dados da Pesquisa.

Fabricante	Código	Tecnologia	Tensão Nominal	Energia Prática	Energia específica
			[V]	[kWh]	[Wh/kg]
Kokam	SLPB 160460330	Li-Po	3,7	0,888	178
Kokam	SLPB 140460330	Li-Po	3,7	0,74	167
Ultralife	UBP053048/PCM	Li-Ion	3,7	0,003	161
Kokam	SLPB 90216216	Li-Po	3,7	0,148	158
Ultralife	UBBL10	Li-Ion	16,5	0,224	156
Kokam	SLPB 160460330H	Li-Po	3,7	0,74	141
Duracell Battery Biz	B5770	Li-Po	18	0,076	138
Kokam	SLPB 80460330	Li-Po	3,7	0,37	135
Ultralife	UBBL12	Li-Ion	15,2	0,106	125
Zebra	Z5278ML3X-76	Sodio-Metal-Cloreto	278	21,128	116
Duracell Battery Biz	B5760	Li-Ion	18	0,173	114
Saft	VLE 22-42	Li-Ion	21,6	0,907	113
Saft	VLE 11-84	Li-Ion	10,8	0,907	113
Zebra	Z21310ML8X-50	Sodio-Metal-Cloreto	310	15,5	109
A123	ANR26650	Li-Ion	3,3	0,008	108
Modenergy	RKU 100 V56 C180	Li-Ion	56	10,08	104
Thundersky	TS-LFP160AHA	Li-Ion	3,6	0,576	103
Saft	VL30P	Li-Ion	3,6	0,108	98
Zebra	Z5278ML3X-64	Sodio-Metal-Cloreto	278	17,792	98
Saft	VL34P	Li-Ion	43,2	1,361	85
Modenergy	RKU 100 V40 C060	Li-Ion	40	2,4	82
AltairNano	Nanosafe	(NanoTitanato) Li-Ion	13,8	1,214	71
Cobasys	Series 9500	NiMH	12	1,032	57
Absorbed Power	GT12-200C (20h)	Chumbo Ácido - AGM	13,8	2,788	46
Cobasys	Series 1000	NiMH	12	0,106	44
Absorbed Power	GT12-65C (20h)	Chumbo Ácido - AGM	13,8	0,911	40
Energys	G70EP	Chumbo Ácido - AGM	12	0,852	35
Energys	16LMS-725	Chumbo Ácido	48	34,8	35
Optima	34/78	Chumbo Ácido - Spiracell	12	0,6	34
Power Battery	MC150	Chumbo Ácido - AGM	12	1,536	32
Energys	G13EP	Chumbo Ácido - AGM	12	0,156	32
Absorbed Power	GT12-200C (1h)	Chumbo Ácido - AGM	13,8	1,904	31
Cobasys	42V pack	NiMH	36	0,612	31
Power Battery	MC90	Chumbo Ácido - AGM	12	0,82	30
Power Battery	MCG150	Chumbo Ácido - GEL	12	1,411	29
Power Battery	MCG90	Chumbo Ácido - GEL	12	0,797	29
Absorbed Power	GT12-65C (1h)	Chumbo Ácido - AGM	13,8	0,552	24

Quadro 1: Energia prática e energia específica de diversas baterias comerciais

Fonte: Dados da Pesquisa.

4.5 Recarga das Baterias

Os sistemas de reposição da energia das baterias ou conjunto de baterias podem ser divididos em cinco tipos, a saber:

4.5.1 Recarga Lenta

Segundo Buchmann. (2001), a recarga lenta, também conhecida como recarga noturna, ou recarga normal (tradução nossa) aplica uma taxa de recarga da ordem de $0,1C$ (ou um décimo da capacidade nominal da bateria) durante todo o período em que a bateria permanece conectada ao carregador. É o tipo de recarga mais econômico, uma vez que a potência empregada é baixa, visto que para a recarga de uma bateria de um veículo elétrico tradicional, é suficiente a potência de uma tomada doméstica.

4.5.2 Recarga Rápida

Ainda segundo Buchmann. (2001), durante a recarga rápida os valores de corrente de recarga estão próximos aos da capacidade de descarga da bateria, ou seja, $1C$. Entretanto, têm sido observadas algumas experiências bem sucedidas até $10C$. O fabricante Thundersky (2009) recomenda em seu manual uma corrente de recarga rápida de até $3C$. Nestes casos, o tempo de recarga típico para um veículo elétrico é entre uma e duas horas. Cabe lembrar que o aumento da taxa de recarga C implica um aumento da corrente de recarga, o que implica, ainda, cabos de maior seção e maior potência do ponto de abastecimento, muitas vezes não condizentes com os de uma residência.

4.5.3 Troca Rápida da Bateria

Na troca rápida, a bateria descarregada é substituída por outra carregada mediante um dispositivo automático ou com a intervenção de um operador ou do próprio motorista. Embora não exista uma solução comercial em utilização, a empresa Betterplace (2009) divulga em seu site que o tempo de troca típico será inferior ao de um abastecimento com gasolina⁴, estimado em torno de 5 minutos.

4.5.4 Recarga em Movimento

A recarga em movimento, prevista para estradas automatizadas, é feita sem a necessidade de se parar o veículo ou de se trocar a bateria. Assim, em uma viagem sobre uma rodovia com a infra-estrutura adequada, o veículo deve ser dirigido em uma faixa de rolagem específica, onde um barramento transfere energia ao veículo, por indução ou por contato, em uma taxa maior do que aquela gasta pelo veículo.

4.6 Síntese

As baterias de NiMH foram as mais utilizadas em 2008 para a aplicação em veículos híbridos principalmente, devido a sua segurança já consolidada, e o seu custo já bastante amortizado. São utilizadas principalmente pelos fabricantes japoneses de larga escala, como Honda e Toyota, começando a surgir, também, alguns fabricantes coreanos.

A bateria de sódio-metal-cloreto é bastante utilizada em veículos elétricos na Europa e começa a ser utilizada no Brasil em função de sua segurança, da capacidade de

⁴ The Better Place battery switch stations are designed to allow drivers on a long trip to switch a depleted battery for one with a full charge, in less time than it takes to fill a tank with gasoline

armazenamento e de sua reciclabilidade. É utilizada pequena escala principalmente na conversão de automóveis à combustão interna em automóveis elétricos, incluídos os grandes fabricantes de veículos que mantêm, em sua gama de produtos, algumas versões de veículos elétricos.

As baterias de lítio já estão sendo utilizadas, em pequena série, na construção de veículos de demonstração, devido a sua maior capacidade de armazenamento de energia (energia específica) surgindo, assim, como uma grande promessa para o futuro da propulsão de veículos elétricos e híbridos, em especial aqueles que se utilizam da nanotecnologia para obtenção de menores tempos de recarga e maior vida útil. Tem-se optado pelas tecnologias isentas de cobalto ou pelas tecnologias de lítio-polímero para a aplicação automotiva devido às questões de segurança.

5 DINÂMICA DO VEÍCULO ELÉTRICO

Por mais de um século, a dinâmica veicular vem sendo estudada baseando-se, principalmente, no modelo de automóvel equipado com motor de combustão interna (ou ICEVs, do inglês *Intern Combustion Engine Vehicles*). O veículo elétrico geralmente atinge velocidades inferiores e como tem menor energia armazenada nas baterias em relação aquela armazenada nos tanques de combustível dos veículos à combustão, têm que aproveitar de maneira bem mais eficiente esta energia para se atingir níveis satisfatórios de autonomia. Esta análise de dinâmica servirá para se identificar a contribuição de cada uma das forças resistivas no consumo do veículo elétrico.

5.1 Motores à Combustão Interna

Os primeiros automóveis movidos a motor de combustão interna (MCI) surgiram no final do século XIX e se tornaram comuns nas paisagens no início do século XX, devido à produção seriada em massa. O MCI converte a energia química, presente no combustível (gasolina, etanol, gás natural, diesel etc.), em energia mecânica, que é utilizada para acionar as rodas do veículo. Segundo Oliveira (2005), o MCI pode operar em diversas condições. Porém, existe um ponto ótimo de operação em que o MCI apresenta a maior eficiência e emite menos gases poluentes, conforme a figura 38 a seguir:

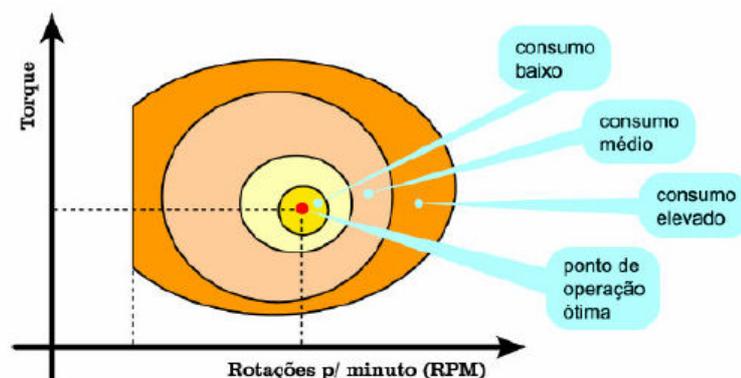


Figura 38: Mapa de consumo esquemático de um MCI
Fonte: OLIVEIRA, Eude

Quando o MCI está em operação, é necessário haver várias combinações de velocidade e torque, para que o mesmo opere próximo à condição de maior eficiência, melhorando, assim, a conversão da energia química do combustível e, conseqüentemente, emitindo menos poluentes. Essas combinações são proporcionadas pela transmissão de múltiplas velocidades (p.Ex.: mecânica, automatizada, automática ou continuamente variável) e pelo acoplamento destas com o motor (p.Ex.: embreagem ou conversor de torque que apresentam em regime transiente algum deslizamento).

O MCI apresenta como característica de funcionamento, intrínseca ao seu ciclo termodinâmico, um limite inferior de velocidade angular (ou rotação) que o impede de funcionar abaixo deste limite (sempre um pouco abaixo da rotação de marcha-lenta especificada pelo manual do veículo). Essa limitação faz com que o motor consuma energia para manter o limite mínimo de rotação de funcionamento mesmo quando não é solicitada uma demanda de energia para a movimentação do veículo como, por exemplo, quando o veículo encontra-se parado por ocasião de um semáforo fechado. Algumas soluções como sistemas de desligamento do MCI nestas condições já estão em produção na Europa, principalmente para motores pequenos, de até quatro cilindros. Estes sistemas são conhecidos como micro-híbridos ou *stop&start*. Para motores maiores, de seis e oito cilindros, já existem sistemas que desligam automaticamente alguns dos cilindros nas condições acima mencionadas, dentre outras.

5.2 Motores Elétricos

Nos motores elétricos (ME), o limite mínimo de rotação de funcionamento não existe, pois, dependendo de seu tipo de construção (que será visto mais adiante), são capazes de fornecer torque mesmo à rotação nula. Esta condição pode eliminar a necessidade da transmissão de múltiplas velocidades ou reduzi-la a um número menor de velocidades em comparação com uma transmissão para MCI. Caso seja eliminada a transmissão de múltiplas velocidades, pode-se também eliminar o acoplamento entre o motor e transmissão, que permite a seleção das múltiplas velocidades (embreagem).

Segundo Oliveira (2005), uma comparação entre o torque fornecido às rodas em função da velocidade do veículo, para os veículos equipados com MCI e ME, pode ser vista na figura 39 a seguir:

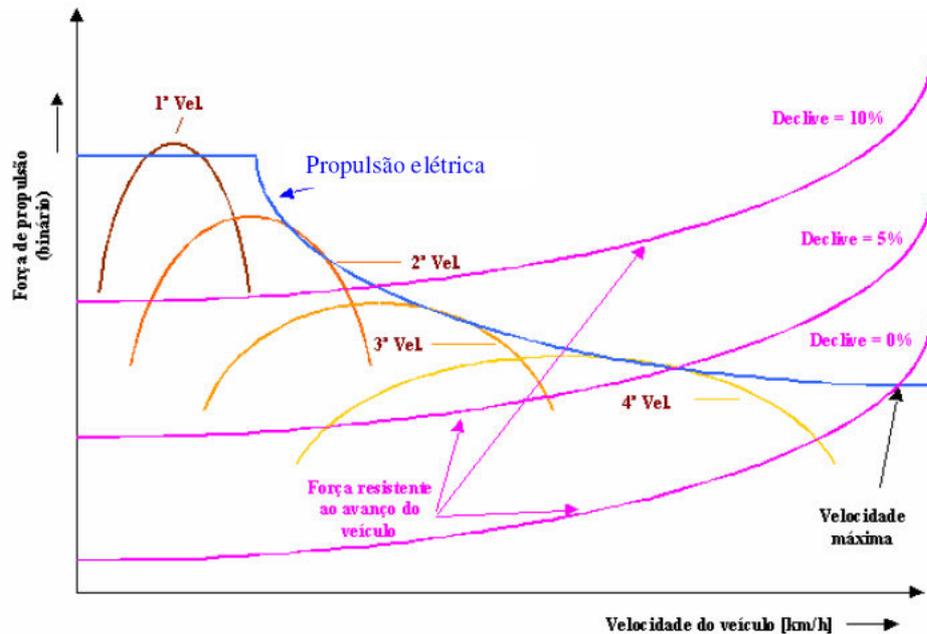


Figura 39: Força de propulsão e força resistente em função da velocidade
Fonte: OLIVEIRA, Eude

Devido a esta e outras características do motor elétrico, segundo Barreto (1983), os EV apresentam como vantagens principais:

Maior eficiência energética que um veículo convencional: em função da maior eficiência de transformação da energia elétrica, armazenada nas baterias sob a forma de energia química, em energia mecânica, em comparação com o MCI. Neste, a energia química armazenada no combustível, deve passar por um processo termodinâmico para prover energia mecânica às rodas. Além disso, os EV só consomem energia quando em movimento, já que no ME a energia é transformada de maneira mais adequada à característica de funcionamento urbano do automóvel, sem a limitação de rotação mínima de funcionamento presente no MCI.

Manutenção menos frequente e mais simplificada: Como as temperaturas dos sistemas de transformação de energia do EV são baixas, ocorre menor degradação dos elementos de atrito, lubrificação e vedação, além da grande simplificação no número de peças

móveis e da inexistência de movimentos alternativos, que podem induzir vibrações no sistema. Em um motor elétrico de corrente alternada, a manutenção preventiva se resume à troca dos rolamentos do induzido, o que ocorre após 100.000km.

Não emitem poluentes: As transformações de energia no EV não emitem subprodutos como nos MCI. Esta vantagem se presta principalmente aos grandes centros urbanos, onde mesmo os veículos com MCI pouco poluentes e/ou aqueles movidos a combustíveis com geração de carbono neutra como, por exemplo, o etanol de cana de açúcar, gera poluentes gasosos nocivos próximos à população. Deve-se salientar que a bateria do VE deve ser corretamente reciclada ao término da sua vida útil, a fim de se evitar a poluição por descarte inadequado.

Segundo Oliveira (2005) e Barreto (1986), como desvantagens podem-se citar:

Autonomia reduzida e alto tempo de recarga: Como a energia específica, em Wh/kg, de uma bateria moderna é da ordem de 60 vezes inferior à da gasolina, para se atingir uma autonomia comparável ao automóvel tradicional, a massa das baterias torna-se inviável tecnicamente, além de seu elevado custo de produção. Esta é a principal razão pela qual o foco dos veículos elétricos sejam os centros urbanos, sendo que para percursos extra-urbanos torna-se necessário algum tipo de hibridização da propulsão elétrica com algum combustível, tendo-se em vista atingir autonomies mais elevadas.

Elevado Custo: O custo do kWh instalado em um veículo elétrico gira em torno de US\$2.500,00 (R\$ 5.000,00), o que torna o valor de venda de um carro elétrico no Brasil, com autonomia em torno de 10 km, cerca de R\$ 100.000,00 a mais em relação ao veículo original. Um veículo Fiat Palio Weekend Elétrico, com 18kWh, possui preço de R\$ 145.000,00, ao passo que o mesmo veículo em versão *Flex* custa em torno de R\$ 45.000,00. Soma-se a isto o fato de que o veículo *Flex* recolhe imposto sobre produtos industrializados na alíquota de 0,1% enquanto o veículo elétrico recolhe o mesmo imposto na alíquota de 25% (agosto de 2009).

5.3 Desempenho de um Veículo Elétrico

Segundo Matos (2006), o desempenho de um automóvel pode ser medido levando-se em conta os seguintes parâmetros:

- Velocidade máxima – é a velocidade máxima que o veículo é capaz de atingir em determinadas condições (estrada plana ao nível do mar, entre outras) e está relacionada à potência máxima desenvolvida pelo motor e à resistência aerodinâmica apresentada pelo veículo;
- Acelerações a partir do repouso – medida pelo tempo gasto para se atingir uma determinada velocidade (p.Ex.: 100km/h) ou uma determinada distância (400m, 1000m) e está relacionada ao peso do veículo e à curva torque do motor;
- Retomadas de velocidade – medida pelo tempo gasto para se atingir uma determinada velocidade partindo-se de uma velocidade inferior e sem a utilização de troca de marchas (p.Ex.: retomada de 40km/h a 100km/h em quarta marcha). É uma medida que está relacionada à capacidade de um veículo em realizar ultrapassagens e depende da relação de câmbio utilizada e do andamento da curva de torque do motor;
- Capacidade de superar rampas em movimento – é a máxima rampa que o veículo pode superar estando já em movimento, ou seja, com o veículo em primeira marcha, o condutor parte de um trecho plano e entra na rampa com o veículo a uma determinada velocidade. Este parâmetro está ligado à relação de transmissão utilizada e ao valor de torque máximo desenvolvido pelo motor;
- Capacidade de arrancada em rampa – é a capacidade que o veículo possui de arrancar (partir do repouso) em um aclive com a utilização da embreagem. Está relacionada ao torque máximo fornecido pelo motor e à capacidade de transmissão de torque pela embreagem. Depende, ainda, da inércia de translação do veículo e das inércias dos elementos que giram, tais como: transmissão, pneus e rodas.

Como a energia armazenada em mais de 47kg de baterias modernas equivale apenas àquela presente em um litro de gasolina, o uso desta energia deve ser bem determinado a fim de se garantir uma autonomia adequada ao veículo elétrico. Um veículo com desempenho mais contido e adequado ao trânsito urbano maximiza a transformação da energia elétrica em movimento, uma vez que as forças resistivas aumentam com velocidade. Como premissas de

projeto de um veículo elétrico urbano, podem-se prever desempenhos mais adequados à condução urbana que um veículo à combustão.

As velocidades máximas permitidas nos grandes centros brasileiros oscilam de 60 a 90km/h, com raras exceções. Um veículo elétrico voltado para uso urbano, com velocidade máxima superior à recomendada por lei, pode contribuir para a redução de sua autonomia de maneira sensível. Quanto à aceleração, que nos veículos com motor à combustão é normalmente medida em segundos (tempo que o veículo necessita para sair da imobilidade e atingir os cem quilômetros por hora), no caso dos veículos elétricos é geralmente adotada a aceleração de zero a sessenta quilômetros por hora. Para acompanhar o trânsito urbano das grandes cidades brasileiras, uma aceleração de 0-60km/h entre 12 a 15 segundos é adequada. Outro fator importante de desempenho para um veículo elétrico é sua capacidade de superar rampas a partir da imobilidade e também em movimento. O veículo pode ser projetado para superar, a partir da imobilidade, rampas de até 13 graus de inclinação (em torno de 23% de inclinação).

