

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

A TRACÇÃO ELÉTRICA COMO ALTERNATIVA PARA O TRANSPORTE URBANO

por

Alexandre Garcia Bueno

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, maio de 2004

A TRACÇÃO ELÉTRICA COMO ALTERNATIVA PARA O TRANSPORTE URBANO

por

Alexandre Garcia Bueno

Engenheiro mecânico

Dissertação submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Engenharia Automotiva

Orientador: Prof. Dr. Alberto Tamagna

Aprovada por:

Prof. Dr. Pedro Barbosa Mello – PROMEC/UFRGS

Prof. Dr. Paulo Otto Beyer – PROMEC/UFRGS

Prof. Dr. Valner Brusamarello - UCS

Prof. Dr. Jun Sérgio Ono Fonseca
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 17 de maio de 2004.

RESUMO

Este trabalho foi desenvolvido com a finalidade de reunir o conhecimento necessário para a aplicação da tração elétrica no transporte urbano e, desta maneira, auxiliar na diminuição dos impactos nocivos causados pelo homem ao meio ambiente.

É sabido que 80% das emissões jogadas na atmosfera provém do escapamento de veículos equipados com motores de combustão interna. Estas emissões são responsáveis diretas pelo chamado efeito estufa que notoriamente tem causado alterações climáticas indesejadas em nosso planeta. Segundo especialistas, estas alterações no clima já estão ocasionando quebras na produção agrícola, doenças respiratórias e outros problemas sociais.

Visando minimizar estes danos ao ambiente, várias empresas já concluíram que faz-se necessário desenvolver uma tecnologia para tornar nossos veículos menos poluentes. Uma das tecnologias pesquisadas e que mais tem prosperado ultimamente é a da célula de combustível. Independentemente da tecnologia a ser adotada, já é consenso entre os pesquisadores e engenheiros que a tração elétrica será o sistema adotado nos futuros veículos. Seja movido à célula de combustível, baterias ou outro meio, o motor elétrico será o componente principal do veículo do futuro. É imperativo que a tecnologia da tração elétrica seja dominada de maneira a permitir que países em desenvolvimento também possam projetar veículos limpos e assim participar do esforço mundial por um futuro livre do efeito estufa.

Vários países já exploram as vantagens do veículo elétrico. Pode-se encontrar disponíveis comercialmente opções variadas que vão desde motonetas até caminhões e ônibus elétricos. Ainda assim o veículo elétrico não apresenta um preço compatível com a renda da maioria dos habitantes de países em desenvolvimento. Como alternativa a este problema pode-se adotar o processo em que um veículo convencional equipado com motor de combustão interna é convertido para operar através da tração elétrica. Este processo requer um conhecimento específico já que exige habilidade para especificar a potência nominal do motor (e conseqüentemente a faixa de torque em que este operará) e a capacidade do banco de baterias para que se possa atingir a autonomia desejada para o veículo. Para tal fim, o trabalho descreve e valida, através de experimentação, o método proposto pela Bosch para a determinação dos coeficientes de arrasto aerodinâmico e de rolamento. De posse destes coeficientes é possível especificar o motor e baterias a serem utilizados na conversão.

Este trabalho demonstra ainda que o veículo elétrico proporciona mais economia em relação ao veículo convencional ao mesmo tempo que ajuda a reduzir drasticamente a emissão de gases geradores do efeito estufa.

ABSTRACT

The goal of this paper is to gather the knowledge needed to apply the electric drive on the urban transportation helping to minimize threatened impact caused by mankind to the environment.

It is well known that 80% of the emissions released to the atmosphere comes from the exhaust of internal combustion engine vehicles. Those emissions are directly responsible for the green house effect that causes undesirable climate changes in our planet. According to specialists those changes have been responsible for poor harvests, breath diseases and other social catastrophes.

In order to minimize threatens to the environment, several companies have realized it is imperative to develop the technology to make our vehicles pollution-free. One of the technologies that have been researched, the one that has reached more advances, is the fuel cell. Whatever the technology to be used, it is consensus among the designers and engineers that the electric drive will be the system to be adopted on the future vehicles. Whether using a fuel cell, a batteries or other mean, the electric motor will be the main component of the future vehicles. It is very important then to master the electric drive technology in such a way that it allows underdevelopment countries to design clean vehicles and to take part on the world effort for a future free of green house effect.

Several countries already explore the advantages of the electric vehicles. It is possible to find multiple options from electric scooters to buses and trucks. Even with this vast availability, the price of a production type electric vehicle is too expensive to the majority of the people who live in underdevelopment countries. One alternative to this problem is to convert an existing internal combustion engine vehicle to operate with electric drive. The conversion process requires a specific knowledge to allow the designer to specify the motor nominal power and battery capacity. This work describes and validates, through an experiment, the methodology proposed by Bosch to obtain the aerodynamic resistance and rolling coefficients. With those coefficients it is possible to define the motor and batteries models to be used.

The work also shows that the electric vehicle is more economic and helps to reduce green house emissions.

ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Vantagens do veículo elétrico	3
1.2. Mitos sobre os veículos elétricos	9
1.3. Desvantagens.....	11
2. HISTÓRIA DO VEÍCULO ELÉTRICO.....	13
2.1. Três correntes de pensamento	14
3. MOTORES ELÉTRICOS	31
3.1. Constituição de um Motor de Corrente Contínua	33
3.2. Tipos de motores de corrente contínua	35
3.3. Torque em Cada Tipo de Motor CC.....	39
3.4. Velocidade em Cada Tipo de Motor CC.....	41
3.5. Torque Externo, Potência e Velocidade Nominais	43
3.6. Invertendo o Sentido da Rotação	43
3.7. Frenagem regenerativa	44
3.8. Outros tipos de motores.....	45
3.9. Avarias Típicas de um Motor de CC.....	48
4. CÉLULA DE COMBUSTÍVEL	51
4.1. Funcionamento célula de combustível	51
4.2. Membrana de troca de prótons	52
4.3. Problemas com células de combustível.....	55
4.4. Eficiência da célula de combustível	55
4.5. Outros tipos de células de combustível	57
4.6. Aplicação das células de combustível	58
5. BATERIAS	60
6. CONTROLADORES	71
7. VEÍCULOS HÍBRIDOS ELÉTRICOS.....	76
8. CONVERSÃO DE UM VEÍCULO ELÉTRICO – OBTENÇÃO DOS COEFICIENTES DE RESISTÊNCIA	81
8.1. Descrição do problema.....	82
8.2. Carga total de estrada	90
8.3. Procedimento experimental.....	92
8.4. Validação da teoria.....	95

8.5.	Cálculo da potência e capacidade do banco de baterias.....	97
8.6.	Consumo específico	98
8.7.	Especificação do banco de baterias.....	99
8.8.	Reduzindo as emissões veiculares.....	100
8.9.	Avaliação dos resultados.....	101
9.	CONCLUSÃO	102
10.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	104
11.	BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.....	106
	ANEXO A - Veículos elétricos modernos	107
	ANEXO B - Formulário para aquisição dos dados	136
	ANEXO C - Passos para conversão de um veículo equipado com motor de combustão interna para tração elétrica	138

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
A	Área da seção transversal	$[m^2]$
a_1	Desaceleração em alta	$[m/s^2]$
a_2	Desaceleração em baixa	$[m/s^2]$
B	Campo magnético	$[T]$
B_i	Bitola do eixo	$[m]$
C	Constante de perda do pneu	$[m/N]$
C_d	Coefficiente de arrasto aerodinâmico	Adimensional
C_e	Consumo específico	$[kWh/km]$
D	Diâmetro externo do pneu	$[m]$
D_A	Força arrasto aerodinâmico	$[N]$
F	Força	$[N]$
f_0	Coefficiente básico	Adimensional
f_r	Coefficiente de resistência ao rolamento	Adimensional
f_s	Coefficiente de velocidade	Adimensional
g	Aceleração da gravidade	$[9,81 m/s^2]$
H	Altura do veículo	$[m]$
HP	Potência útil do motor	$[HP \text{ ou } kW]$
ht	Altura da seção do pneu	$[m]$
I	Corrente elétrica	$[A]$
I_a	Corrente na armadura	$[A]$
l	Comprimento do condutor	$[m]$
M	Massa total do veículo	$[kg]$
P	Período	$[s]$
P_r	Pressão atmosférica de referência	$[kPa]$
P_{RL}	Potência devido às cargas de estrada	$[W]$
RC	Minutos de reserva (à 75 A)	$[min]$
R_{RL}	Força devido às cargas de estrada	$[N]$
R_x	Resistência ao rolamento	$[N]$
R_{xf}	Resistência ao rolamento eixo dianteiro	$[N]$
R_{xr}	Resistência ao rolamento eixo traseiro	$[N]$

T	Torque interno	[N.m]
t_1	Tempo desaceleração em alta	[s]
t_2	Tempo desaceleração em baixa	[s]
t_{off}	Tempo em estado desligado	[s]
t_{on}	Tempo em estado ligado	[s]
T_r	Temperatura de referência	[°C]
V	Velocidade do veículo	[m/s]
v_1	Velocidade média alta	[m/s]
v_2	Velocidade média baixa	[m/s]
v_{a1}	Velocidade inicial faixa alta	[m/s]
v_{a2}	Velocidade inicial faixa baixa	[m/s]
v_{b1}	Velocidade final faixa alta	[m/s]
v_{b2}	Velocidade final faixa baixa	[m/s]
V_{bat}	Tensão da bateria	[volts]
V_{motor}	Tensão percebida pelo motor	[volts]
W	Peso do veículo	[N]
w	Largura da seção do pneu	[m]
W_r	Peso na roda	[N]
θ	Ângulo de rampa	[°]
ρ	Massa específica	[kg/m ³]