5.4 Dinâmica do Movimento do Veículo Elétrico

Ainda segundo Matos (2006), o movimento de um automóvel é regido por uma série de forças que governam a forma como ele se desloca. Para o estudo proposto são consideradas as forças atuantes que, dentro do que pode ser chamado de dinâmica longitudinal, regem o seu movimento em linha reta.

O movimento longitudinal de um automóvel, obedecendo às leis clássicas da física, é regido por uma equação do tipo:

$$R = m \times a \quad (7)$$

Onde R é a resultante das forças atuantes, m é a massa do veículo (ou a medida de sua inércia) e a sua aceleração.

Segundo Nicolazzi (2004), para o correto entendimento dos mecanismos envolvidos no estudo da dinâmica longitudinal, devem-se considerar os seguintes elementos:

- Forças atuantes – podem ser divididas entre forças motrizes (motor e peso, no caso de um declive) e forças de resistência ao movimento (resistência aerodinâmica, resistência ao rolamento e peso em caso de aclave). Neste estudo, estas forças serão representadas por momentos gerados no eixo da embreagem;
- Inércias – representadas pela própria massa do automóvel, relacionada à sua inércia de translação, e por aquelas relacionadas à inércia de rotação dos diversos órgãos mecânicos envolvidos no processo;
- Perdas – são consideradas as perdas por atrito no sistema de transmissão, resultantes do movimento das engrenagens da caixa de câmbio.

5.4.1 Momento do Motor

A principal função do motor de um veículo é gerar potência e torque que, transmitidos às rodas, possibilitam o movimento do veículo. Esta geração de potência e torque pode ser caracterizada por uma curva em função da rotação do motor em condição de máxima abertura de borboleta, ou seja, os valores máximos obtidos para cada rotação.

Normalmente as unidades utilizadas nestas curvas são: potência (P) em cavalos (CV), torque (M) em quilograma-força vezes metro (kgf.m) e rotação (n) em giros por minuto (rpm).

Os valores de potência, torque e rotação se relacionam segundo a seguinte equação:

$$M_{[kgfm]} = \frac{P_{[CV]} \cdot 716,2}{n_{[rpm]}} \quad (8)$$

Para ilustrar o comportamento da potência e do torque com a rotação, na figura 40 é apresentada a curva de potência de um motor elétrico.

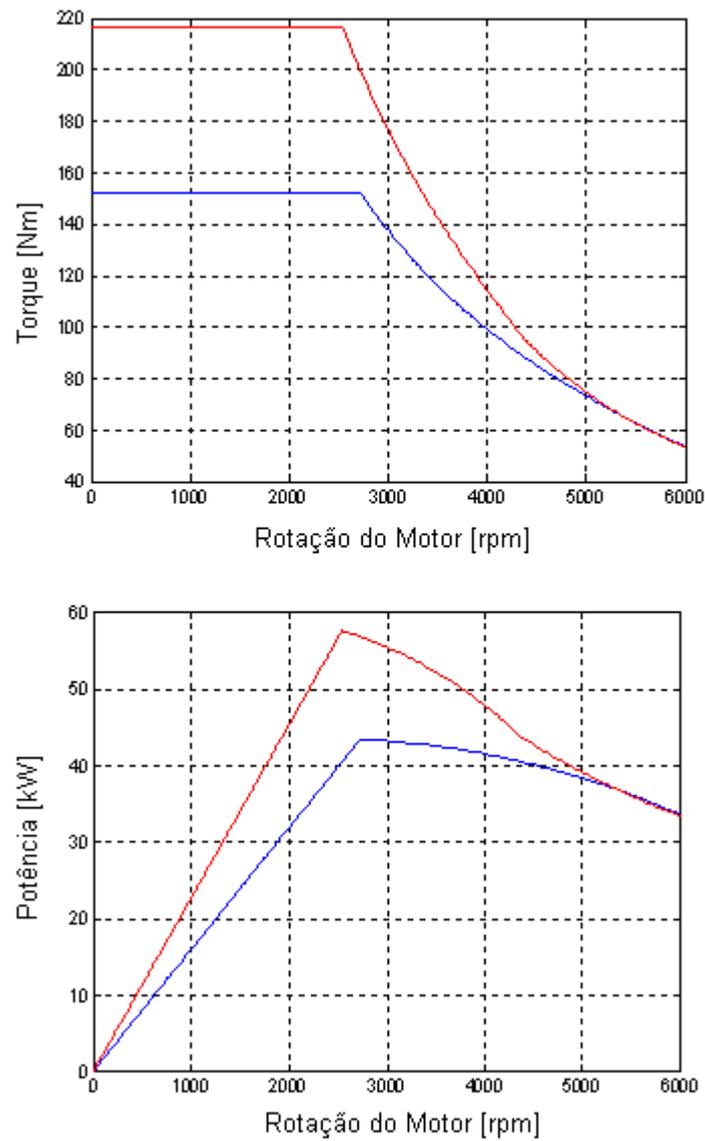


Figura 40: Curva característica de potência e torque de um motor elétrico
 Fonte: FIAT Automóveis S.A.

5.4.2 Força Devida ao Aclive ou Declive

Segundo Matos (2005), no caso de o veículo se encontrar em uma rampa, o aclive (ou declive) gera uma resistência (ou assistência) ao movimento do veículo. Esta força (ou momento) é gerada pela componente do peso do veículo paralela ao solo.

Assim, a força correspondente à componente do peso (G) na direção do movimento do veículo é:

$$G_x = G \cdot \text{sen} \alpha \quad (9)$$

Onde α representa o ângulo da rampa em relação ao horizonte, conforme mostrado na figura 41 a seguir:

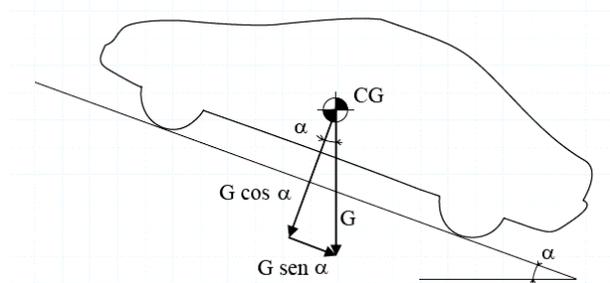


Figura 41: Representação das forças atuantes de um veículo em rampa

Fonte: NICOLAZZI, Lauro

Em função da massa do veículo (m) e da aceleração da gravidade (g), pode-se representar esta força da seguinte forma:

$$G_x = m \cdot g \cdot \text{sen} \alpha \quad (10)$$

5.4.3 Força de Resistência ao Rolamento

De acordo com Nicolazzi (2004), a força de resistência ao rolamento é resultado das perdas no contato dos pneus com a pista. Esta força (Q_r) pode ser determinada empiricamente pela expressão:

$$Q_r = f \cdot G \cdot \cos \alpha \quad (11)$$

ou,

$$Q_r = f \cdot m \cdot g \cdot \cos \alpha \quad (12)$$

Sendo:

f : coeficiente de atrito de rolamento

G : peso do veículo

g : aceleração da gravidade ($9,81\text{m/s}^2$),

α : ângulo da rampa.

Ainda conforme Nicolazzi (2004), verifica-se que o coeficiente de atrito de rolamento varia, além de outros fatores menores, de acordo com a velocidade desenvolvida pelo veículo, com a pressão de inflagem, com a carga radial nos pneus, com o tipo de piso e com a temperatura.

Uma curva característica de variação do coeficiente de atrito ao rolamento com a velocidade, para diferentes pressões de inflagem dos pneus, é mostrada na figura 53. Nota-se que, a partir de uma determinada velocidade, o coeficiente de atrito de rolamento cresce numa taxa mais acentuada.

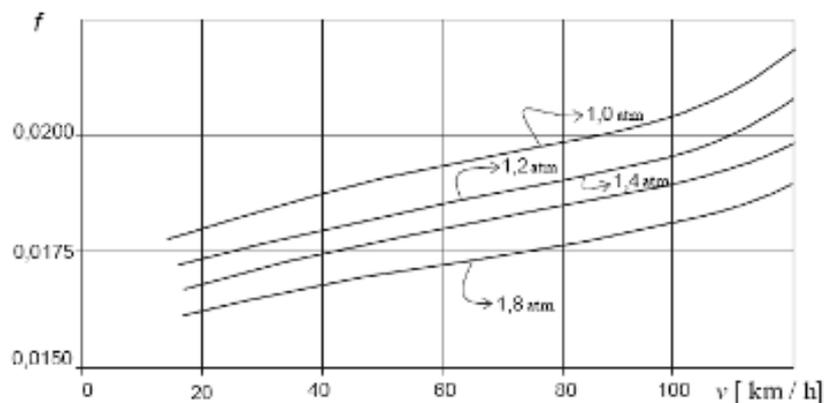


Figura 41: Variação do coeficiente de atrito de rolamento com a pressão, para um pneu diagonal
Fonte: NICOLAZZI, Lauro

Para pneus de série e em condições normais de utilização, propõe uma orientação para a determinação do coeficiente de atrito ao rolamento, dada por:

$$f = a + b \left(\frac{v}{100} \right)^2 \quad (13)$$

Onde v é a velocidade do veículo em km/h e os coeficientes a e b são dados pela tabela 5 (Alguns autores não utilizam o denominador 100 sob o valor da velocidade, porém o valor de b é diferente e deve-se utilizar o valor de b adequado para a referida equação). Vale salientar que esses coeficientes devem ser determinados experimentalmente para cada tipo de pneu, já que aqueles apresentados na tabela 10 são para um tipo específico de carcaça.

Tabela 5: Coeficientes a e b para determinação do coeficiente de atrito ao rolamento

	<i>a</i>	<i>b</i>
Pneus normais	0,0150	0,0520
Pneus de alta histerese	0,0258	0,0520

5.4.4 Força de Resistência Aerodinâmica

Conforme Nicolazzi (2004), o efeito aerodinâmico em um veículo atua de três formas distintas:

- Criando uma força na direção vertical, denominada de força de sustentação;
- Criando uma força transversal à direção do movimento, denominada de efeito de ventos laterais;
- Criando uma força na direção axial do veículo, conhecida como arraste ou resistência aerodinâmica.

Para o estudo da dinâmica longitudinal aqui desenvolvido, é considerado apenas o efeito de arraste ou resistência aerodinâmica.

Este arraste provém de três fontes distintas:

- Resistência de forma – devida ao turbilhonamento do ar com o descolamento da camada limite e que causa uma turbulência prejudicial ao movimento;
- Resistência de atrito – devida à viscosidade do ar em contato com a superfície externa do veículo. Este efeito é praticamente desprezível para os veículos atuais, se comparado aos outros efeitos;
- Resistência por correntes de ar – ocorre devido à penetração do ar no interior da carroceria para refrigeração, alimentação e ventilação do habitáculo. Este efeito provém da necessidade de desacelerar o ar na entrada e acelerá-lo novamente na saída de um determinado ambiente.

Uma comparação das diversas causas para resistência aerodinâmica em veículo é demonstrada na tabela 6, a seguir:

Tabela 6: Contribuição para a resistência aerodinâmica

Forma	55%
Tomadas de ar para motor e habitáculo	8%
Frisos, calhas, antenas, faróis,...	29%
Parte inferior do veículo	8%

Fonte: NICOLAZZI, 2004.

A eficiência aerodinâmica de um veículo pode ser resumida em dois fatores:

- C_x – coeficiente de penetração aerodinâmica, que está relacionado à forma do veículo. Este coeficiente é obtido experimentalmente por meio de testes em túnel de vento, como mostrado na figura 42, ou como mais recentemente, com a utilização de métodos numéricos em *softwares* de simulação fluidodinâmica.

Valores típicos de C_x para automóveis estão entre 0,28 (esportivos) e 0,38 (conversíveis).

- S_f – área frontal do veículo, que é a área projetada do veículo na direção do movimento. Valores típicos de área frontal estão entre 1,8m² (veículos compactos) e 2,8m² (furgões).

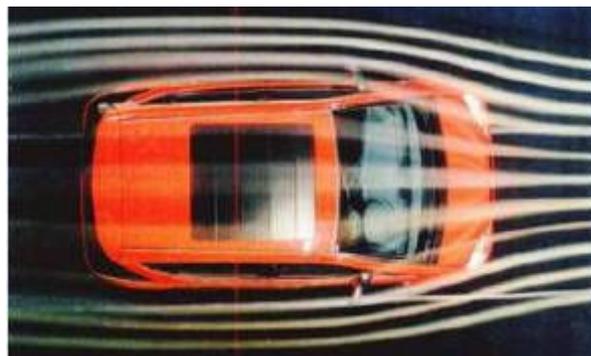


Figura 42 – Veículo submetido a teste em túnel de vento.

Fonte: MATOS, Paulo

De acordo com Nicolazzi (2004), o valor da resistência aerodinâmica pode ser determinado pela seguinte expressão:

$$Q_a = \frac{1}{2} \rho \cdot v^2 C_x \cdot S_f \quad (14)$$

Sendo:

Q_a : força de resistência aerodinâmica

ρ : densidade do ar

v : velocidade do veículo

C_x : coeficiente de penetração aerodinâmica

S_f : área frontal do veículo

Vale salientar que essa equação é um modelo matemático empírico onde, em um ensaio do veículo em um túnel de vento, como mostrado na figura 42, é medida a força de resistência aerodinâmica. Sendo assim, o coeficiente de penetração aerodinâmico é a incógnita do problema. As demais grandezas, tais como a área da seção transversal e a velocidade do fluxo, são determinadas facilmente.

5.4.5 Resistência Mecânica

Como citado por Nicolazzi (2004), a potência líquida gerada pelo motor, o que se pode chamar de cadeia cinemática, até as rodas, como a mostrada na figura 43, sofre algumas perdas devido ao atrito mecânico dos mecanismos de transmissão. Dentre estas perdas podem-se citar aquelas que ocorrem na caixa de câmbio, nas juntas de transmissão (homocinética e tripóide) e no conjunto de diferencial.

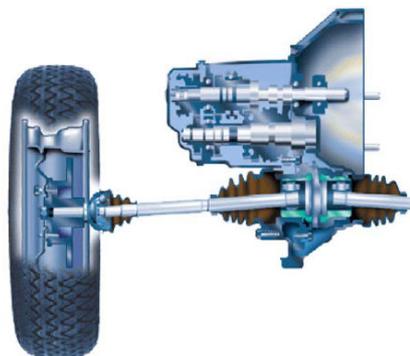


Figura 43: Conjunto de transmissão – caixa de câmbio, diferencial, juntas e eixos
Fonte: Fiat Automóveis S.A. – Treinamento de Pós Venda

Uma maneira simplificada de representar essas perdas é considerar um rendimento da transmissão. Assim, a potência líquida entregue às rodas pode ser obtida por:

$$P_p = P \cdot \eta_m . \quad (15)$$

Sendo:

P : potência líquida fornecida pelo motor

P_p : potência entregue às rodas

η_m : rendimento mecânico da transmissão

O rendimento mecânico da transmissão está associado às perdas devido à movimentação do óleo lubrificante dentro da caixa de transmissão e ao atrito entre as partes em contato.

Em geral, Nicolazzi (2004), indica valores de rendimento da transmissão da ordem de 84% a 93%, dependendo da solução construtiva adotada.

Num balanço de momentos, podem-se representar estas perdas como um coeficiente multiplicativo das forças de resistência que ocorrem depois da transmissão. Como resultado, as forças de resistência ao avanço do veículo devem ser multiplicadas por um coeficiente para se obter o valor correspondente no eixo da embreagem, o qual é dado pelo inverso do valor do rendimento ($1/\eta_m$).

5.4.6 Inércias

Segundo Matos (2006), partindo-se do conceito de inércia como sendo a tendência que um corpo possui de manter-se no estado de repouso ou movimento em que se encontra, podem-se relacionar quatro grupos de inércia presentes no veículo:

- Inércia do motor – relacionada às massas dos seus componentes internos que possuem movimento quando do seu funcionamento. No caso de um motor elétrico esta inércia é dada pela inércia do induzido, que é a única parte móvel do motor elétrico, ao passo que no motor a combustão tem-se pistões (movimento de translação), árvore do virabrequim (rotação), eixo de comando de válvulas (rotação) e volante do motor (rotação).

- Inércia da transmissão – representada pela massa em rotação dos eixos e engrenagens presentes na caixa de câmbio e no diferencial.
- Inércia das rodas e pneus – relacionada à massa em rotação do conjunto rodas, pneus e correlatos como discos de freio, parafusos, pesos de roda etc. Pode variar dependendo do tipo de roda utilizado (em chapa ou em liga) e do pneu.
- Inércia de translação do veículo – devido à sua massa que deve ser colocada em movimento (ou freada).

Alguns valores de referência para inércia rodas e pneus são apresentados na tabela 7.

Tabela 7: Valores de referência para inércia de conjuntos pneu/roda .

Medida	Raio de rolamento (mm)	Inércia (kg.m ²)
145/80 R13	273	2,139
175/70 R13	280	2,443
175/65 R14	280	2,443
185/60 R14	280	2,443
195/55 R15	289	3,061
175/70 R14	292	2,963
195/60 R15	302	3,178
205/60 R15	304	3,335
185/60 R15	305	3,365
215/55 R16	312	3,561
205/70 R15	320	3,728
205/75 R15	345	3,728
255/75 R15	387	3,728

Fonte: FIAT Automóveis S.A

6 IMPACTOS DA INSERÇÃO DO VEÍCULO ELÉTRICO NO BRASIL E PROPOSTAS PARA AUMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.

Com base na revisão bibliográfica realizada, serão analisados neste capítulo os impactos da inserção do veículo elétrico no Brasil, levando-se em conta o crescimento da frota de veículos elétricos e a disponibilidade de energia elétrica, o consumo e o fornecimento de matérias primas para a fabricação de baterias e formulando propostas para aumentar a eficiência energética do veículo.

6.1 Viabilidade Energética

Os veículos automotores, quer sejam à combustão interna (ICEVs do inglês Internal Combustion Engine Vehicle), híbridos (HEVs do inglês Hybrid Electric Vehicle) ou elétricos (EVs do inglês Electric Vehicles) não podem ser analisados quanto ao seu impacto no meio ambiente sem se considerar a origem da(s) energia(s) necessária(s) ao seu funcionamento. É necessário conhecer o caminho percorrido pela energia a ser utilizada para a movimentação destes veículos, desde a sua geração até à sua chegada ao consumidor final. Do mesmo modo, a frota de veículos deve ser adequada à oferta de energia, para não se correr o risco de sobrecarregar o sistema elétrico nacional e também poder utilizar a energia residual das baterias para se reduzir os impactos dos picos de consumo nos horários de ponta. Propõe-se, desta forma, um estudo sobre a matriz energética brasileira sob a ótica da utilização do veículo elétrico como meio de transporte individual, analisando-se o impacto da implantação de uma frota regular de veículos elétricos no sistema energético nacional .