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. TÍTULO	Pág.
1.1 - Veículo elétrico indiano Reva.....	2
1.2 - Toyota RAV4 elétrico.....	3
1.3 - Diagrama de um veículo convencional.....	7
1.4 - Diagrama de um veículo elétrico.....	8
2.1 - Evolução histórica dos veículos modernos.....	13
2.2 - Crescimento da frota de veículos.....	15
2.3 - Detroit elétrico da Sra. Henry Ford.....	17
2.4 - Variação do preço do petróleo de 1860 à 1990.....	21
2.5 - Aumento no registro de veículos.....	21
2.6 - Veículo elétrico GM Impact.....	23
3.1 - Aplicação das leis de Lenz e Faraday.....	32
3.2 - Representação gráfica da lei de Laplace.....	32
3.3 - Esquema de funcionamento de um motor elétrico.....	33
3.4 - Constituição de um motor elétrico de corrente contínua.....	33
3.5 - Coletor de um motor elétrico.....	34
3.6 - Constituição de um motor elétrico.....	35
3.7 - Classificação de motores elétricos.....	36
3.8 - Esquema de ligação de um motor série.....	36
3.9 - Torque versus Corrente da armadura (Fonte Melo Neto).....	40
3.10 - Velocidade dos motores CC em relação à corrente da armadura (Fonte Melo Neto).....	41
3.11 - Relação de torque-carga e velocidade-carga para motores CC (Fonte Melo Neto).....	43
3.12 - Inversão da rotação em motores compostos.....	44
3.13 - Motor Advanced DC em corte.....	50
4.1 - Nocar, protótipo da Daimler-Chrysler movido à célula de combustível.....	51
4.2 - Célula de combustível adaptável à um veículo elétrico (Fonte site How Stuff Works).....	52
4.3 - Componentes de uma célula de combustível tipo PEMFC.....	52
4.4 - Equação eletro-química de uma célula de combustível.....	53
4.5 - Reações químicas em uma célula de combustível.....	54
5.1 - Célula completamente carregada.....	61
5.2 - Célula sendo descarregada.....	62

5.3 - Célula completamente descarregada.....	62
5.4 - Célula sendo recarregada.	63
5.5 - Curva ideal de carga para uma bateria chumbo-ácido (Fonte Brant, 1994).	68
6.1 - Controle tipo interruptor simples	73
6.2 - Controle com resistência.....	73
6.3 - Controle com alternância de bancos de baterias	74
6.4 - Circuito de controle eletro-mecânico	74
6.5 - Controlador Curtis CC.	75
7.1 – Esquema de um híbrido tipo série	76
7.2 – Esquema de um híbrido tipo paralelo.....	77
7.3 - Honda Insight híbrido	78
7.4 - Toyota Prius híbrido	78
7.5 - Esquema do protótipo do veículo híbrido International	79
7.6 - Chassi híbrido International.....	80
7.7 - Veículo híbrido International (Van UPS)	80
8.1 - Coeficientes típicos de arrasto aerodinâmico (Fonte Gillespie)	84
8.2 - Gráfico resistência ao rolamento e temperatura do pneu (Fonte Gilliespie)	86
8.3 - Gráfico resistência ao rolamento e pressão interna (Fonte Gillespie)	87
8.4 - Gráfico resistência ao rolamento e velocidade (Fonte Gillespie)	88
8.5 - Gráfico para determinação de f_{θ} e f_s (Fonte Gillespie).....	90
8.6 - Veículo utilizado para validação do método.....	97
8.7 - Gráfico Tempo x Corrente para diversos modelos de baterias (Fonte Brant)	100

ÍNDICE DE TABELAS

Tab.	TÍTULO	Pág.
2.1	- Veículos elétricos japoneses da década de setenta.	27
2.2	- Veículos elétricos modernos	30
3.1	- Quadro Comparativo de Motores de CC	48
8.1	- Valores típicos para o coeficiente de resistência ao rolamento	89
8.2	- Dados do problema	91
8.3	- Calibração do velocímetro do veículo testado (em km/h)	94
8.4	- Resultados obtidos no experimento	95

1. INTRODUÇÃO

Há muito tempo a humanidade tem buscado alternativas para o transporte urbano, principalmente nas grandes metrópoles, visando minimizar o impacto causado pelos atuais meios de transporte baseados nos motores de combustão interna. O problema de tais motores é o fato de estes serem altamente poluentes e de baixíssima eficiência. A quantidade de gases, como CO₂, CO, NO_x e outros, jogados na atmosfera diariamente, tem crescido a níveis nunca antes vistos. De acordo com a Energy Information Administration dos Estados Unidos, o aumento nas emissões de CO₂ de 1990 à 1995 foi de 5%. Estes gases são os maiores causadores de danos ao meio ambiente, visto que, são os responsáveis diretos pelo efeito estufa.