6.1.1 Emissões de Dióxido de Carbono (CO₂) por kWh de Energia Elétrica Gerada no Brasil e nos Estados Unidos

Segundo o estudo Carbon Dioxide Emissions from the Generation of Electric Power in the United States (2000), a emissão de dióxido de carbono (CO₂) em grama por quilowatt-hora gerado pelos diversos tipos de combustível fóssil é representado pela tabela 8 a seguir:

Tabela 8: Emissão de dióxido de carbono em gramas por kWh de energia elétrica gerada pela natureza do combustível –

Carvão Mineral	951,13g
Derivados de Petróleo	893,92g
Gás Natural	599,73g

Fonte: Carbon Dioxide Emissions from the Generation of Electric Power in the United States 2000

Segundo o balanço energético nacional, da geração total de energia elétrica do ano de 2007 (444,6TWh), o quantitativo proveniente de geração térmica fóssil, ou seja, geração termelétrica a partir de derivados líquidos de petróleo, gás e carvão mineral totalizaram 54,6TWh, distribuídos conforme a tabela 9 a seguir:

Tabela 9: Geração de energia por fonte térmica Brasil 2007 – Fonte: BEN 2008

Carvão Mineral	5,8TWh
Derivados de Petróleo	838,2TWh
Gás Natural	10,6TWh

Pode-se dizer que para o total de energia elétrica gerada em 2007, houve uma contribuição de $4,6 \times 10^9$ toneladas de CO₂. Dividindo-se pela energia total consumida em 2007, tem-se um valor de 103,5g de CO₂ por kWh de energia total consumida no Brasil, em média.

Comparando-se estes dados, pode se dizer que a média norte americana de emissão de gás carbônico na atmosfera foi de 608,8g de CO₂ por kWh de energia elétrica gerada ou, no mínimo, 5 vezes mais emissora de CO₂ por kWh de energia elétrica gerada que a matriz elétrica brasileira.

Considerando-se a utilização de um veículo elétrico, esta proporção influencia diretamente na quantidade de emissões por quilômetro rodado, uma vez que a energia elétrica teve parte de sua geração por fonte térmica, que gerou emissão de dióxido de carbono.

Levando-se em conta estes dados, pode-se dizer que um veículo elétrico abastecido nos Estados Unidos apresenta um nível de emissões de dióxido de carbono semelhante a um

veículo à combustão, para a mesma distância percorrida. Ao passo que um veículo elétrico abastecido no Brasil, apresenta um nível de emissões bastante reduzido, conforme mostra a figura a seguir:

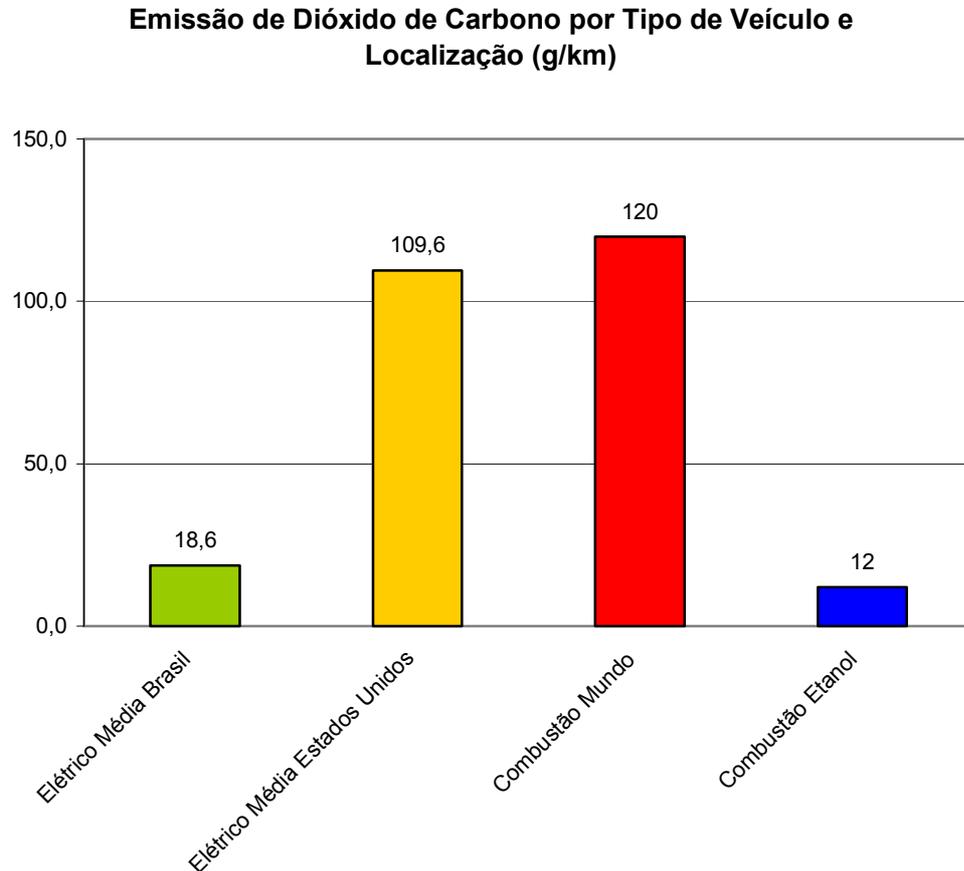


Figura 44: Emissões médias de veículos pequenos em gramas de dióxido de carbono por km, considerando-se a origem da energia

Nota-se que a emissão de dióxido de carbono do veículo elétrico abastecido no Brasil é, em média, bem menos poluente que o mesmo veículo abastecido nos Estados Unidos, aproximando-se do veículo a etanol, quando considerado o ciclo completo deste combustível como redutor de até 90% de emissões de dióxido de carbono, segundo a ÚNICA (2009). Este fato é explicável porque a energia utilizada no Brasil tem uma baixa participação de energia de origem termelétrica, geradora de emissões de dióxido de carbono. Um potencial de redução ao nível zero das emissões do veículo elétrico no Brasil é o seu abastecimento durante o período de carga leve do sistema elétrico (madrugada), que utilizaria somente a energia da parcela hidrelétrica gerada, sem a necessidade da geração termelétrica e a conseqüente

emissão de dióxido de carbono. Salienta-se ainda que a emissão de outros tipos de poluentes está presente quando da utilização do motor de combustão à gasolina e também a etanol, que causam danos à saúde. 6.1.2 Previsão para aumento da frota de veículos elétricos

Segundo a PricewaterhouseCoopers (2009), a evolução na demanda global de propulsores para veículos elétricos, apresenta uma tendência de crescimento que vai chegar até meio por cento da produção global de veículos em 2015, conforme tabela 10 a seguir:

Tabela 10: Evolução da demanda global de powertrain.

	2009	2010	2015
Veículos Elétricos	5.882	39.695	415.257
Total de Veículos	55.612.114	61.312.205	82.437.512
Participação VE (%)	0.01%	0.06%	0.50%

Fonte: PricewaterhouseCoopers

Segundo o Sindipeças (2009) a frota de automóveis no Brasil é de aproximadamente 22,2 milhões de automóveis. Se numa hipótese remota o Brasil seguisse a tendência da tabela acima e à partir de 2015 tivesse 0,5% de sua produção composta por veículos elétricos, teríamos uma frota circulante de aproximadamente 110 mil veículos elétricos até 2025, considerando-se uma taxa de saída de serviço de 1% ao ano, por acidentes e por furto para desmontagem e com uma vida útil do veículo em torno de 15 à 20 anos.

6.1.3 Oportunidades para o abastecimento de veículos elétricos: horários de ociosidade do sistema elétrico

A disponibilidade de energia quer seja ela fóssil, elétrica, nuclear, hidráulica ou outra, é fator fundamental para o desenvolvimento econômico de qualquer país. A utilização consciente e planejada da energia tem merecido atenção redobrada, tendo em vista que é um recurso em geral, finito, sendo que seu aproveitamento econômico gera impactos ao meio ambiente. Um planejamento adequado para a implantação de uma frota de veículos elétricos é necessária principalmente para se construir modelos de recarga que possuam o maior

aproveitamento das oportunidades e o mínimo impacto num sistema elétrico tão particular como o brasileiro.

Dentre as oportunidades pode-se citar o carregamento dos veículos elétricos na carga leve, ou seja, nos períodos do dia onde não há grande demanda. Pode-se ainda usufruir de uma parcela da energia que é vertida pelas hidrelétricas em determinados períodos do dia e determinadas épocas do ano, em especial no período chuvoso.

Este aproveitamento para o uso automotivo da energia que seria vertida sem a geração de energia elétrica, vai deixar de fazer com que um equivalente de energia seja produzido através da combustão de combustíveis, reduzindo-se assim as emissões gasosas causadas por veículos automotores.

Outro aspecto a se considerar é que o período onde a energia afluenta é maior, ou seja, no período chuvoso, coincide em parte com a entressafra da cana de açúcar, matéria prima do etanol.

6.1.3.1 Oportunidade segundo o balanço energético nacional

O Balanço Energético Nacional (2008) traz a diferença entre a oferta e o consumo de energia elétrica no país. Nos anos de 2006 e 2007 a oferta de energia elétrica foi, respectivamente, de 460,5 e 483,4TWh, equivalentes a uma parcela hidrelétrica de, aproximadamente, 381 e 400TWh (considerando-se de 82,8% de participação hidrelétrica segundo a figura 1: origem hídrica 72,6%; importações de Itaipu 8,5% e pequenas centrais hidrelétricas 1,7%), contra um consumo total, no mesmo período, de 390 e 412,1TWh respectivamente. Observa-se também, na tabela 11 a seguir, uma diferença entre oferta e consumo de 9TWh em 2006 e 12TWh em 2007, respectivamente.

Tabela 11: Oferta interna de energia elétrica e consumo interno de energia elétrica por setor Brasil 2007

	Unidade	2006	2007	% 07/06
Oferta Interna de Energia Elétrica – OIEE	TWh	460,5	483,4	5,0
Geração de Energia Elétrica ¹	TWh	419,3	444,6	6,0
Centrais Elétricas de Serviço Público	TWh	377,6	397,4	5,2
Centrais Hidroelétricas	TWh	335,8	359,3	7,0
Centrais Termoelétricas ²	TWh	41,9	38,2	-8,8
Centrais de Fonte Nuclear	TWh	13,8	12,3	-10,2
Centrais a Gás Natural	TWh	13,0	10,6	-18,6
Centrais a Carvão Mineral	TWh	6,5	5,8	-10,7
Centrais Elétricas Autoprodutoras	TWh	41,7	47,1	13,1
Importação Líquida	TWh	41,4	40,9	-1,4
Consumo Final	TWh	390,0	412,1	5,7
Consumo Residencial	TWh	85,8	90,9	5,9
Consumo Comercial	TWh	55,2	58,5	6,0
Consumo Industrial	TWh	183,4	192,6	5,0
Consumo em Outros Setores	TWh	65,5	70,1	7,0
Perdas sobre a OIEE	%	15,3	14,7	-3,7
Capacidade Instalada das Centrais de Geração de Energia Elétrica ¹	GW	96,6	100,4	3,9%

1 Centrais Elétricas de Serviço Público e Autoprodutoras.

2 Centrais Termoelétricas inclui centrais termoelétricas a partir da fonte nuclear.

Fonte: BEN, 2008.

Esta diferença entre a oferta e o consumo de energia elétrica, é mantida como uma margem de segurança no intuito de ser utilizada em casos aumento do consumo devido ao aumento da produção industrial, aumento do consumo doméstico e diminuição dos volumes dos reservatórios devido a períodos muito longos de estiagens, dentre outros. Comparando-se somente a geração hidrelétrica e o consumo interno total e realizando-se o cálculo, tem-se uma margem negativa de 2,3% para 2006, e 2,9% para 2007. Ou seja, o total ofertado por geração hidrelétrica foi inferior ao consumo total, sendo necessária a utilização de outras fontes de energia, como a termonuclear, a termelétrica, a eólica e a solar, dentre outras, para abastecer o mercado consumidor interno. Baseando-se apenas nestes dados não se pode afirmar que existe oportunidade de abastecimento para veículos elétricos a partir de fontes hidrelétricas no Brasil.

6.1.3.2 Oportunidade segundo as séries históricas do operador nacional do sistema elétrico

A partir da série histórica do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), tem-se energia natural afluyente do SIN, que é a energia afluyente devido a um sistema de reservatórios, calculada a partir da energia produzível pela vazão natural afluyente aos reservatórios, a 65% de seus volumes úteis operativos, conforme mostrado na figura a seguir:

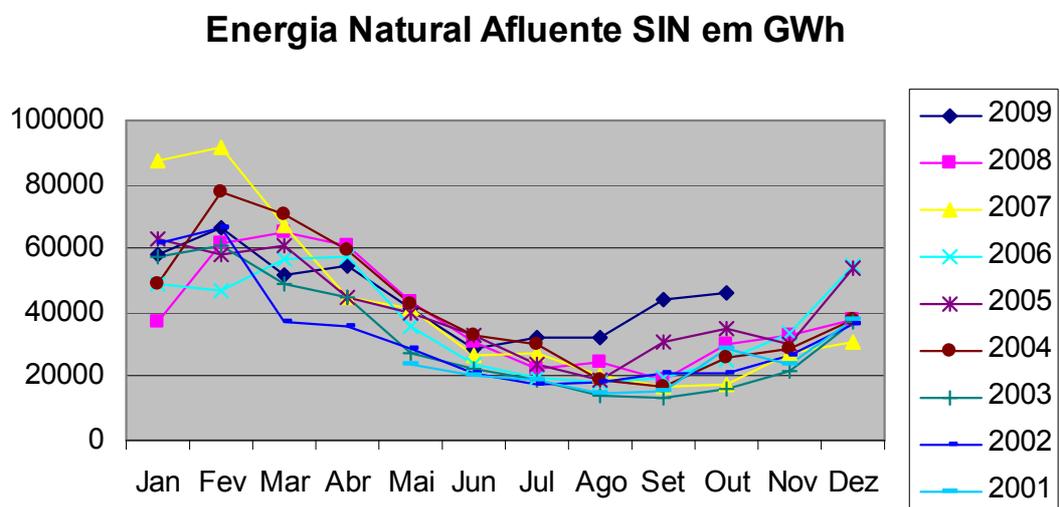


Figura 45: Energia Natural Afluyente do SIN entre maio de 2001 e outubro de 2009 em GWh mensais
Fonte: ONS.

Pode-se notar que a energia natural afluyente do SIN apresenta picos em janeiro e fevereiro (período chuvoso) e vales em julho agosto e setembro (período seco). Segundo a série histórica, o menor valor da energia natural afluyente mensal ocorreu em setembro de 2003, com o valor de 13.002GWh.

Para regularizar o fornecimento de energia elétrica a partir da energia natural afluyente, parte desta é acumulada nos reservatórios durante os meses do período chuvoso, para utilização no período seco. Esta acumulação ocorre até um determinado limite de segurança dos reservatórios, sendo que ultrapassado este limite ou a critério do ONS (para adequações entre reservatórios de um mesmo sistema, solicitações de demanda variáveis segundo o horário do dia e a estação do ano e manutenções, dentre outros), a usina hidrelétrica deixa

passar parte da energia natural afluyente sem a geração de energia elétrica. É a chamada energia vertida turbinável.

Dessa forma, como a energia natural afluyente pode ser transformada em energia elétrica através da geração, ser armazenada aumentando-se o nível dos reservatórios ou, ainda, ser vertida sem gerar energia, relacionam-se estas grandezas na seguinte equação:

$$E_{nafl} = E_{ger} + \Delta E_{res} + E_{vert} \quad (16)$$

Onde:

E_{nafl} : Energia Natural Afluyente

E_{ger} : Energia Elétrica Gerada

ΔE_{res} : parcela destinada a aumentar ou diminuir a energia armazenada nos reservatórios

E_{vert} : Energia Vertida Turbinável

Analisando-se também a série histórica do Operador Nacional do Sistema Elétrico a partir dos dados de maio de 2001 a outubro de 2009, tem-se a geração hidráulica em GWh mensais e também a energia armazenada nos reservatórios (em GWh), mostradas nos gráficos das figuras 46 e 47 a seguir:

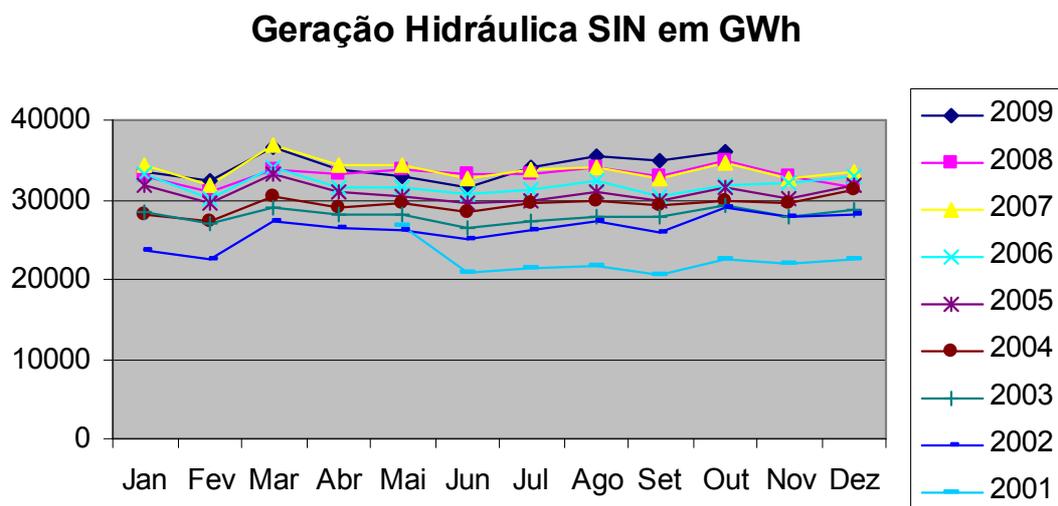


Figura 46: Geração hidráulica do sistema interligado nacional entre maio de 2001 e outubro de 2009 em GWh mensais.

Fonte: ONS

Nota-se, a partir da figura 47, que a geração hidráulica mensal no Brasil apresenta um crescimento contínuo ano a ano, sendo que teve seu valor máximo em março de 2007, com 36.912GWh, segundo a série histórica do ONS.

Energia Armazenada SIN em GWh

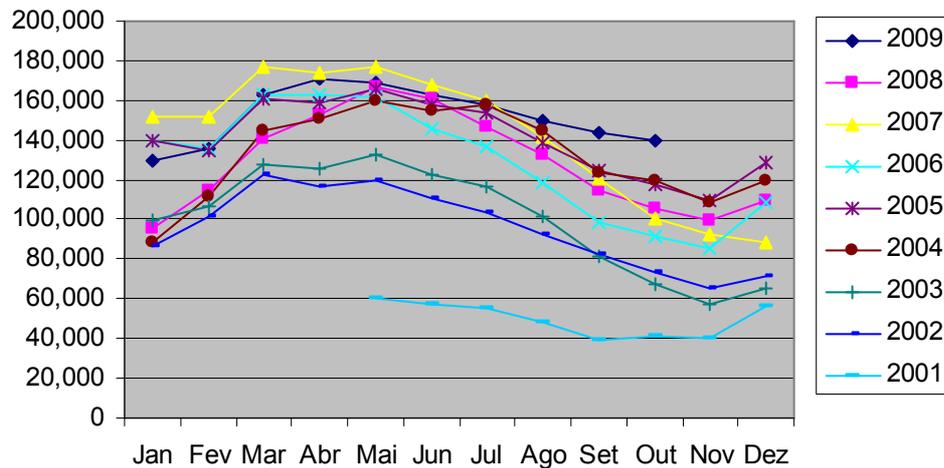


Figura 47: Energia armazenada do sistema interligado nacional entre maio de 2001 e outubro de 2009 em GWh mensais.