Já está cientificamente comprovado que a maior parcela do CO₂ presente na atmosfera é gerado na descarga de automóveis, ônibus e caminhões que trafegam diariamente nos grandes centros urbanos. A poluição do ar é, sem dúvida, o problema mais importante a ser resolvido. Pode-se ficar semanas sem comida, dias sem água, mas apenas alguns minutos sem ar. Alguns destes centros, como a cidade de Los Angeles nos Estados Unidos, já adotam leis que prevêm a utilização progressiva de meios de transporte menos danosos ao ambiente como os LEV (Low Emission Vehicle) ou veículo de baixa emissão. Os mesmos são basicamente veículos híbridos elétricos que utilizam um motor de combustão interna operando em uma determinada rotação onde sua eficiência é maximizada. Este motor de combustão interna aciona um gerador elétrico que por sua vez fornece energia a um motor elétrico responsável pela tração do veículo. Alguns modelos de LEVs podem ser facilmente encontrados à venda em diversos estados daquele país.

Muitas empresas têm pesquisado a célula de combustível como alternativa para substituir o motor de combustão interna e o gerador. Os veículos equipados com células de combustível e motores elétricos são classificados como ZEV (Zero Emission Vehicle) ou veículo de emissão nula.

O veículo elétrico convencional, composto basicamente por um motor elétrico, controlador e baterias, aparece como solução mais viável para países do terceiro mundo como o Brasil. Por sua concepção, ele é classificado como um ZEV. Na Índia, por exemplo, foi lançado em 2002 o Reva (figura 1.1), um automóvel elétrico que se propõe a ser o mais barato e menos poluente meio de transporte urbano daquele país. Grandes empresas americanas estão presentes na coordenação deste projeto, o que demonstra um crescente interesse no potencial comercial deste tipo de transporte.

O veículo elétrico convencional, apesar das suas limitações de velocidade e autonomia, é a base para os veículos híbridos ou para os que operam com células de combustível. Por esta

razão, acredita-se ser recomendável o desenvolvimento desta tecnologia também em nosso país. No momento em que a tecnologia da célula de combustível for plenamente dominada, a conversão dos veículos elétricos convencionais existentes será uma alternativa de baixo custo. Enquanto este dia não chega, o veículo elétrico pode ser utilizado no transporte urbano para pequenas distâncias (menores do que 80 km).

No Japão (Kioto) estão sendo colocados em prática programas como o “Public Car” onde carros elétricos são colocados à disposição para pessoas transitarem pela cidade indo, por exemplo, de casa para uma estação de trem ou vice-versa. Estes carros são chamados de “commuters” e normalmente acomodam duas pessoas.



Figura 1.1 - Veículo elétrico indiano Reva.

Além de auxiliar na solução do problema referente à poluição, o veículo elétrico convencional é um grande aliado na redução da dependência econômica dos combustíveis fósseis. Este ponto é de fundamental importância, visto que, é sabido que tal fonte energética está se esgotando o que torna sua prospecção altamente dispendiosa. Junte-se a isso, o fato de que o veículo elétrico convencional é mais econômico do que os atuais com motores de combustão interna na sua faixa de utilização.

O nicho de mercado para veículo elétrico certamente não é o de SUV's (sport utility vehicle) ou utilitários como chamamos no Brasil. A Toyota lançou em março de 2002 o RAV4, um SUV, inteiramente elétrico (ver figura 1.2). Um ano mais tarde o produto foi retirado do mercado sob a legação de que tinha pouca procura. É obvio que um veículo que custa o dobro do preço de sua versão original deve ter tido uma baixa procura. Quem estaria interessado em gastar US\$ 42.000 em uma SUV com limitação de autonomia?



Figura 1.2 - Toyota RAV4 elétrico.

1.1. Vantagens do veículo elétrico

1.1.1. Emissão nula de poluentes

O aquecimento global é hoje uma realidade. Não é algo que os cientistas estão estudando para prevenir seus malefícios sobre a vida na terra daqui a, digamos, cem anos. Nos jornais lê-se sobre as altas temperaturas encontradas em algumas regiões do planeta causando inundações e destruição. Vê-se a enorme geleira Larsen B que em março de 2002 partiu-se em milhares de icebergs devido ao aumento da temperatura média global.

O aquecimento global é causado, na sua maior parte, pelo efeito estufa. O conteúdo de CO₂ de nossa atmosfera vem aumentando exponencialmente desde a revolução industrial e, segundo Moore, 2002, o grande vilão da história é o automóvel. Mesmo com os avanços da eletrônica o motor de nossos automóveis continua jogando diariamente na atmosfera toneladas de partículas pesadas e gases contaminantes. Como a quantidade de veículos em circulação aumenta de forma desorganizada, é de se esperar que o efeito de aquecimento global venha a piorar ainda mais. O CO₂ jogado na atmosfera age como um escudo que permite a passagem da radiação solar de alta frequência ao mesmo tempo que impede a saída da radiação na baixa frequência. Este efeito é o mesmo utilizado em estufas por produtores de hortigranjeiros. Para as pessoas e animais este efeito é extremamente prejudicial.