Fonte: ONS

Analisando-se a figura 47, nota-se que o valor histórico mínimo da energia armazenada, excetuando-se no ano de 2001, ocorreu sempre no mês de novembro. Este valor no mês de menor energia armazenada, nunca foi inferior a 39.000GWh. Aplicando-se a equação (16), ou seja, subtraindo-se da energia natural afluyente os valores da energia gerada e da energia utilizada para aumentar o volume dos reservatórios, tem-se a energia vertida turbinável anual, representada no gráfico da figura 48 a seguir:

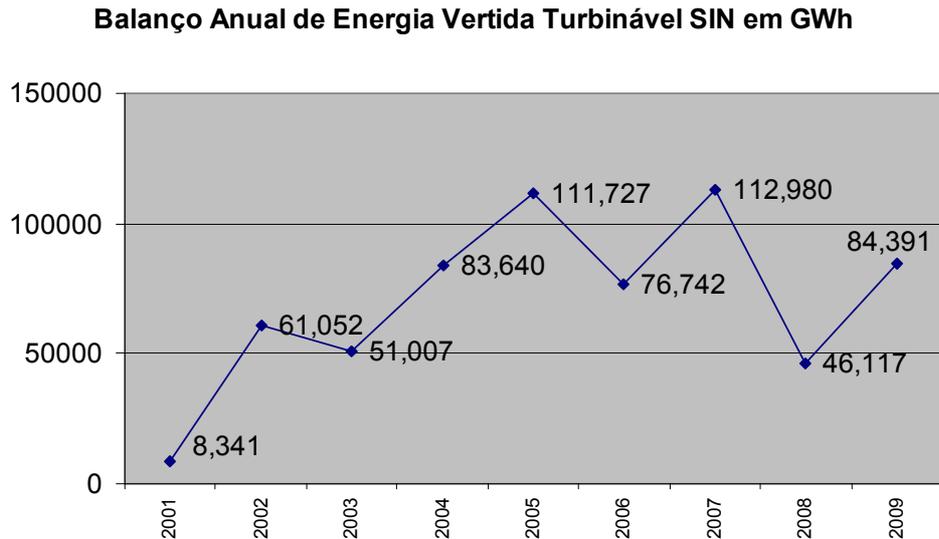


Figura 48: Energia vertida turbinável, em GWh, anuais de maio de 2001 a outubro de 2009
Fonte: Dados da Pesquisa.

Como então, conforme visto no item 3.8.1, a energia de origem hidrelétrica não é suficiente para suprir totalmente o consumo interno de energia e, ao mesmo tempo, é vertida ao passar pelas barragens sem gerar energia elétrica? Parte desta complexa resposta pode ser melhor analisando-se a curva de carga de um dia típico, conforme apresentado na figura 49 a seguir:

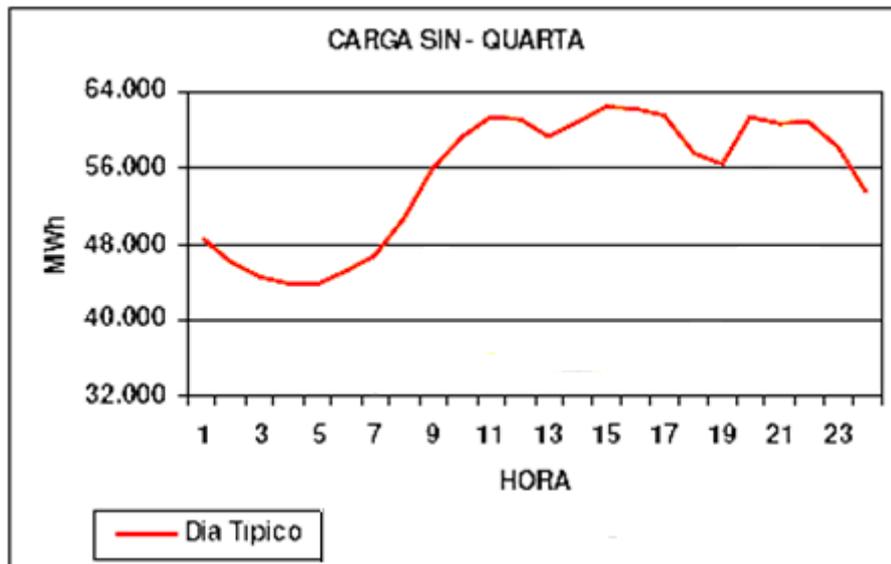


Figura 49: Demanda de energia em dia típico, feriado típico e carnaval 2009.
Fonte: ONS

Pode-se notar que a demanda de energia elétrica não é uniformemente distribuída ao longo do dia, sendo que em um dia típico, assume valores baixos durante a madrugada (carga

leve) e valores elevados durante o dia (carga de ponta). Portanto, para se suprir a demanda de energia do mercado interno, devem ser considerados, além da energia armazenada no sistema, também a sua potência para se atender os picos de demanda nos períodos de ponta. Outros fatores a se considerarem são o custo e a disponibilidade dos diversos tipos de energia, que são gerenciados pelo ONS.

Uma oportunidade para o fornecimento de energia para os veículos elétricos a ser considerada é a do carregamento na carga leve, ou seja, quando o sistema elétrico está operando em baixa capacidade durante o período da madrugada. Esta situação visa, principalmente, aproveitar parte da energia vertida turbinável nos meses do período chuvoso e aquela acumulada durante os demais meses do ano, para o abastecimento veicular, sem comprometer a margem de segurança do sistema elétrico brasileiro.

6.1.4 Impacto da frota de veículos elétricos no sistema elétrico brasileiro

Considerando-se um veículo Palio Elétrico cuja autonomia média é de 90km para uma energia de 19,2kWh, tem-se que é consumido até 0,213kWh por km rodado. Como um veículo circula, em média, 15.000km/ano tem-se um consumo em torno de 3,2MWh/ano para cada veículo.

Partindo-se da hipótese de uma frota de veículos elétricos da ordem de 110 mil veículos, conforme explicado anteriormente no item 6.1.2, temos um consumo destinado ao abastecimento da frota de veículos elétricos em torno de 352 GWh/ano ou 29,3GWh/mês.

Com base na oferta interna de energia elétrica de 2007, de 483TWh naquele ano, o impacto de uma frota de 110 mil veículos elétricos representaria um consumo de 0,073% de toda a oferta nacional de energia.

Com base nos dados da figura 49, o menor valor de energia vertida turbinável anual, desde 2002, foi de 46TWh, temos que o impacto de uma frota de 110 mil veículos elétricos é de 0,76% sobre aquele valor.

Nota-se que a parcela de energia necessária para o abastecimento dos veículos elétricos, em torno de 0,073% da geração total de energia hidrelétrica do SIN, não altera de forma significativa o nível dos reservatórios no tocante à energia armazenada e não sobrecarrega o sistema, caso as condições de abastecimento durante a carga leve forem

respeitadas, o que pode ser conseguido com o estímulo ao consumo desta energia com tarifas mais baixas e restringindo-se o consumo na carga de ponta com tarifas elevadas.

Deve ser considerado também que o veículo elétrico pode e deve ser utilizado como unidade armazenadora de energia para ser utilizada durante a carga de ponta, com a vantagem de estar próximo dos centros consumidores e num nível de tensão próximo ao do utilizado pelo usuário residencial. Este gerenciamento pode ser feito pelos pontos inteligentes de abastecimento já apresentados, por exemplo, no salão do automóvel de Tóquio de 2009, como mostrado nas figuras 50 e 51 a seguir:



Figura 50: Ponto inteligente de recarga de veículos elétricos, apresentado no 41º salão do automóvel de Tóquio 2009 – Fabricante Panasonic
Fonte: Foto do autor.



Figura 51: Ponto inteligente de recarga de veículos elétricos, apresentado no 41º salão do automóvel de Tóquio 2009 – Fabricante Takaoka
Fonte: Foto do autor.

6.2 Custo da Energia Elétrica, dos Combustíveis e do Quilômetro Rodado por Passageiro

O custo do quilômetro rodado por passageiro varia, principalmente, com a tipologia do meio de transporte utilizado. Neste estudo, foi comparado o custo do quilômetro rodado, por passageiro, entre um veículo de passageiros à combustão, abastecido com etanol e gasolina, um veículo elétrico e um ônibus urbano. Para este cálculo, foi considerado apenas o custo dos combustíveis, no caso dos veículos à combustão, e somente o custo da energia, no caso dos veículos elétricos, uma vez que a comparação global levando-se em conta o custo de aquisição do veículo, não possui a mesma base econômica, por ser o veículo à combustão fabricado em larga escala e o veículo elétrico ser, ainda, de fabricação não-seriada.

6.2.1 Custo do Quilômetro Rodado com Veículo Bi combustível Abastecido com Gasolina

Segundo a pesquisa de preços da Agência Nacional do Petróleo, ANP (setembro/2009), o preço médio da gasolina ao consumidor na região sudeste do Brasil é de R\$ 2,417/litro, já incluídos os impostos.

Segundo o CONPET, Programa Nacional da Racionalização do Uso dos Derivados do Petróleo e do Gás Natural (2009), o consumo de um veículo do tipo Fiat Mille em percurso urbano é de 15,7 km/litro (referência Norma NBR 7024).

Com base nestes valores e considerando-se somente o custo do combustível, chega-se ao valor por quilômetro rodado de R\$ 0,154/km. Considerando-se que o veículo em questão é capaz de transportar 5 passageiros, o custo por passageiro por quilômetro transportado está em torno de R\$ 0,031 (um erro para mais é aceitável uma vez que a NBR 7024 contempla somente dois passageiros na medição do consumo).

De modo análogo, um veículo do tipo Palio ELX 1.4, tem um custo de R\$ 0,186/km, e o custo por passageiro por quilômetro transportado está em torno de R\$ 0,037, uma vez que seu consumo em percurso urbano é de 13,0 km/litro.

6.2.2 Custo do quilômetro rodado com veículo bicombustível abastecido com etanol

Fazendo-se para o mesmo veículo o cálculo acima, considerando-se como combustível o etanol etílico hidratado, que custa em média na região sudeste do Brasil R\$ 1,340, segundo a ANP (setembro/2009) e tem um consumo em ciclo urbano de 10,8 km/litro, conforme informações do CONPET (2009), tem-se que o custo por quilômetro rodado com o etanol é de R\$ 0,124 e o custo por passageiro, também por quilômetro transportado, está em torno de R\$ 0,025.

De modo análogo, um veículo do tipo Palio ELX 1.4, tem um custo de R\$ 0,152/km, e o custo por passageiro por quilômetro transportado está em torno de R\$ 0,030, uma vez que seu consumo em percurso urbano é de 8,8 km/litro.

6.2.3 Custo do Quilômetro Rodado com Veículo Elétrico

O preço máximo da eletricidade residencial na região sudeste do Brasil (CEMIG) em setembro de 2009, incluindo-se aí os impostos, a taxa de iluminação pública e as contribuições setoriais, era de R\$ 0,652/kWh. Considerando-se que o consumo do Palio Elétrico é 0,1839kWh/km, tem-se que o custo por quilômetro rodado com veículo elétrico é de R\$ 0,120. Como o veículo Palio Elétrico transporta 4 passageiros, o custo por passageiro por quilômetro transportado é de R\$ 0,030.

Observa-se que o preço mínimo da eletricidade residencial na região sudeste do Brasil (ELETROPAULO) em setembro de 2009, com os mesmos impostos e encargos era de R\$ 0,339/kWh. Com isto, verifica-se que o custo do quilômetro rodado no Palio Elétrico é de R\$ 0,062 e o custo por passageiro por quilômetro transportado é de R\$ 0,016.

A partir destes dados pode-se afirmar que o custo por quilômetro rodado do carro elétrico, mesmo utilizando-se dos valores das tarifas de energia elétrica residenciais, que não contemplam o horário de pico e a horo-sazonalidade, chegam a ser até cerca de 50% menores que o custo do quilômetro rodado com combustível (etanol ou gasolina), dependendo da tarifa, nunca superando, mesmo com a tarifa mais cara, o custo do quilômetro rodado de um veículo similar a combustível, quer seja gasolina ou etanol.

Considerando-se o custo da energia por barril equivalente de petróleo (BEN 2008) mostrado na tabela 12 a seguir, o preço da energia elétrica residencial média no Brasil é de US\$354,0/bep (barril equivalente de petróleo), onde 1 bep é equivalente a $1,68 \times 10^3$ kWh.

Considerando-se ainda segundo o mesmo estudo, que a gasolina custava em média, em 2007, US\$226,0/bep e que o etanol custava em média US\$243,9/bep e ainda o consumo de um Palio Elétrico (0,1839kWh/km) e de um Fiat Mille (CONPET: 15,7km/l à gasolina e 10,8km/l a etanol no percurso urbano segundo NBR 7024) com os seus respectivos poderes caloríficos e densidades dos combustíveis em questão, tem-se um custo por quilômetro rodado em torno de R\$ 0,076 para o veículo movido à eletricidade, o que equivale a R\$ 0,019 por passageiro por quilômetro transportado, e um custo por quilômetro rodado de R\$ 0,136 para a gasolina e de R\$ 0,147 para o etanol, o que equivale, respectivamente, a R\$ 0,0272 e R\$ 0,0294 por passageiro por quilômetro transportado. Observa-se que estes valores foram calculados baseando-se no valor médio do dólar, em 2007, de R\$ 1,95.

Tabela 12: Custo da energia em dólares americanos por barril equivalente de petróleo

	US\$ / bep ¹									
	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
Petróleo Importado	11,7	16,8	29,9	26,1	24,7	30,6	41,2	49,3	68,6	74,7
Petróleo Importado ²	14,7	20,8	35,7	30,3	28,2	34,3	44,8	51,9	70,5	74,7
Óleo Diesel	57,7	46,6	58,9	55,4	58,1	78,1	82,2	116,5	139,4	155,5
Óleo Combustível BPF	24,1	22,2	32,2	28,4	27,0	34,8	38,5	52,1	61,5	66,3
Gasolina	133,7	117,8	148,8	126,9	106,4	122,6	128,0	172,1	209,6	226,0
Álcool	174,7	103,7	151,0	121,8	99,0	124,0	115,8	158,4	214,9	243,9
GLP	86,5	87,5	102,4	75,5	81,1	94,1	100,4	120,1	144,4	164,8
Gás Natural Combustível	21,4	19,9	26,4	23,3	22,7	23,3	28,4	39,4	52,0	65,1
Eletricidade Industrial	100,6	74,2	83,0	75,3	70,6	80,7	101,7	172,7	212,5	238,6
Eletricidade Residencial	231,9	172,6	195,0	170,1	158,8	175,0	205,8	293,1	328,3	354,0
Carvão Vapor	11,0	8,3	9,8	8,3	7,9	8,5	11,4	14,1	16,1	19,5
Carvão Vegetal	17,0	11,8	10,7	12,0	15,4	14,7	19,5	30,1	38,4	45,2
Lenha Nativa	13,3	11,4	9,8	9,3	6,6	7,7	10,0	6,5	8,5	8,9
Lenha de Reflorestamento	14,6	12,5	10,8	10,3	nd	nd	nd	nd	nd	nd

¹ Considerado poder calorífico superior dos combustíveis.

² Preço constante em US\$ (2007).

Fonte: BEN, 2008.

6.2.4 Custo do Quilômetro Rodado com Ônibus Urbano

Segundo Oliveira e Silva (2007), o melhor consumo (transformação mais eficiente de combustível em quilômetro rodado) de óleo diesel para os ônibus urbanos de motor dianteiro da região metropolitana de Belo Horizonte, dentre os diversos modelos Mercedes-Benz e Volkswagen pesquisados (MB OF1417, MB OF1418, VW 17210, VW 17210 Eletrônico, MB OF 1721, MB OF 1722, e MB OF 1722 Eletrônico), foi de 2,9985km/l nos modelos MB OF1417 e MB OF1418. Segundo a ANP, o custo médio do óleo diesel na região sudeste do Brasil (setembro/2009) é de R\$ 1,968, o que resulta em um custo por quilômetro rodado de R\$ 0,65/km.

Como a capacidade média de um ônibus é de 37 passageiros sentados, tem-se um custo por passageiro transportado por quilômetro em torno de R\$ 0,018, considerando-se apenas passageiros sentados para fins de equiparação com o nível de conforto do automóvel. Quando se faz o mesmo cálculo com a capacidade máxima do ônibus urbano, em torno de 70 passageiros, o custo por passageiro transportado por quilômetro diminui para R\$ 0,009, entretanto, sem o conforto proporcionado pelo automóvel ou pelo ônibus considerando-se apenas a lotação de passageiros sentada.

Convém salientar que como ônibus urbano possui um custo operacional elevado, representado pelo custo por quilômetro rodado de R\$ 0,65 frente ao custo por quilômetro rodado da ordem de R\$ 0,154 do veículo a combustão, o ônibus urbano começa a apresentar o custo por passageiro, por quilômetro transportado, similar ao veículo à combustão, com cerca de um quarto de sua lotação total, em torno de 17 passageiros. Uma grande vantagem do ônibus urbano, quando este tem uma ocupação próxima à sua lotação, é a sua baixa área ocupada nas vias, pelo número de passageiros transportados, o que melhora a fluidez do trânsito.

6.2.5 Síntese

O aumento do consumo de combustíveis (gasolina, etanol e gás natural) no setor de transportes leves (projetado para um mínimo de 20% até 2016) irá promover, por consequência, um aumento proporcional das emissões de gases considerados como causadores do efeito estufa, em especial o dióxido de carbono, além de poluentes em geral, principalmente nos grandes centros urbanos.

A participação da energia hidrelétrica na oferta nacional de energética, em torno de 80%, é bem maior que a participação da energia hidroelétrica na oferta mundial, da ordem de 2,2%. Devido a esta característica, o Brasil contribui com uma emissão de dióxido de carbono oriunda da geração de energia elétrica muito baixa se comparada com, por exemplo, os Estados Unidos, que contribui em torno de 5 vezes mais emissões de dióxido de carbono por kWh de energia gerada.

Com base nestes dados, tem-se que o Brasil, mesmo contando com uma matriz elétrica bastante limpa, isto é, com baixa emissão de gases poluentes para a geração de energia elétrica em comparação com outros países, ainda se utiliza de fontes poluentes (combustíveis líquidos fósseis ou de biomassa), principalmente nos locais onde a poluição do ar é um fator crítico, como nos grandes centros urbanos.

Tem-se também que o sistema hidrelétrico brasileiro conta com um excesso de energia natural afluyente nos meses do período chuvoso, o qual pode ser aproveitado em parte e em determinadas épocas do ano para o abastecimento de veículos elétricos, reduzindo-se a emissão de gases poluentes e melhorando a qualidade do ar nestes locais.

Com base nos dados dos itens anteriores, tem-se a seguinte distribuição de custos por quilômetro rodado e custos por passageiro por quilômetro rodado em trechos urbanos, tomando-se como bases o preço do combustível (ou da energia) para o consumidor final, na autonomia de cada tipo de veículo e no número de passageiros transportados, os quais podem ser mais bem visualizados pelas figuras 52 e 53 a seguir.

Pode-se concluir, então, que descontadas as diferenças de impostos e contribuições setoriais entre um estado e outro, o veículo elétrico apresenta, na região sudeste, uma média de até 36% de redução do custo por passageiro por quilômetro transportado em relação a um veículo movido a combustível líquido, considerando-se apenas o combustível e a energia elétrica como insumos para o cálculo. Caso sejam considerados os dados de atacado do BEN

2008 e se for utilizada uma base de dados nacional ao invés somente da região sudeste, ter-se-ia até 44% de redução do custo por passageiro por quilômetro transportado.

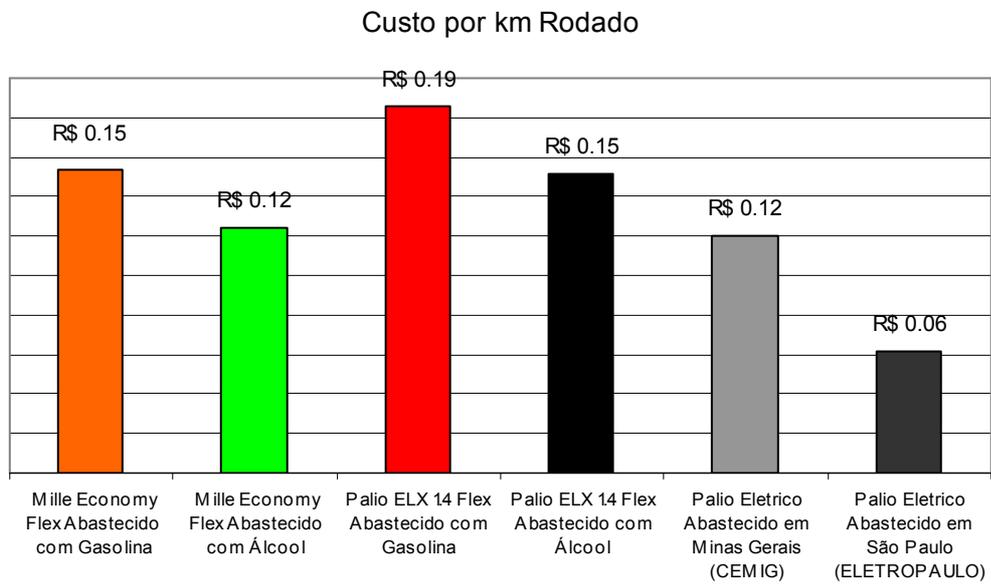


Figura 52: Custo por Quilômetro Rodado
Fonte: Dados da Pesquisa.

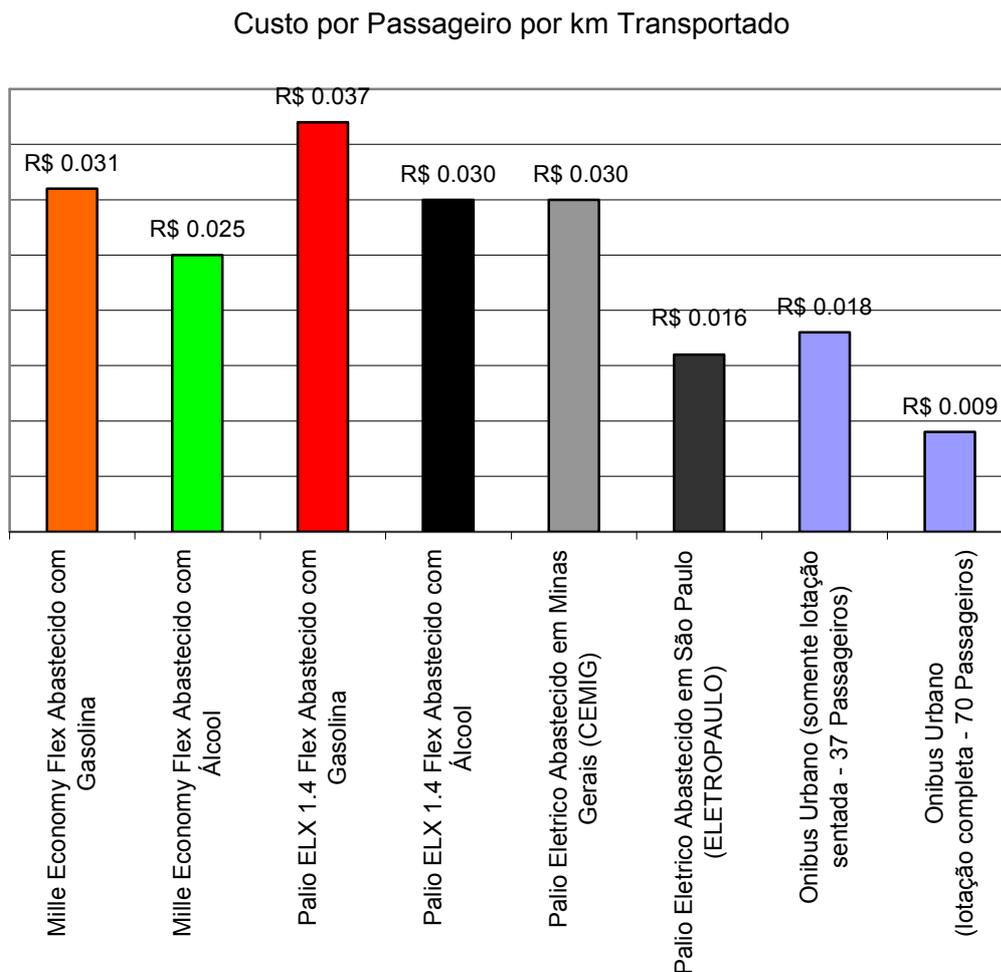


Figura 53: Custo por Passageiro por Quilômetro Transportado
Fonte: Dados da pesquisa.

6.3 Taxa de Autodescarga

Outro aspecto importante relativamente às baterias para veículos elétricos é a sua taxa de autodescarga. A autodescarga é o processo pelo qual a bateria perde parte de sua energia no tempo. Assim, um veículo elétrico pode, após um período de inatividade não conectada à tomada de recarga, perder grande parte da sua energia armazenada nas baterias, podendo não mais se movimentar, ou movimentar-se com autonomia reduzida. Além disso, a autodescarga tem o viés econômico da perda de energia, valor considerável no custo do quilômetro rodado.

Segundo Buchmann. (2001), as baterias frias, que armazenam sua energia a temperaturas próximas à da ambiente, possuem uma taxa de autodescarga que varia de 10 a

15% nas primeiras 24 horas, seguidas de 10 a 15% por mês subsequente sem uso, para as baterias de níquel-cádmio, e de apenas 5% nas 24 primeiras horas e de 1 a 2% por mês subsequente sem uso, para as baterias de lítio-íon.

Também segundo Buchmann. (2001), as baterias de chumbo-ácido apresentam uma taxa de autodescarga da ordem de 5% ao mês. As baterias quentes, por sua vez, que armazenam energia a altas temperaturas, acima de 200°C, apresentam uma taxa de autodescarga mais elevada, da ordem de 13 a 18% a cada 24 horas.

A autodescarga das baterias quentes pode ser compensada, por exemplo, com o auxílio de geradores fotovoltaicos instalados no veículo. Uma bateria típica de um veículo como o Palio Elétrico pode utilizar um gerador fotovoltaico instalado no capô e no teto para gerar a potência necessária para manter a bateria aquecida e, assim, evitar a imobilização do veículo devido à autodescarga.

Um exemplo de diagrama elétrico para a instalação do gerador fotovoltaico e demais componentes do sistema em um veículo elétrico é indicado na figura 54 a seguir.

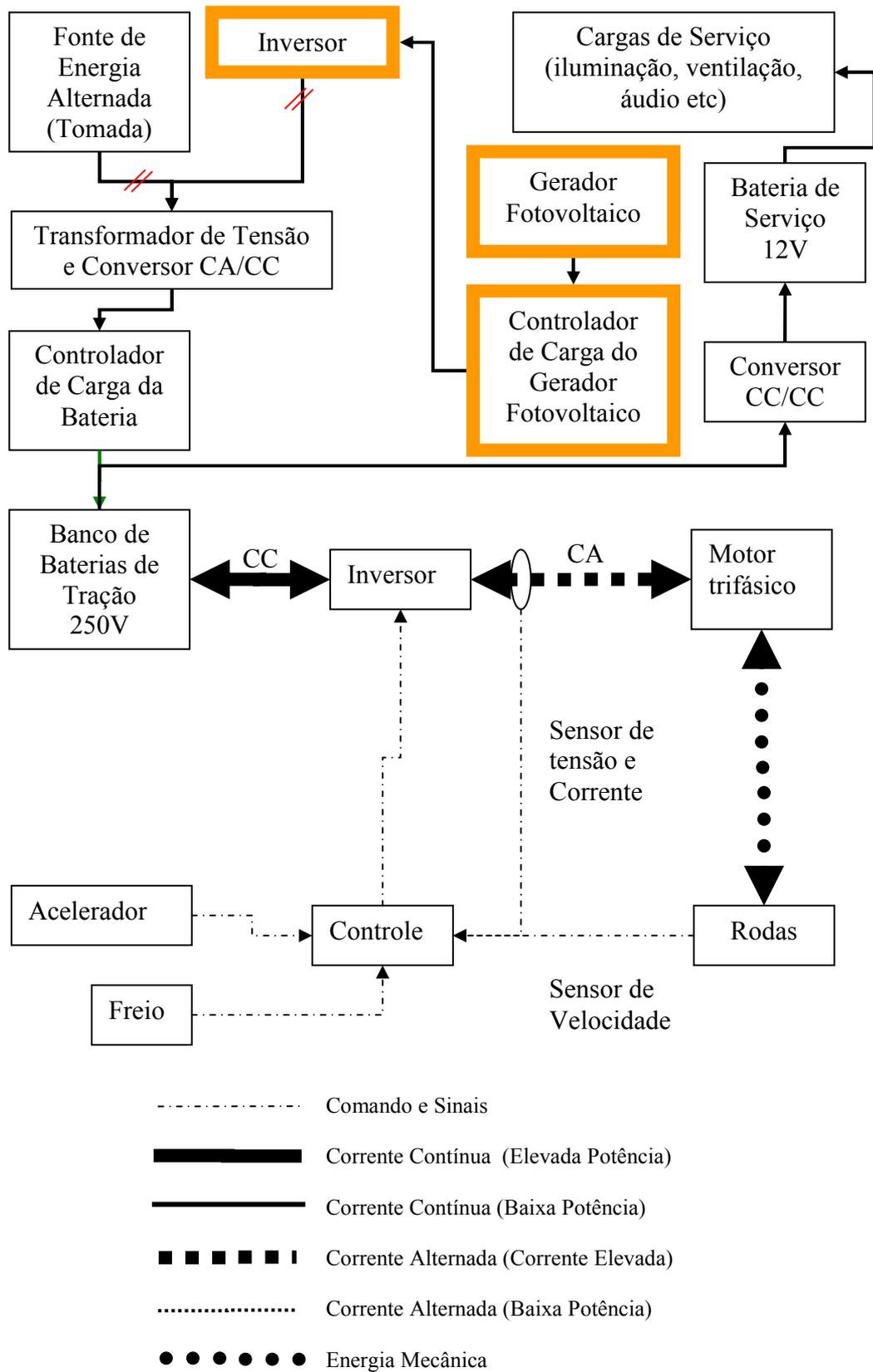


Figura 54: Instalação de um sistema de geração fotovoltaico para evitar a autodescarga da bateria de níquel metal cloreto
 Fonte: Elaborado pelo autor.

6.4 Fornecimento de Matérias-Primas para a Fabricação de Baterias e análise de custos

Nos últimos tempos vem se discutindo sobre a escassez de lítio no mundo, a qual tende a aumentar caso cresça a participação de veículos elétricos e híbridos no mercado.

Segundo dados do AMB, Anuário Mineral Brasileiro 2006 exercício 2005 (2006), o Brasil detém 137mil toneladas de lítio, ou cerca de 1,3% das reservas mundiais. As reservas medidas de lítio no país somam 32mil toneladas e estão concentradas (99%) em Araçuaí, Minas Gerais. O USGS (*United States Geological Survey*) (2009) informa que o Brasil possui uma reserva de 190mil toneladas medidas e de até 910mil toneladas estimadas (não medidas), além de ser a quarta maior reserva mundial, conforme a figura 55 a seguir:

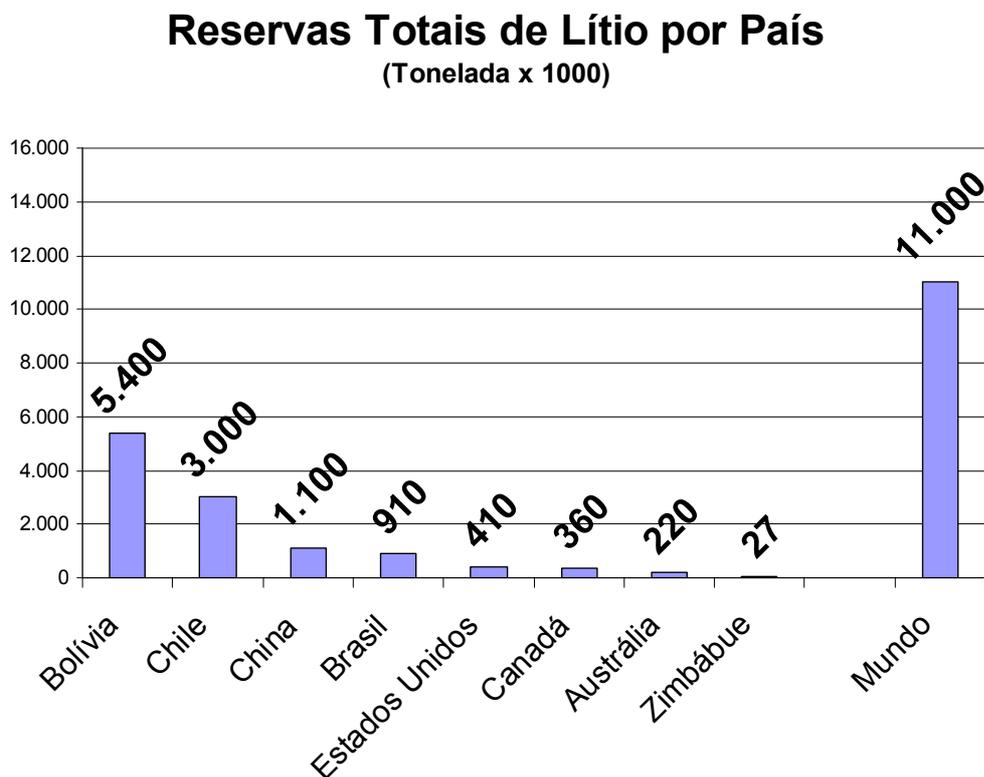


Figura 55: Reservas Totais de Lítio por País
Fonte:USGS

Segundo Gaines (2009), um veículo com autonomia de 100 milhas (160km) e um consumo de 300Wh por milha (0,1875kWh/km), utiliza entre 7,4 e 12,7kg de lítio na composição da bateria, dependendo da tecnologia utilizada. Considerando-se apenas as reservas medidas do AMB, de 32mil toneladas, tem-se um potencial para a fabricação de mais

de 2,5 milhões de veículos elétricos a partir da tecnologia de baterias que demanda a maior concentração de lítio. Caso seja utilizado o mesmo cálculo baseando-se na reserva total do AMB, de 137 mil toneladas, tem-se um potencial para a produção de mais de 10 milhões de veículos elétricos, ou quase a metade da frota brasileira atual, que é de 22 milhões de automóveis. Ambos os cálculos não contemplam a reciclagem nem a importação de matéria prima.

Atualmente, o custo dos veículos elétricos é elevado principalmente em função do alto custo das baterias. Uma pesquisa realizada entre diversos fabricantes de bateria, retornou um custo médio do kWh para as baterias automotivas em torno de US\$2500. Gaines e Cuenca (2000) citam um custo para início da produção seriada em torno de US\$706/kWh, podendo evoluir para até US\$ 250/kWh, segundo as previsões otimistas do ANL, *Argonne National Laboratories*, e possuem, ainda, um custo objetivo de US\$150/kWh, segundo o USABC, Consórcio Americano para Baterias Avançadas. Estes dados estão mostrados na figura 56 a seguir.

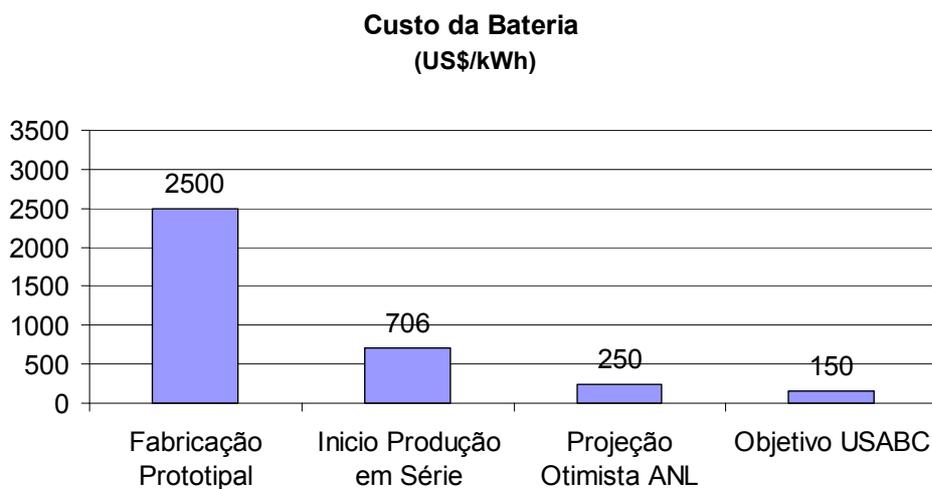


Figura 56: Custo das Baterias para Veículos Elétricos
Fontes: Fiat Automoveis S/A, ANL e USABC

Considerando-se um veículo urbano projetado para uma autonomia de 100 a 120km, onde são necessários aproximadamente 18kWh de energia, o custo das baterias estaria em torno de R\$ 21 mil para o início da produção em série e poderia cair até à R\$ 7,7 mil, segundo a projeção otimista do ANL.

6.5 Cálculo do Consumo do Veículo Elétrico

6.5.1 Energia Necessária ao Deslocamento

De posse dos valores de resistência ao deslocamento e da variação de velocidade acima descritas, pode-se calcular a energia necessária ao deslocamento do veículo em um determinado percurso ou em um ciclo de consumo normalizado, que é dada pelo somatório das energias devido às forças resistivas anteriormente descritas, a saber:

- Energia das forças de rolamento
- Energia da resistência aerodinâmica
- Energia da variação das inércias e
- Energia devida à variação da inclinação do deslocamento (aclives e declives).