Analisemos então, as entradas e saídas dos dois motores em questão. O motor de combustão interna precisa, além do combustível que pode ser gasolina, diesel, gás ou álcool, também de outros fluidos igualmente danosos como óleos e aditivos. A geração e o transporte destes compostos também precisa ser feito com muito cuidado. Acidentes semelhantes ao que aconteceram com o petroleiro Exxon Valdez no Alasca destroem totalmente o meio ambiente no entorno. As saídas de um motor de combustão interna são igualmente perigosas. Os gases e

partículas geradas na descarga de um veículo convencional contribuem grandemente para a degradação da atmosfera. Deve-se considerar também os filtros e óleos que devem ser descartados regularmente para manter o motor de combustão interna funcionando de maneira eficiente. Já em um veículo elétrico, temos na entrada a eletricidade. Na saída, nada. Até mesmo as baterias, consideradas por muitos um componente perigoso, podem ser até 97% recicladas.

A utilização de veículos elétricos no Brasil daria uma contribuição ainda maior para a redução do efeito estufa pois, nossa energia elétrica é gerada principalmente por hidrelétricas. O potencial hídrico brasileiro é enorme. Mesmo assim, a nossa energia elétrica é uma das mais caras do mundo, culpa dos altos impostos pagos pelo consumidor e utilizados principalmente para cobrir a ineficiência do sistema. Nos EUA o kWh é vendido em média à US\$ 0,05 . No Brasil o mesmo kWh é chega ao consumidor por US\$ 0,15. Apesar do preço pago no Brasil pela energia elétrica ser 200% maior, veremos que o veículo elétrico ainda é mais econômico.

1.1.2. A economia do veículo elétrico

Apesar das altas taxas e impostos pagos por nós brasileiros, o veículo elétrico ainda assim seria mais econômico do que o veículo com motor de combustão interna. Vejamos um exemplo prático: A *pick-up* Ranger mostrada no livro “*Build Your Own Electric Vehicle*” de Bob Brant, 1994, convertida para tração elétrica possui um custo operacional de 1,37 centavos de dólar por quilômetro (algo como 4 centavos de Real por quilômetro considerando R\$ 2,90/US\$). Chegamos a este valor multiplicando seu consumo específico de 0,27 kWh/quilômetro pelo custo da energia elétrica nos EUA que é, em média, cinco centavos de dólar por kWh. A Ranger original, com o velho conhecido motor de combustão interna, custa 5,75 centavos de dólar por quilômetro (16,76 centavos de Real por quilômetro) obtidos da seguinte maneira:

Consumo médio 8,5 km/litro à US\$ 0,33/litro = 3,89 centavos de dólar/quilômetro. Adiciona-se a isto 1,86 centavos/quilômetro devido a gastos diversos como óleo, fluidos, filtros e outros consumíveis necessários à uma média de US\$ 30/mês considerando também 19300 quilômetros rodadas por ano (12 meses* US\$ 30/19300 quilômetros/ano = 1,86 centavos de dólar/quilômetro).

Em resumo, a *pick-up* convencional tem um custo operacional até quatro vezes maior do que a similar elétrica. No Brasil, mesmo com o alto preço da energia elétrica, pode-se ter o mesmo veículo gastando cerca de duas vezes mais por quilômetro quando comparado com o veículo elétrico (sem considerar os consumíveis). Seria o mesmo que ter uma *pick-up* Ranger

que fizesse 18 quilômetros por litro de gasolina o que sabemos ser impossível. Considerando o fato de que o consumo específico de um veículo elétrico pode ser reduzido ainda mais com a adoção de alterações de projeto, podemos conseguir veículos ainda mais econômicos. O modelo Impact da GM possuía um consumo específico de apenas 0,06 kWh/quilômetro o que nos leva a um custo de 0,3 centavos por quilômetro (ou 0,90 centavos de Real por quilômetro) nos EUA.

Atualmente o custo para se adquirir um veículo elétrico pronto de fábrica é muito maior do que aquele para adquirir um veículo com motor de combustão interna similar. Como exemplo, pode-se citar o Toyota RAV4 elétrico, que custava US\$ 42.500 enquanto que o mesmo modelo convencional custa US\$ 18.000 nos EUA. O governo americano possui várias linhas de crédito e incentivos aos consumidores que decidirem adquirir um veículo elétrico. Segundo o California Air Resources Board (CARB) o comprador de um RAV4 elétrico pode receber um bônus de até US\$ 9.000 dividido num prazo de até 3 anos.

Há ainda a possibilidade de conversão de um veículo convencional para elétrico, alternativa esta considerada a mais econômica. Existem também incentivos relacionados ao custo da energia elétrica que é subsidiado em parte para os proprietários de veículos elétricos em alguns estados nos EUA. No Brasil, o único subsídio que se tem no momento é a isenção do IPVA (Imposto sobre Propriedade de Veículo Automotor) concedido pelo governo.

Os motores de combustão interna têm um grande inconveniente: possuem baixíssima eficiência raramente ultrapassando trinta por cento. O motor de combustão interna é, talvez, o equipamento menos eficiente já construído pelo homem. Em alguns casos cerca de somente 15% do poder calorífico do combustível é aproveitado como energia útil no eixo. As numerosas explosões – cerca de 100 a cada segundo - têm de ser contidas por um invólucro resistente, geralmente um bloco de ferro fundido. Precisam de sistemas auxiliares para seu correto funcionamento o que contribui sobremaneira para aumentar a sua ineficiência.