Onde a energia total E_t é dada por:

$$E_t = \int_0^t P dt \quad (17)$$

Um ciclo de consumo bastante utilizado para veículos elétricos é a fase urbana NEDC, que vai até 800 segundos do ciclo NEDC New European Driving Cycle, que tem velocidade máxima de 50km/h e é ilustrado como na figura 57 a seguir:

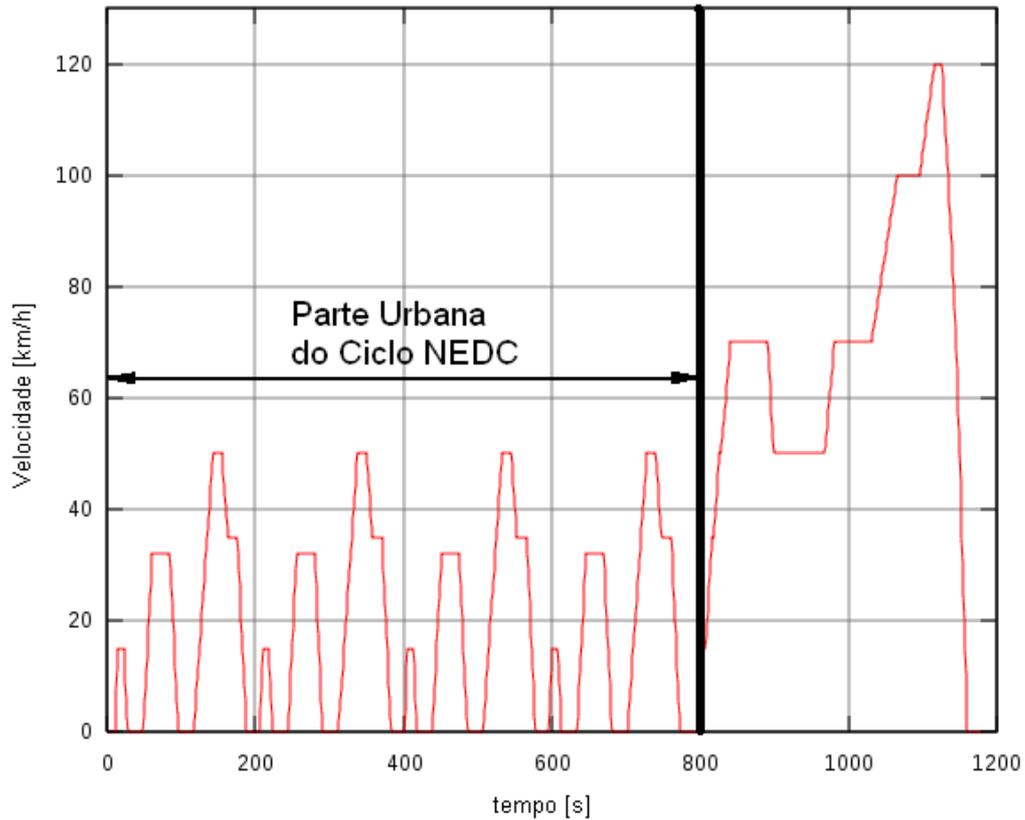


Figura 57: Ciclo de Consumo NEDC e sua parte urbana
Fonte: Fiat Automoveis S/A

Se a cada segundo do ciclo de consumo é calculada a energia utilizada para vencer todas as resistências acima, pode-se, através do somatório destas energias, calcular a demanda total de energia para se movimentar um veículo pelo ciclo de consumo, ou seja, tem-se a demanda de energia necessária para se movimentar o veículo por uma determinada distância e tempo.

Admitindo-se um veículo de referência, com os dados de ficha técnica constantes da tabela 13 a seguir.

Tabela 13: Dados de referencia para veículo elétrico atual

Veículo Atual		
Massa	1187.4	kg
Cx	0.366	adimensional
Área Frontal	2.008	m ²
Bagageiro	sim	
Pneus		
Inércia	2.963	kg x m ²
quantidade	4	unidades
C0	0.017047	adimensional
C1	5.11E-05	s ² /m ²
raio dinâmico	2.67E-01	m
perímetro	1.68E+00	m
Fabricante	A	
Ambiente		
Densidade do Ar	1.18	kg/metro cúbico
Gravidade	9.81	m/s ²
Temperatura	20	Graus C
Motor Elétrico		
Peso do induzido	20	kg
Diâmetro do induzido	200	mm
Momento de Inércia	0.1	kg x m ²
recuperação de energia	0.093	adimensional
Câmbio		
Momento de Inércia	0.01	kg x m ²
Eficiência	0.93	adimensional
Relação de Transmissão	8.654	adimensional

Fonte: Dados de pesquisa.

Podem-se calcular as energias despendidas para vencer as resistências de rolamento, aerodinâmica e inércia do veículo proposto, no ciclo NEDC. Fazendo-se o cálculo das resistências ao rolamento, segundo a segundo, tem-se a seguinte representação mostrada na figura 58 a seguir:

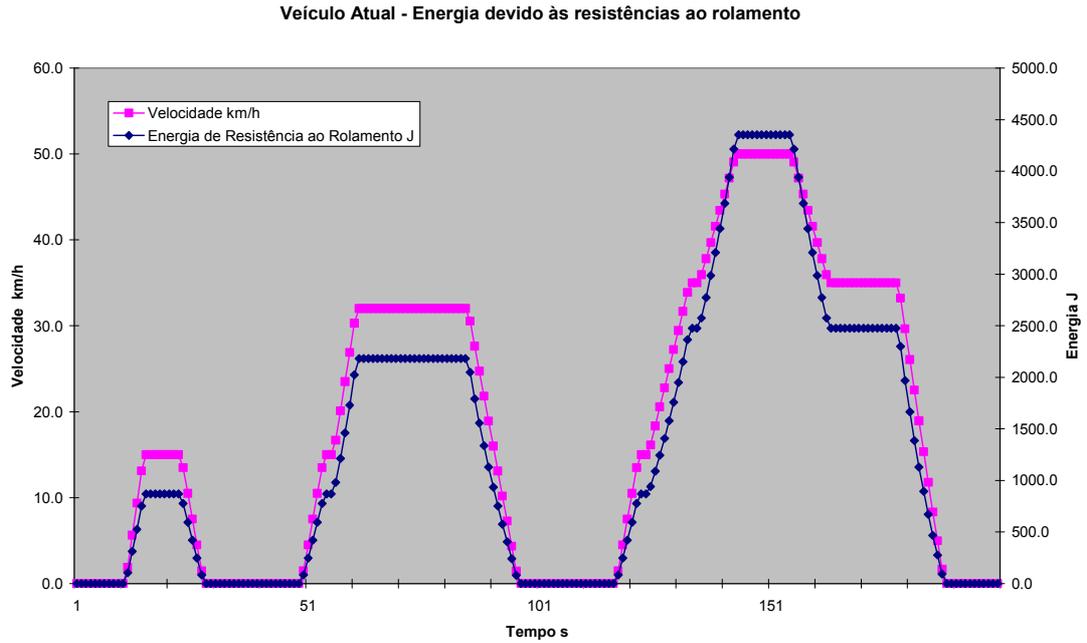


Figura 58: Veículo Atual – Energia de Resistência ao Rolamento
 Fonte: Dados da pesquisa.

Como a energia foi calculada em intervalos de um segundo, pode-se dizer também que o valor de energia representa a potência (W) instantânea utilizada pelo veículo para vencer as resistências de rolamento. Nota-se que a resistência ao rolamento é uma função quase linear da velocidade do veículo. De modo análogo, foi calculada a resistência aerodinâmica do veículo atual. A representação é mostrada na figura 59 a seguir:

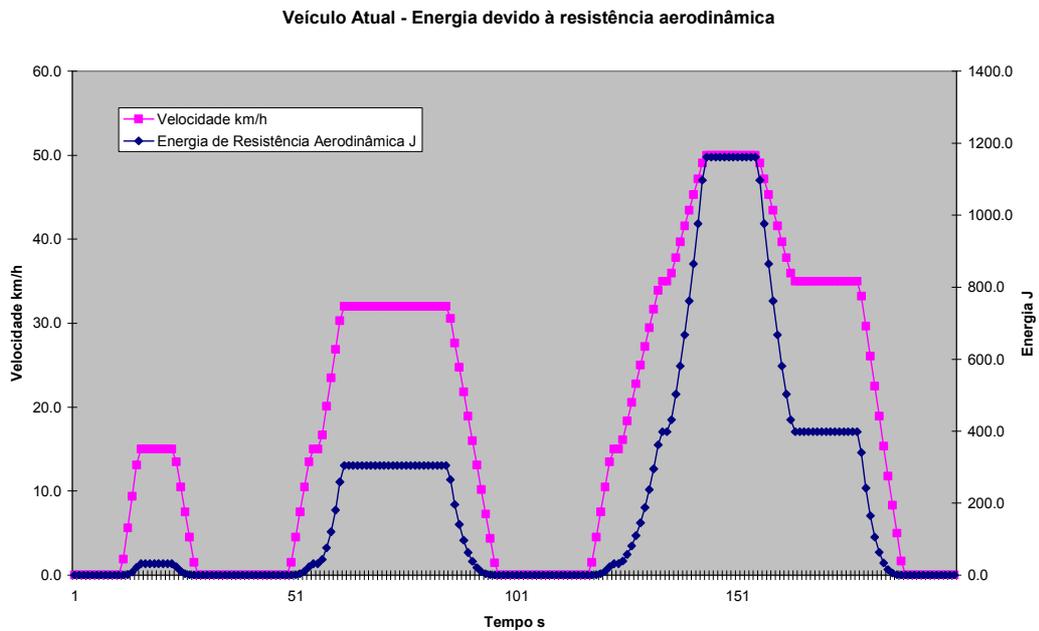


Figura 59: Veículo Atual – Energia de Resistência Aerodinâmica
 Fonte: Dados da pesquisa.

Nota-se que a energia e a potência necessárias para vencer a resistência aerodinâmica é função do cubo da velocidade e é quase desprezível nas velocidades mais baixas, assumindo um valor considerável nas velocidades mais elevadas. As resistências de inércia também foram calculadas e estão representadas na figura 60 a seguir:

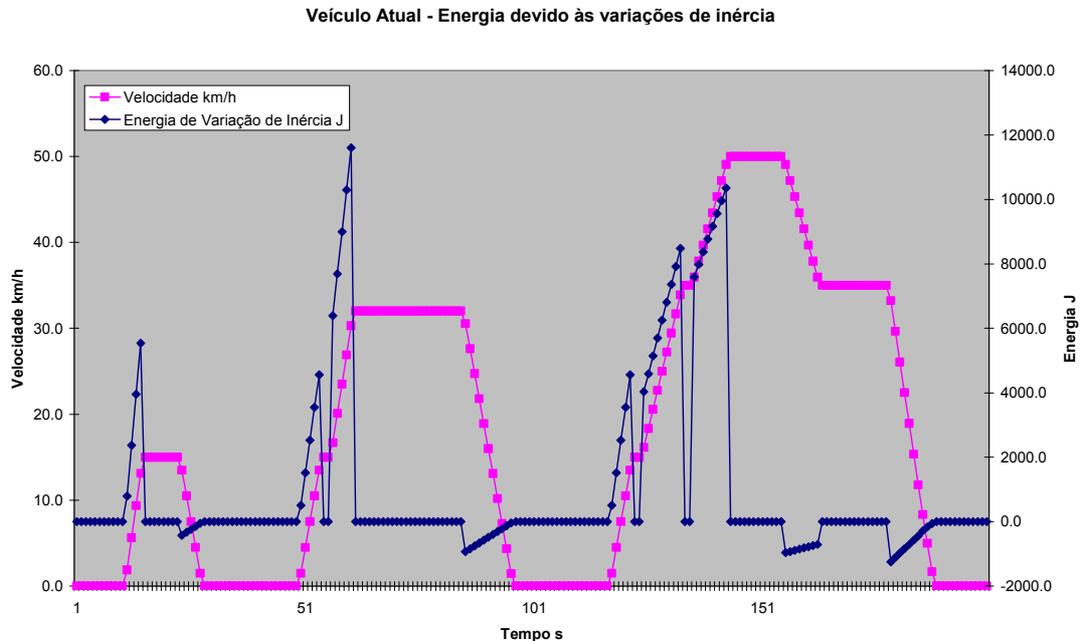


Figura 60: Veículo Atual – Energia de Variação de Inércia
Fonte: Dados da pesquisa.

Ao contrário das resistências ao rolamento e aerodinâmica, a energia devido à variação de inércia é função da aceleração do veículo, e assume valores negativos nas desacelerações, pois parte da energia pode ser recuperada pela bateria através da frenagem regenerativa. Na frenagem regenerativa, o motor elétrico trabalha como um gerador e converte parte da energia cinética do veículo em energia elétrica para a bateria.

Realizando-se um somatório das três energias dissipativas: rolamento, aerodinâmica e de inércia, tem-se a seguinte representação, mostrada na figura 61 a seguir:

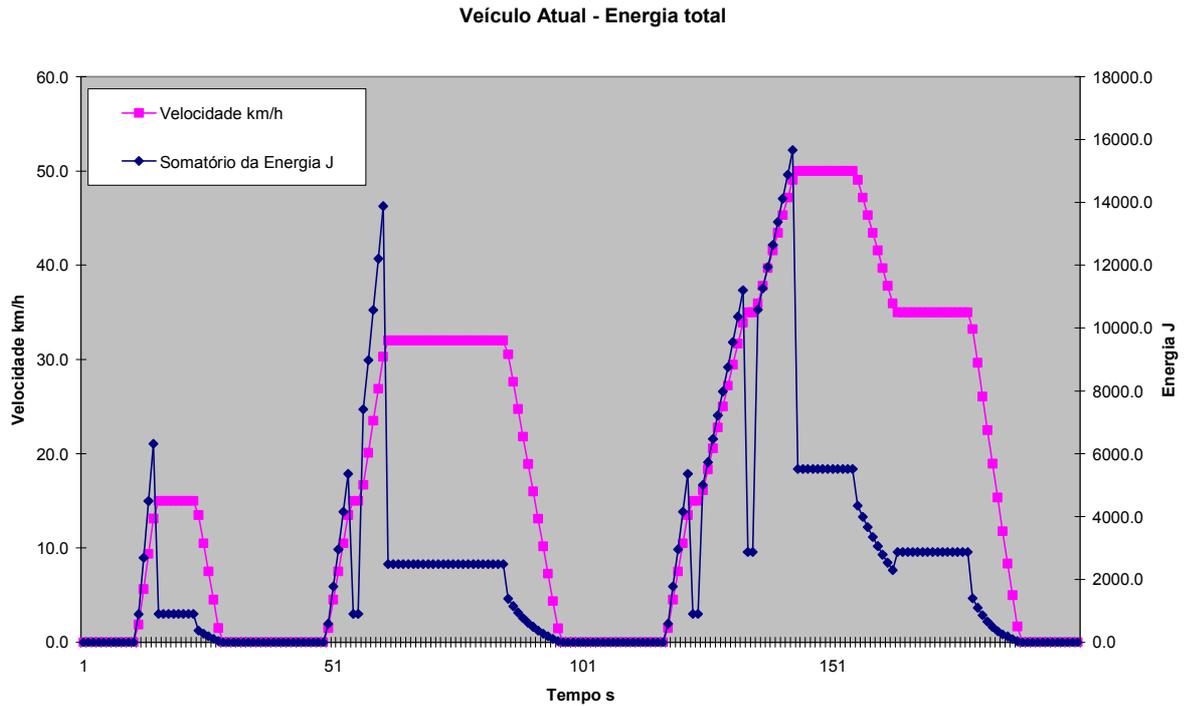


Figura 61: Veículo Atual – Energia total
Fonte: Dados da pesquisa.

Observa-se que os maiores picos de energia despendida ocorrem nos momentos de aceleração do veículo, em que além das forças de rolamento e aerodinâmicas, somam-se as forças devidas à variação de inércia.

6.5.2 Cálculo do Fornecimento de Energia para o Veículo

Para se fornecer a energia mecânica necessária à movimentação do veículo, deve-se transformar a energia química da bateria em energia elétrica de corrente contínua, em seguida transformar a energia de corrente contínua para corrente alternada, em níveis adequados de tensão e corrente através do conversor e controlador (funções acumuladas por exemplo pelo inversor de frequência no caso de VE com motores de corrente alternada), e, finalmente, pelo motor elétrico, transformar a energia elétrica em energia mecânica.

6.5.2.1 Transformação de Energia na Bateria

A transformação da energia química contida na bateria em energia elétrica é regida por um mapa de eficiência de descarga em função de vários fatores, em especial a taxa de descarga sendo, geralmente, menor quanto maior a corrente de descarga, devido à resistência interna e outros fatores contemplados pela equação de Peukert para as baterias de chumbo-ácido, por exemplo.

A figura 62 a seguir mostra um exemplo de mapa de eficiência de descarga de uma bateria de lítio-íon TS-LFP160AH do fabricante Thundersky, em que a área abaixo da curva é a energia capaz de ser fornecida pela bateria, e as curvas são as diferentes taxas de descarga às quais a bateria é submetida:

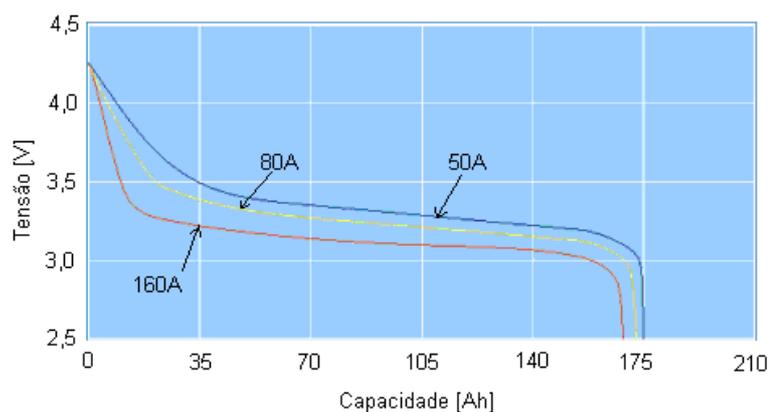


Figura 62: Mapa de Eficiência de Descarga de uma Bateria de Lítio-Íon
Fonte: Thundersky Battery

Analisando-se as várias curvas de descarga da figura 61, pode-se dizer que sob uma maior taxa de descarga, uma mesma bateria entregará menor energia total.