Os sistemas auxiliares são:

- Sistema de arrefecimento: responsável pela eliminação do calor em excesso gerado no cilindro do motor. Esta energia não utilizada, e que deve ser expulsa sob pena de danificar o motor, é gerada por diversos meios. A queima do combustível e o atrito entre as partes móveis são os principais. Este sistema compõe-se de radiador, bomba d'água, tubulações, válvulas, ventiladores, correias, etc. Todos estes componentes apenas consomem energia do sistema para operar.

- Sistema de alimentação: este sistema é o que menos penaliza o motor. Na maioria das vezes o próprio movimento do êmbolo dentro do cilindro promove a admissão da mistura ar/combustível. É composto por filtros, tubulações, carburador ou bomba injetora e outros;
- Sistema de exaustão: sua função é retirar os gases queimados de dentro do cilindro permitindo que nova mistura entre e continue o ciclo. Além de retirar os gases este sistema também é responsável pelo abafamento do ruído gerado no interior do cilindro. Sua composição é válvulas, tubulações, silenciadores, etc.;
- Sistema elétrico/ignição: Neste sistema é gerado a eletricidade necessária para a geração da faísca ou para alimentar a bateria que por sua vez garante o funcionamento dos dispositivos elétricos do veículo. Neste sistema encontramos módulos eletrônicos, cabos, velas, bobinas, alternador e outros;
- Sistema de lubrificação: mantém as centenas de peças móveis do motor de combustão interna com baixo nível de atrito minimizando o desgaste das mesmas. É composto por bombas e tubulações;
- Sistema de partida: sem este sistema é impossível fazer o motor entrar em funcionamento. O motor de combustão interna necessita de um pequeno motor elétrico, o motor de partida, para fazê-lo girar à uma determinada rotação o que possibilita o início do ciclo térmico.

Além de consumir uma energia preciosa, é muito complicado manter estes sistemas funcionando corretamente. A complexidade significa que mais coisas podem dar errado resultando num maior número de intervenções para manutenção e altos custos de reparo. A figura 1.3 mostra um diagrama esquemático da composição de um veículo equipado com um motor de combustão interna.

Em contraste às centenas de peças móveis de um motor de combustão interna o motor elétrico possui somente uma peça móvel, o rotor. É por esta razão que o motor elétrico é mais eficiente e mais confiável do que o motor de combustão interna. Para obter um veículo elétrico a partir de um veículo convencional, retira-se o motor e todos os componentes auxiliares inúteis como radiador, filtros, tubulações, carburador, bombas, silenciadores, ventiladores, correias, alternador, motor de partida, tanque de combustível e colocamos em seu lugar um motor elétrico, um banco de baterias e um controlador. A figura 1.4 mostra o quão simples um veículo elétrico é em relação ao convencional mostrado no diagrama anterior.