6.5.2.2 Transformação de Energia no Controlador-Convertor-Motor

Do mesmo modo que a bateria e o motor de combustão interna, o motor elétrico tem um mapa de rendimentos, que é dependente da rotação e da carga à qual é submetido (torque). Um exemplo de mapa de eficiência de um motor elétrico é mostrado na figura 63 a seguir:

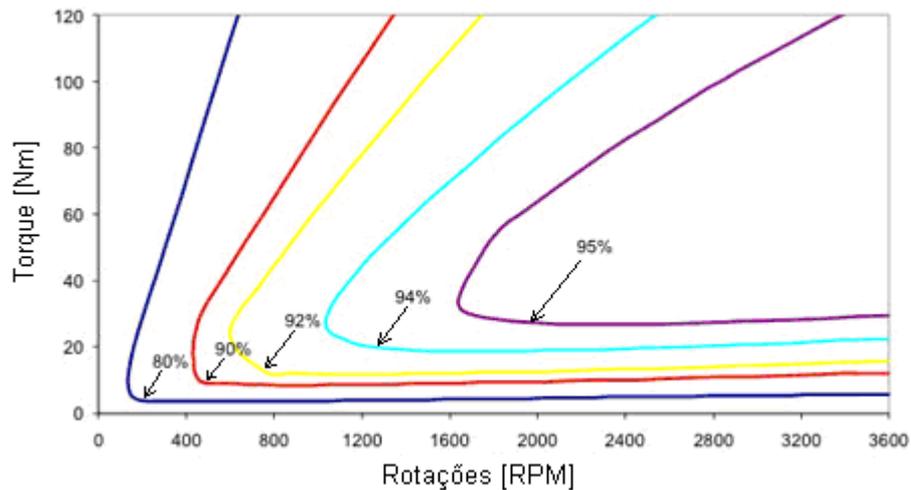


Figura 63: Mapa de Eficiência de um Motor Elétrico
Fonte: Woolmer e McCulloch

Ou seja, o rendimento do motor não é uma constante, varia de acordo com a rotação e com a carga a que é submetido, de maneira análoga àquela do motor de combustão interna, com a vantagem para o motor elétrico, em que a eficiência deste, na conversão de energia, é bastante elevada mesmo nas zonas mais desfavoráveis de utilização do veículo (em geral a mínima eficiência está em torno de 65 a 70% e localizada nas zonas de alto torque e baixa rotação).

Segundo Husain (2003), para o controle da energia entre a bateria e motor, é instalado um controlador para regular o fluxo e a polaridade da energia (no caso dos motores de corrente alternada).

Estes controles podem ser, por exemplo, do tipo reostato ou PWM, nos motores de corrente contínua (CC), e do tipo inversor de frequência nos sistemas de corrente alternada (CA), dentre os mais diversos tipos de acionamento, e neles ocorre, também, uma pequena perda e de energia, que pode ser caracterizada por um mapa de eficiências conforme ilustrado a seguir na figura 64:

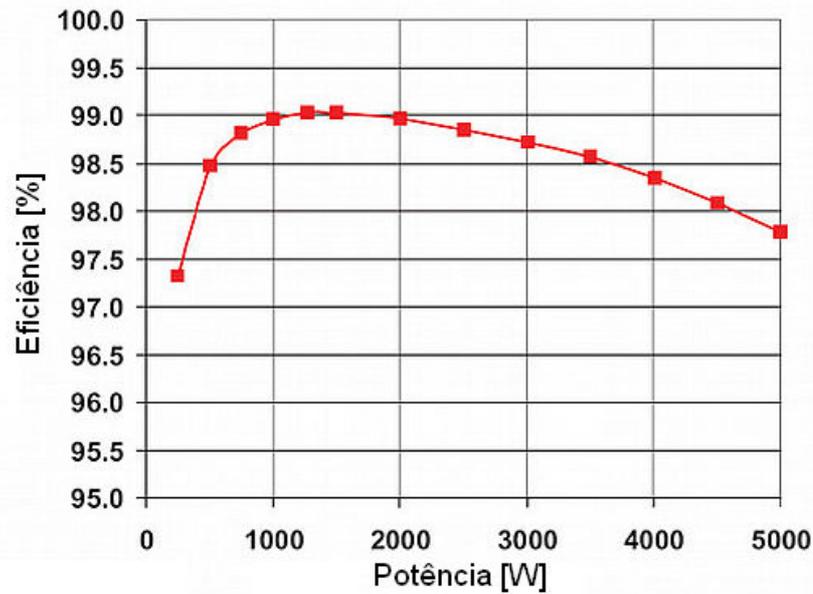


Figura 64: Mapa de eficiências de um inversor de frequência
 Fonte: OSBORNE, Mark

O produto do rendimento do motor e do controlador varia de acordo com as várias tecnologias de controle e de motor (CA ou CC) empregada. Embora existam vários tipos de controles e de motores elétricos, os quais geram várias combinações entre os diversos tipos, podem-se dividir os conjuntos motor e controlador em dois grandes grupos, os de CC e os de CA.

Os controladores de CC são mais simples e baratos e, geralmente, apresentam rendimento superior ao controlador de CA. Ao passo que um motor de CA geralmente apresenta, além da vantagem de ser em quase todas as aplicações automotivas mais barato e isento de escovas (escovas que se desgastam e apresentam perdas de atrito), apresentam um rendimento superior aos motores de corrente contínua que, quase sempre (exceto quando utilizam a tecnologia *brushless* – do inglês: sem escovas), utilizam escovas e são de construção e manutenção mais cara.

Os primeiros veículos elétricos, até a terceira fase de sua evolução, utilizavam salvo raras exceções, sistemas de controle e propulsão CC em função do baixo custo do controlador. A partir da quarta fase, a situação se inverteu, passando a ser dominada pelos acionamentos e motores CA, de maior rendimento e manutenção mais simples. Observa-se, porém, dos anos de 2007 em diante, um aperfeiçoamento da tecnologia de motores CC e também dos novos motores de corrente alternada e induzido de magneto permanente (também conhecidos como PM, do inglês: Permanent Magnet) e conseqüente aumento da oferta e redução dos conjuntos motor e controlador.

6.5.2.3 Cálculo da Energia Fornecida para o Veículo

Para o cálculo da energia fornecida para o veículo elétrico, deve-se integrar a cada infinitésimo, a energia demandada e dividi-la pelo produto dos rendimentos do motor e do controlador e debitar da energia total da bateria, que varia em função da corrente demandada a cada infinitésimo de tempo.

Algumas simulações podem ser feitas utilizando-se softwares específicos ou mesmo realizando o cálculo para um ciclo NEDC, com o auxílio de ferramentas computacionais.

O diagrama de blocos das transformações de energia durante o funcionamento de um VE pode ser visto na figura 65 a seguir.

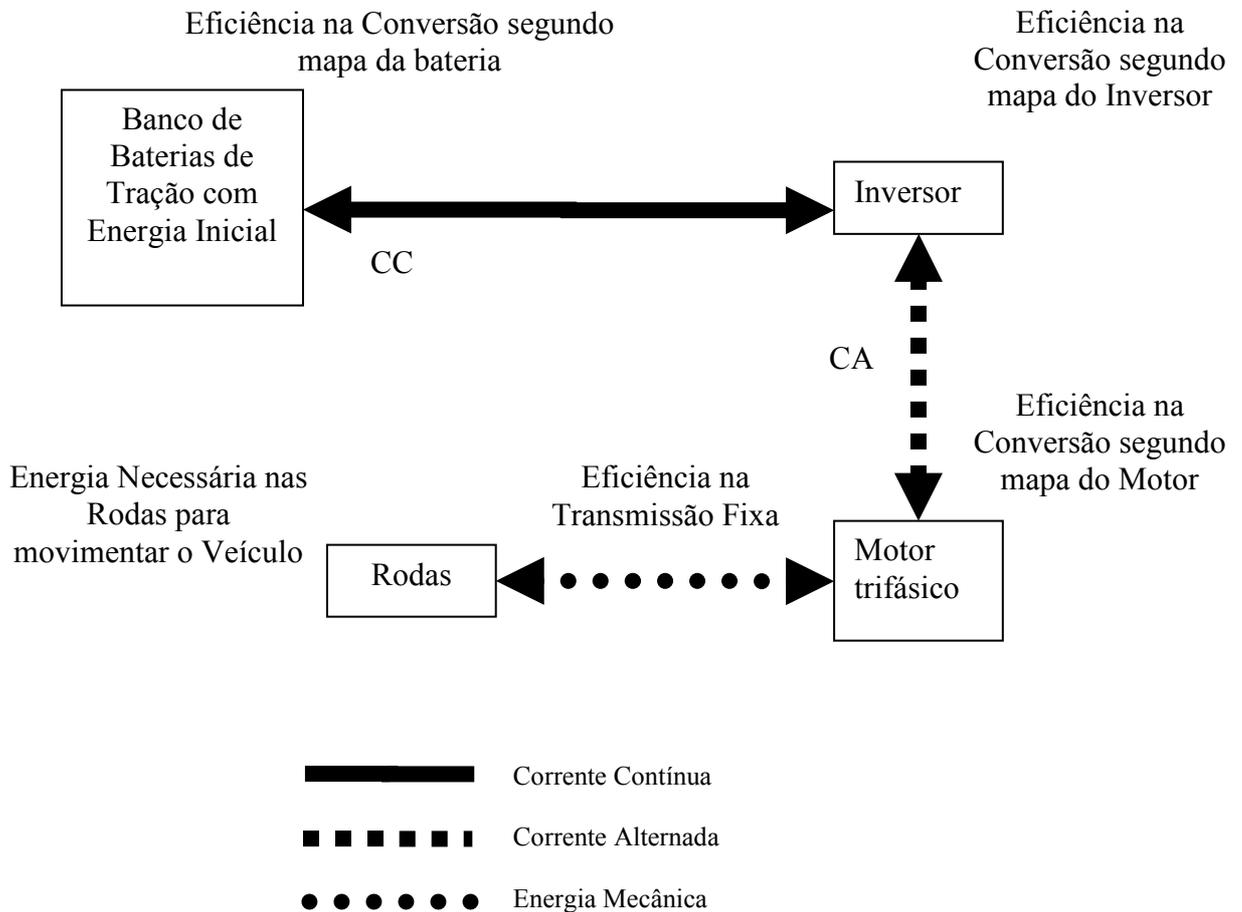


Figura 65: Transformações de Energia e Eficiências em um Veículo Elétrico
Fonte: Elaboração do autor.

Calculando-se, em um veículo atual, o débito de energia da bateria, segundo a segundo, em função dos mapas de eficiência do motor, do inversor e da bateria, e ajustando-se os valores de rendimento do câmbio e do carregador de bateria com os dados obtidos experimentalmente para o mesmo veículo, foram obtidos os seguintes valores mostrados na tabela 14 a seguir:

Tabela 14: Valores de consumo calculados para ciclo NEDC – Veículo Atual

	Atual	
somatório energia de movimentação	0.1384	kWh
rendimento carregador	0.92	
rendimento médio bateria	0.92	
rendimento médio inversor	0.97	
rendimento médio motor	0.95	
rendimento cambio	0.93	
rendimento rodas (deslizamento)	0.995	
rendimento global	72.2%	
consumo de energia otica cliente	0.1917	kWh/km
energia da bateria	19.2	kWh
autonomia expandida	100.1	km
autonomia normal (uso de 80% da carga)	80.1	km

Fonte: Dados da Pesquisa.

Deve-se lembrar que o fabricante da bateria do veículo em questão recomenda, para utilização cotidiana, até o limite de 80% da carga para se evitar a perda de vida útil prematura da bateria. A autonomia conseguida com o valor recomendado pelo fabricante é considerado como adequado para uso normal. A autonomia até a completa exaustão da energia da bateria, ou seja, com o uso de 100% da carga, é denominado de autonomia expandida.

6.6 Propostas para melhoria de autonomia de um veículo elétrico

Baseando-se no veículo elétrico atual, foi proposto um plano de redução das forças resistivas, a saber:

- Resistência ao rolamento: utilização de pneus com menor resistência ao rolamento
- Resistência Aerodinâmica: fechamento da grade frontal, devido às dimensões reduzidas do radiador do veículo elétrico. Eliminação do bagageiro e faróis de neblina. Redução da altura do veículo em 10mm.
- Resistência de Inércia: utilização de pneus de menores dimensões e redução da massa do veículo por meio da eliminação de componentes como: pneu sobressalente, banco traseiro bipartido, revestimentos anti-ruído e anti-térmicos.

Uma comparação entre as fichas técnicas dos dois veículos elétricos (atual e proposto) pode ser verificada na tabela 15 a seguir:

Tabela 15: Fichas Técnicas de Veículos Elétricos (Atual e Proposto)

	Veículo Atual	Veículo Proposto	
Massa	1187.4	1166	kg
Cx	0.366	0.36	adimensional
Área Frontal	2.008	2.001	m ²
Bagageiro	sim	não	
Pneus			
Inércia	2.963	2.29	kg x m ²
quantidade	4	4	unidades
C ₀	0.017047	0.010065	adimensional
C ₁	5.11E-05	5.79E-05	s ² /m ²
raio dinâmico	0.267	0.255	m
perímetro	1.678	1.602	m
Fabricante	A	B	
Ambiente			
Densidade do Ar	1.18	1.18	kg/metro cúbico
Gravidade	9.81	9.81	m/s ²
Temperatura	20	20	Graus C
Motor Elétrico			
Peso do induzido	20	20	kg
Diâmetro do induzido	200	200	mm
Momento de Inércia	0.1	0.1	kg x m ²
recuperação de energia	0.093	0.093	adimensional
Câmbio			
Momento de Inércia	0.01	0.01	kg x m ²
Eficiência	0.93	0.93	adimensional
Relação de Transmissão	8.654	6.182	adimensional

Fonte: Dados do autor.

Calculando-se a energia de resistência ao rolamento do veículo proposto e comparando-a com a energia de resistência ao rolamento do veículo atual, nota-se a redução da ordem de até 30%, como representado na figura 66 a seguir.

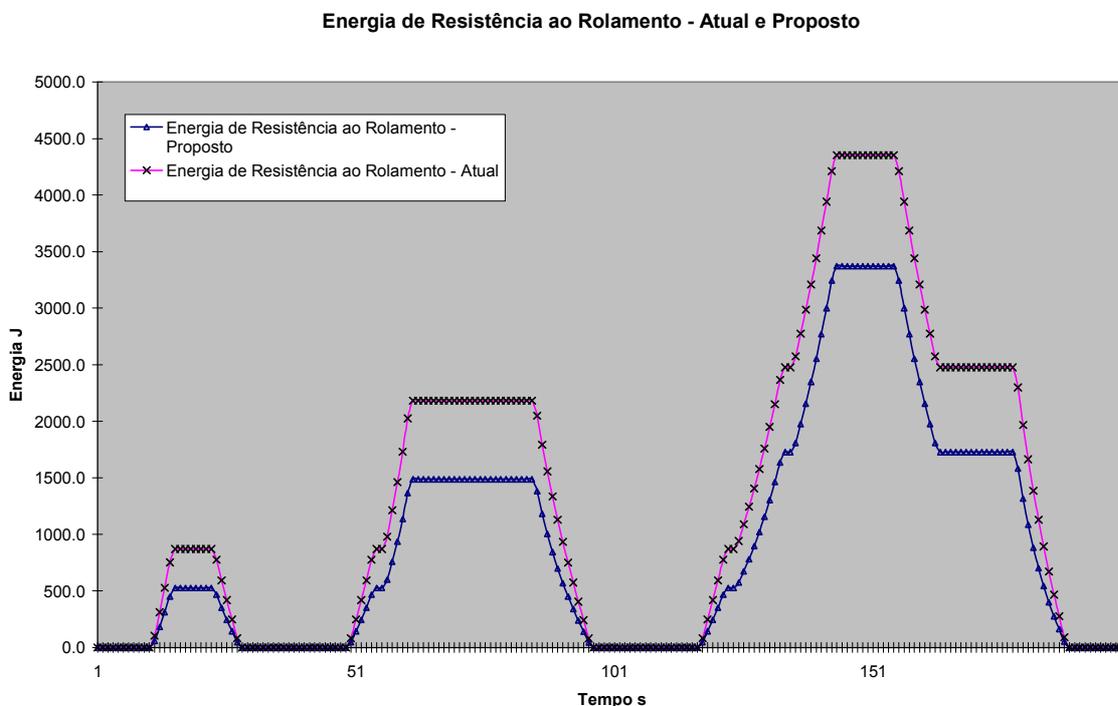


Figura 66: Comparação de energia de resistência ao rolamento – veículo atual e proposto

De modo análogo, tem-se a comparação da energia de resistência aerodinâmica, na figura 67 a seguir.

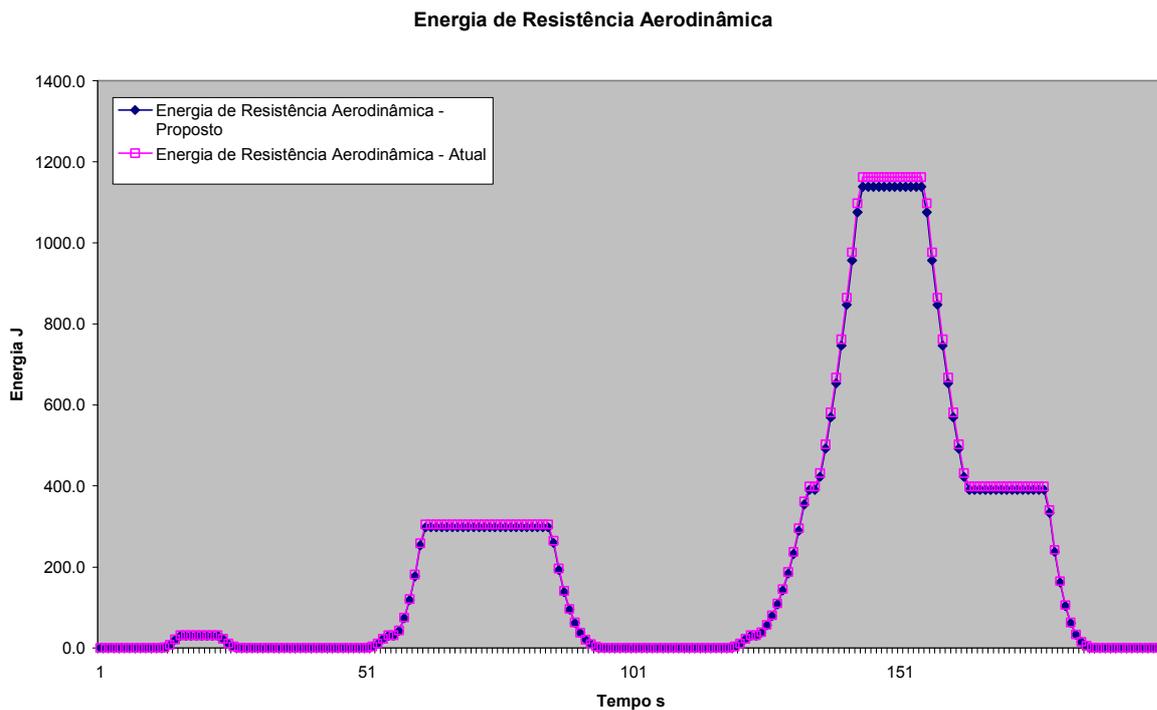


Figura 67: Comparação de energia de resistência aerodinâmica – veículo atual e proposto
 Fonte: Dados do autor.

Nota-se que mesmo as modificações na área frontal e no coeficiente de penetração aerodinâmica propostos resultaram um baixo ganho na energia utilizada para se vencer a resistência aerodinâmica, da ordem de 2%, devido às baixas velocidades do ciclo NEDC.