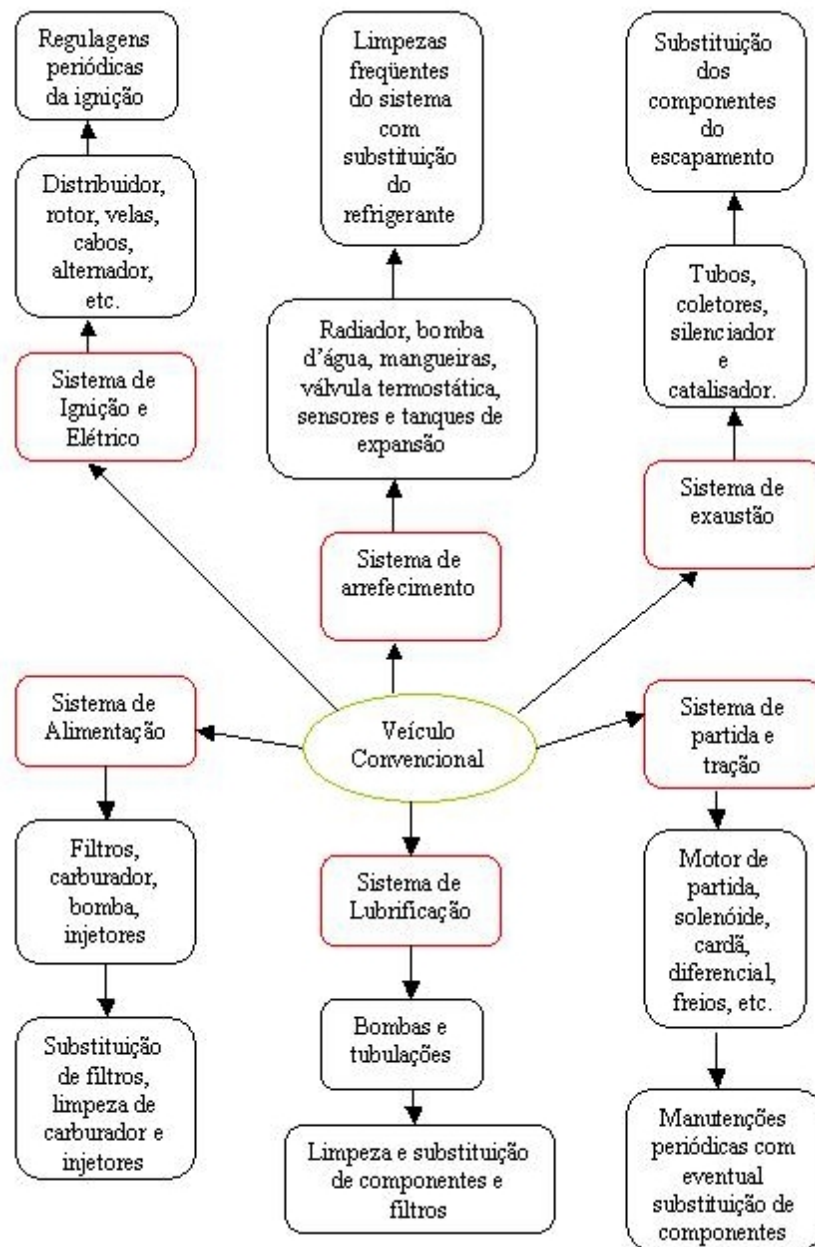


Figura 1.3 - Diagrama de um veículo convencional

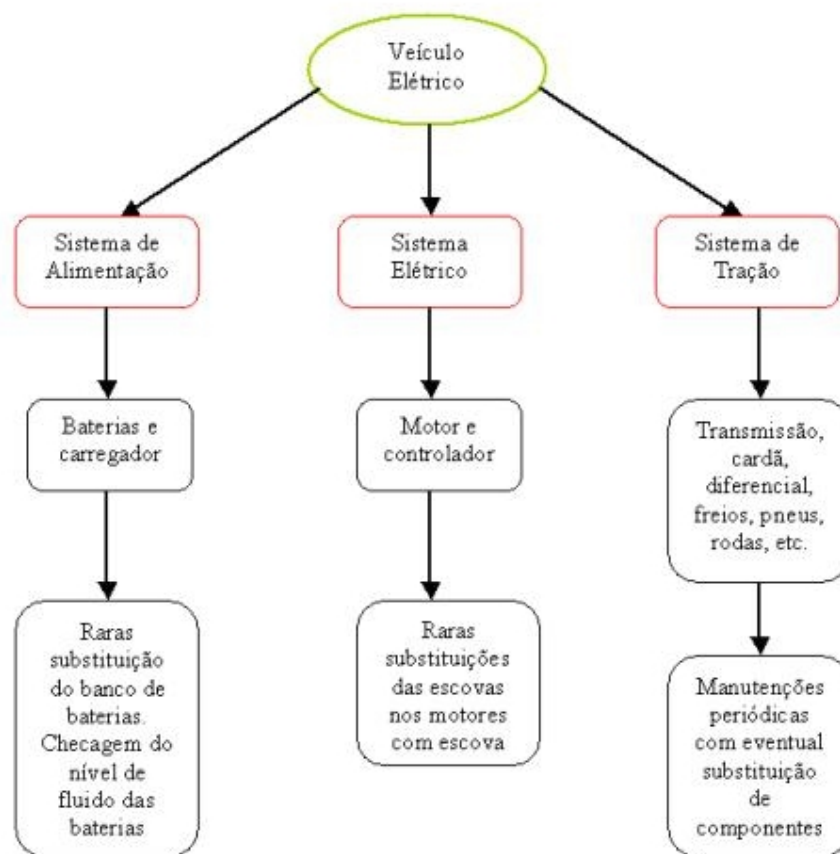


Figura 1.4 - Diagrama de um veículo elétrico

1.1.3. A segurança do veículo elétrico

Os veículos elétricos são projetados visando a segurança desde sua fase inicial. Eles são chamados nos EUA de ZEV ou veículos de emissão nula, isto por que, nada é gerado estando ele em movimento ou parado. De fato, quando parado, o veículo elétrico nem mesmo consome energia. Os veículos convencionais não apenas consomem combustível quando estão se movendo como produzem a maior quantidade de poluentes quando parados em marcha lenta. Por esta razão é que não se pode permanecer num ambiente fechado com um veículo convencional nesta condição, pois, isto certamente levará o condutor à morte por asfixia. Por esta característica o veículo elétrico é considerado o transporte ideal para grandes cidades onde há necessidade de constantes paradas no trânsito congestionado.

Também por não carregar combustíveis inflamáveis, circuitos de ignição de 10.000 volts potencias geradores de faíscas, componentes do escapamento, catalisadores e radiadores à altas temperaturas o veículo elétrico se torna um transporte mais seguro.