As energias devidas às variações de inércia também foram calculadas e comparadas com o veículo elétrico atual, sendo mostradas na figura 68 a seguir:

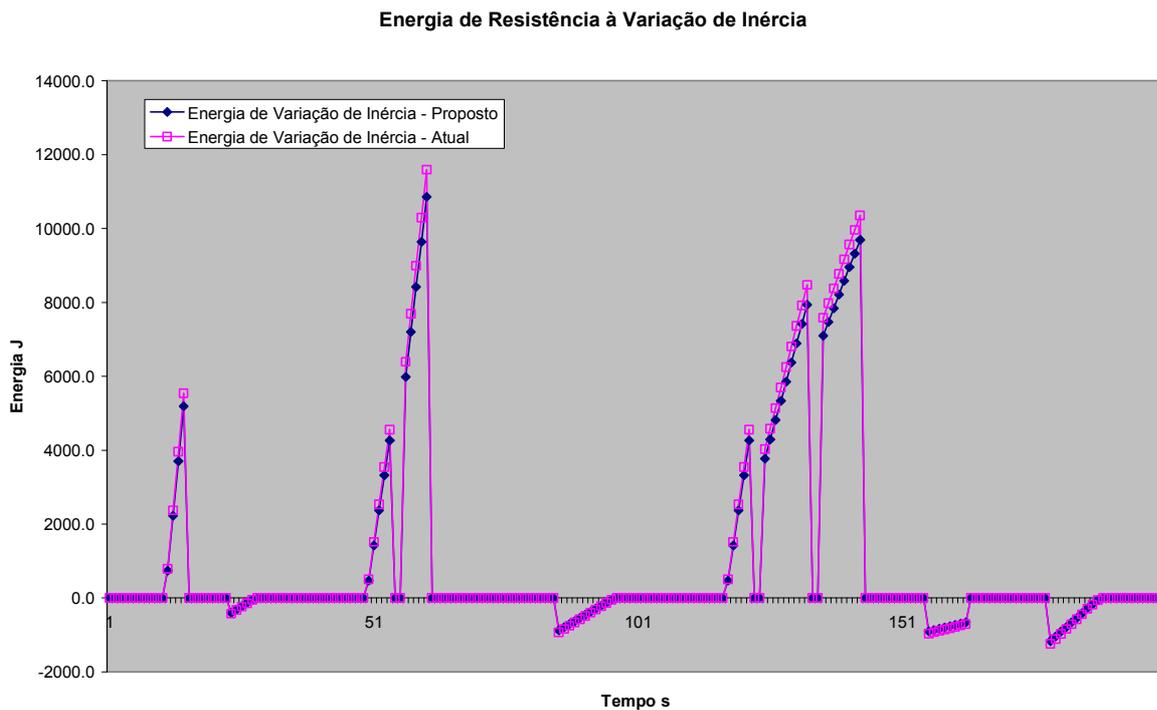


Figura 68: Comparação de energia de resistência à variação de inércia – veículo atual e proposto
 Fonte: Dados do autor.

As energias de variação de inércia tiveram uma redução de até 6,8% comparando-se o veículo proposto com o atual.

O somatório destas três energias dissipativas do veículo proposto (que é a energia necessária à movimentação do veículo segundo o ciclo NEDC), é comparado com o mesmo somatório do veículo atual na figura 69 a seguir:

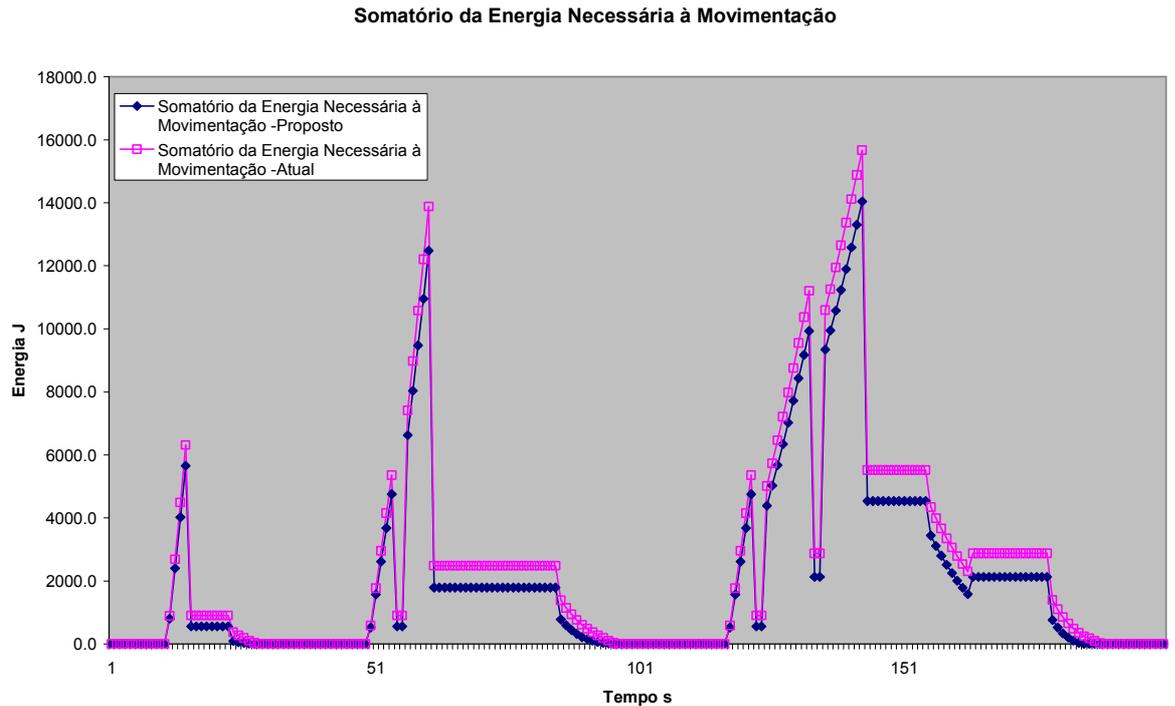


Figura 69: Comparativo do somatório da energia necessária à movimentação – atual e proposto
Fonte: Dados do autor.

Percebe-se que a energia necessária à movimentação do veículo proposto é inferior à do veículo atual, calculada em torno de 19%, o que vai se traduzir em um consumo de energia menor e, conseqüentemente, em uma maior autonomia.

Realizando-se o cálculo de consumo e autonomia, como feito para o veículo atual, tem-se os seguintes dados para ambos os veículos, mostrados na tabela 16 a seguir:

Tabela 16: Valores de consumo calculados para ciclo NEDC – Veículo Atual e Proposto

	Atual	Proposto	
somatório energia de movimentação	0.1384	0.1131	kWh
rendimento carregador	0.92	0.92	
rendimento médio bateria	0.92	0.92	
rendimento médio inversor	0.97	0.97	
rendimento médio motor	0.95	0.95	
rendimento cambio	0.93	0.93	
rendimento rodas (deslizamento)	0.995	0.995	
rendimento global	72.2%	72.2%	
consumo de energia otica cliente	0.1917	0.1567	kWh/km
energia da bateria	19.2	19.2	kWh
autonomia expandida	100.1	122.5	km
autonomia normal (uso de 80% da carga)	80.1	98.0	km

Fonte: Dados do autor.

Com as alterações efetuadas no veículo proposto, o aumento de autonomia normal e expandida, foi de aproximadamente 22%. A redução do consumo em kWh/km na ótica cliente, ou seja, aquela verificada durante a recarga do veículo, foi de 19%. Este valor é muito próximo daquele obtido com a comparação entre o valor da energia necessária à movimentação entre o veículo atual e o proposto.

6.7 Medição do consumo no veículo modificado

Foi realizada a prova de consumo ao banco segundo o ciclo NEDC. Foram realizados 10 ciclos da fase urbana, o que correspondeu a aproximadamente 10,15 km, com uma redução do nível de carga da bateria de 84% à 76%, o que equivale a um gasto de 8% da carga da bateria. Extrapolando o consumo medido no banco de provas para a utilização da carga útil da bateria, ou seja, 80% de descarga, a autonomia seria de 101,5 km. Este valor está bem próximo do valor calculado, que foi de 98km..

Do mesmo modo, a autonomia total, ou seja, com a utilização de 100% da carga da bateria, seria de 126,8 km, bem próximo do calculado que foi de 122,5 km.

Nesta medição foi desconsiderado o erro de medição da carga da bateria, sendo necessária a simulação da autonomia total do veículo no banco de provas, anotando a distancia percorrida para a bateria descarregada à 80% e à 100%, ou seja, até a parada total do veiculo por exaurimento da energia da bateria.

Se for considerado um erro de 1% no leitor do estado de carga da bateria, o valor da autonomia à 80% de descarga estaria entre 90,2 e 116 km e para descarga total estria entre 112,8 e 145 km. Mesmo assim, os valores mínimos de autonomia são cerca de 10 à 14 km maiores que o veículo atual, que tem autonomia medida entre 80,1 km à 80% de descarga da bateria e de 98 km à 100% de descarga da bateria.

7. CONCLUSÕES

O Brasil sofre com a poluição nos grandes centros urbanos, gerada principalmente por fontes móveis, ou seja, veículos automotores de transporte de passageiros particulares e coletivos, e veículos de carga, movidos principalmente a combustíveis líquidos derivados de petróleo e da biomassa. O consumo de etanol e gasolina, utilizados principalmente nos veículos de passageiros, tende a aumentar em até 20% até 2016, podendo agravar ainda mais a poluição nos grandes centros urbanos. Os veículos elétricos são uma alternativa viável para auxiliar a diminuir estes níveis, pela ausência de emissão gasosa durante o seu funcionamento.

Tendo-se em vista a viabilidade técnica e comercial de um veículo elétrico para os centros urbanos, o Brasil deverá estimular e promover políticas para incentivo do carregamento das baterias destes veículos nos horários de carga leve, no intuito de não sobrecarregar o sistema elétrico nacional, no que diz respeito à potência máxima instalada.

A frota de veículos elétricos prevista caso o Brasil siga a tendência mundial de 0,5% da produção até 2015 está em torno de 110 mil veículos. Esta frota de veículos elétricos vai consumir em torno de 352 GWh/ano ou 29,3GWh/mês, devendo ser recarregada prioritariamente no horário de carga leve do sistema elétrico nacional, cuja geração é, principalmente, de origem hidrelétrica. Os veículos elétricos podem, ainda, auxiliar na redução da potência despachada no período de ponta, pois a energia armazenada nas baterias pode, quando o veículo estiver conectado à rede elétrica, ser utilizada pela concessionária de energia local, através da utilização de carregadores inteligentes.

O custo de operação de um veículo elétrico, considerando-se somente o abastecimento, já hoje, admitindo-se as tarifas residenciais (não horosazonais), é competitivo com os veículos tradicionais à combustão e também com o transporte público coletivo, com a desvantagem do veículo elétrico ocupar mais espaço na via por passageiro transportado. O abastecimento realizado no período de carga leve pode, a critério do governo, ter sua tarifa reduzida para incentivar o consumo em horários mais favoráveis ao sistema, reduzindo-se, ainda mais, o custo de abastecimento dos veículos elétricos.

O custo de fabricação de um veículo elétrico é, atualmente, muito mais elevado do que um veículo à combustão. Esta diferença é devida, principalmente, ao custo da bateria, que é de fabricação sob forma de protótipo. Estudos demonstram que se as baterias destinadas ao uso

em veículos elétricos fossem fabricadas em série, poderiam alcançar um custo mínimo de até R\$ 7,7 mil por veículo. A matéria prima para a bateria de tecnologia de maior energia específica, o lítio, é presente no Brasil e o país possui uma reserva interna capaz de ser utilizada para fabricar baterias para até 10 milhões de veículos.

Otimizações nos veículos elétricos atuais, tais como a redução das resistências ao rolamento, resistências aerodinâmicas e resistências à variação de inércia, podem, aumentar a autonomia em até 22%, alcançando-se um valor verificado em experimento de até 126 km, o que é suficiente para a maioria das aplicações urbanas. Estas reduções de resistência foram realizadas principalmente trocando-se os pneus por outros com menor inércia e menor resistência ao rolamento, eliminando-se apêndices de carroceria, como faróis de neblina e bagageiro, além da redução da área de entrada de ar na grade frontal do veículo e da redução de peso.

Conclui-se, portanto, a partir dos estudos e pesquisas realizados para a elaboração do presente trabalho, que Brasil está apto a desenvolver, produzir e comercializar veículos elétricos destinados à utilização em centros urbanos, para se diminuir a poluição nestes locais e aproveitar em parte o potencial de energia elétrica vertida pelas usinas hidrelétricas.

8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os veículos elétricos podem se desenvolver ainda mais no Brasil se forem pesquisadas soluções específicas para eles, levando-se em conta as particularidades locais.

Na área da geração de energia, sugere-se um estudo aprofundado sobre o impacto do veículo elétrico no sistema nacional, considerando os perfis de utilização reais que serão coletados após a implantação de uma frota experimental de veículos elétricos, com a utilização de carregadores de bateria inteligentes. Com estes novos carregadores inteligentes, o motorista ao chegar a um ponto de carregamento, que pode ser a garagem de sua residência ou o estacionamento de um *shopping center*, informa quando pretende realizar o próximo percurso no carro. A partir daí, o carregador de bateria, com base nestas informações e na informação da concessionária sobre o consumo local e o custo da tarifa, gerencia o fluxo de energia, disponibilizando para o sistema elétrico local o excedente de energia armazenado na bateria do veículo e/ou recarregando a bateria do veículo a partir da energia do sistema elétrico.

Na área de armazenamento de energia, sugere-se um aperfeiçoamento no estudo das baterias quentes, em especial a de Sódio-Metal-Cloreto, pelas particularidades da temperatura ambiente elevada no Brasil, que conceitualmente colabora para diminuir a autodescarga desta bateria, pela redução da troca térmica em relação à sua utilização e dos estudos realizados principalmente em países de clima temperado.

Na área de dinâmica do veículo elétrico, sugere-se um estudo sobre as vantagens de se construir um veículo elétrico partindo de componentes específicos para este tipo de propulsão e de utilização estritamente urbana, tais como pneus, freios, suspensões, direção, carroceria etc. Este projeto deve ter como premissa a redução dos objetivos de velocidade máxima, em torno de 80 km/h, do número de passageiros, no máximo dois, e de carga, em torno de 5kg por passageiro.

REFERÊNCIAS

BARRETO, Gilmar. **Veículo elétrico à bateria**: contribuições à análise de seu desempenho e seu projeto. 1986. 360f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

BETTERPLACE. **Charging**. Disponível em <<http://betterplace.com/solutions/charging/>>. Acesso em 10 ago. 2009.

BRAGA, Alfésio; PEREIRA, Luiz A.A.; SALDIVA, Paulo H. N. Poluição Atmosférica e seus efeitos na saúde humana In: CONFERÊNCIA SOBRE A SUSTENTABILIDADE NA GERAÇÃO E USO DE ENERGIA, 1, 2002, Campinas. **Anais...** Campinas, Unicamp 2002, p.1-3.

BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Agência Nacional do Petróleo. **Levantamento de Preços**. Brasília: MME, 2009. Disponível em: <<http://ww.anp.gov.br/petro/levantamentodeprecos.asp>>. Acesso em: 10 set. 2009.

BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Departamento nacional de produção mineral. **Anuário Mineral Brasileiro 2006**. Brasília: MME, 2006. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/conteudo.asp?IDSecao=68&IDPagina=789>>. Acesso em: 19 set. 2009.

BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Empresa de pesquisa energética. **Balanco Energético Nacional 2008**: Ano Base 2007. Rio de Janeiro: EPE, 2008 244p. Disponível em: <<https://ben.epe.gov.br/>>. Acesso em: 07 abr. 2009.

BRASIL. Ministério das Minas e Energia. **CONPET. Programa Nacional da Racionalização do Uso dos Derivados de Petróleo e Gás Natural**. veículos leves 2009. Brasília: MME, 2009. Disponível em <<http://www.conpet.gov.br/download/pdf/veiculosleves2009.pdf>> Acesso em: 20 jul. 2009.

BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Plano **Decenal de Expansão de Energia 2007/2016**. Brasília: MME, 2007 2v. Disponível em : <<http://epe.gov.br/pdee/forms/epeestudo.aspx>> Acesso em: 07 abr. 2009.

BUCHMANN, Isidor. **Batteries in a portable world**. 2ed. Richmond: Cadex, 2001. 292p.

CAMPOS, Fabrício G.R.C.: **Geração de energia à partir de fonte eólica com gerador assíncrono conectado a conversor elétrico duplo**. 2004. 137f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

ESTEVES, Gheisa R.T.; Barbosa, Sônia R.C.S.; SILVA, Enio P.; ARAUJO, Paula D.; Estimativa dos efeitos da poluição atmosférica sobre a saúde humana: algumas possibilidades metodológicas e técnicas para a cidade de São Paulo In: ENCONTRO DA ANPPAS, 2, 2004, Indaiatuba. **Anais...** Belém: Associação Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Ambiente e Sociedade, 2004.

ESTADOS UNIDOS. Department of Energy. **Carbon dioxides emissions from the generation of electric Power in the United States**. Washington: DOE, 2000.

ESTADOS UNIDOS. United States Geological Survey. **Mineral commodities summaries 2009**. Lithium. Washington: USGS, 2009.

GAINES, Linda. Lithium-ion batteries: Material demand and recycling; Center for transportation research, Argonne National Laboratories In: Plug In 2009, Long Beach. **Anais...** Plug In 2009, 2009.

GAINES, Linda; CUENCA, Roy. **Costs of Lithium-Ion Batteries for Vehicles**. Center for transportation Research of the Argonne National Laboratories. Argonne: ANL, 2000.

HUSAIN, Iqbal: **Electric and Hybrid Vehicles: Design fundamentals**. Boca Raton: CRC Press LCC, 2003. 270p.

MATOS, Paulo M.B.: **Simulação de arrancada de veículo em rampa**. 2006. 54p. Monografia (conclusão de curso de especialização). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

NICOLAZZI, Lauro C.: **Análise dinâmica: Curso de especialização em engenharia automotiva**. Florianópolis: UFSC, 2004.

OLIVEIRA, Eude C.: **Modelagem e simulação de veículos elétricos e híbridos**. 2005. 107f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo.

OLIVEIRA, Francisco A.M.O.; SILVA, Rodrigo P.: Uma metodologia para medição de consumo de óleo diesel em ônibus urbanos In: CONGRESSO DE TRANSPORTE E TRÂNSITO, 16, 2007, Maceió. **Anais...** Brasília: Agência nacional de transportes terrestres ANTP, 2007.

OSBORNE, Mark: **PV inverter efficiency record set by Fraunhofer ISE**, 2009. Disponível em: <http://www.pv-tech.org/news/_a/pv_inverter_efficiency_record_set_by_fraunhofer_ise/>. Acesso em: 10 out. 2009

PRICEWATERHOUSECOOPERS: **Demanda Global de Powertrain**. Disponível em: <<http://www.automotivebusiness.com.br/estatisticas.aspx>>. Acesso em: 01 dez. 2009

SINDIPEÇAS. **Levantamento da Frota Circulante Brasileira**, 2009, 12p. Disponível em <http://www.sindipecas.org.br/paginas_NETCDM/modelo_detalhe_generico.asp?subtit=&ID_CANAL=17&id=567>. Acesso em 30 out 2009.

THUNDERSKY BATTERY LIMITED. **Instruction Manual for LFP/LCP/LMC Lithium Power Battery**. Shenzhen: Thundersky Energy Group Limited, 2007, 87p.

WOOLMER, T.J.; MCCULLOCH, M.D. Analysis of the Yokeless and Segmented Armature machine In: ELECTRIC MACHINES & DRIVES CONFERENCE, 1, 2007, Antalya. **Anais...**New York: Institute of Electrical and Electronic Engineers IEEE, 2007.