As baterias de um veículo elétrico, apesar de eliminarem H_2 durante a carga e conterem ácido sulfúrico em solução, não representam falta de segurança para as pessoas próximas. Durante a carga das baterias o gás hidrogênio gerado deve ser retirado do compartimento através de ventiladores. No caso do ácido sulfúrico, apesar de poder causar dano quando derramado, ele pode ser facilmente controlado pela diluição com água. Este problema não é encontrado quando se usa baterias do tipo AGM ou *absorbed glass matt*, baterias de gel ou de níquel Cádmio pois estas não possuem o eletrólito na forma líquida.

1.2. Mitos sobre os veículos elétricos

1.2.1. Velocidade

Há um mito que diz que o veículo elétrico não pode se deslocar com velocidade suficiente. Hoje em dia, pode-se projetar um veículo elétrico para praticamente quaisquer velocidades normais de uso. A velocidade de um veículo elétrico está diretamente relacionada com o seu peso, coeficiente de arrasto aerodinâmico da carroceria, coeficiente de rolamento, tamanho do motor e tensão do sistema. Quanto maior a tensão, maior o número de baterias e maior é a velocidade que um dado motor elétrico pode imprimir a um veículo elétrico, pois pode-se usar motores mais potentes e, ainda assim, manter correntes compatíveis com os controladores existentes. Em contrapartida, quanto maior o número de baterias, mais pesado fica o veículo. Deve-se portanto balancear o projeto do veículo elétrico para se obter a velocidade desejada.

1.2.2. Autonomia

Acredita-se que o veículo elétrico apresenta uma restrição de autonomia. A verdade é que o veículo elétrico pode ir tão longe quanto for necessário. O importante é definir o quanto de autonomia é necessário. Hoje em dia o veículo elétrico aplica-se como substituto de um veículo urbano, ou seja, para distâncias relativamente curtas e médias. Pesquisas indicam que a distância média percorrida no deslocamento dentro de uma cidade é de 16 km. Esta média não tem variado muito nos últimos 20 anos de coleta de dados. Um estudo recente mostrou que 98% de todos os deslocamentos são menores do que 80 quilômetros por dia. A maioria das pessoas dirigem nas proximidades e raramente utilizam o veículo para longas distâncias. Viagens acima de 160 km são apenas 17% da distância total percorrida.

Uma pesquisa da General Motors publicada no livro de John R. Dables, 1992, envolvendo proprietários de Boston, Los Angeles e Houston afirma que:

- A maioria das pessoas não dirige muito longe;
- Mais de 40% de todos os deslocamentos são abaixo de 8 km;
- Apenas 8% de todos os deslocamentos foram maiores do que 40 km;
- Aproximadamente 85% de todos os motoristas dirigiram menos de 120 km por dia.

Todos os veículos elétricos com sistemas de 120V disponíveis, hoje em dia, podem percorrer 120 km usando componentes de prateleira, se mantiverem a massa abaixo de 1.360 quilogramas. isto significa que um veículo elétrico pode atender mais de 85% das necessidades médias. Caso o veículo seja usado para o deslocamento para o trabalho e este possua uma tomada elétrica disponível, pode-se dobrar a autonomia caso este seja recarregado durante o expediente.

1.2.3. Conveniência

Atualmente as cidades brasileiras não possuem pontos de recarga para veículos elétricos, entretanto, eletricidade pode ser facilmente encontrada em qualquer lugar. Recarregar as baterias de um veículo elétrico é uma operação simples. Apesar da falta de pontos de recarga específicos, os veículos elétricos modernos possuem um carregador embarcado e uma extensão. Pode-se então recarregar suas baterias em qualquer tomada elétrica de 127/220 Volts. No futuro talvez tenha-se estações de recarga ou até mesmo lugares onde se poderá substituir o banco de baterias por um outro previamente recarregado.

1.2.4. Custo

Quando se fala em veículos elétricos manufaturados em série, o preço não é competitivo para a maioria das pessoas. Isto por que os volumes ainda são muito pequenos o que encarece o custo dos componentes utilizados. À medida em que as montadoras inserirem os veículos elétricos na relação de seus produtos principais e possuírem linhas de montagem dedicadas estes custos cairão significativamente. Enquanto isto não acontece, a conversão é o meio mais barato de se obter um veículo elétrico. Outra opção é o uso de NEVs (Neighborhood Electric Vehicles) que são veículos destinados à utilização em subúrbios ou zonas centrais onde os limites de velocidade e a autonomia necessária são menores. Estes veículos, por serem uma evolução dos

carros de golfe elétricos, são mais baratos. Normalmente utilizam sistemas de 48 V e possuem baterias chumbo/ácido comuns.

A terceira opção seria a utilização de comutadores que são veículos elétricos convencionais mas que geralmente abrigam no máximo duas pessoas. Possuem autonomia e velocidades maiores do que os NEVs e , por esta razão, custam mais caro.

Independente da escolha, deve-se levar em consideração a economia trazida pelo veículo elétrico na sua operação diária. Viu-se que o veículo elétrico é mais econômico do que um veículo convencional e pode-se facilmente demonstrar que o investimento tem retorno a médio prazo.

1.3. Desvantagens

1.3.1. Grandes deslocamentos

Os veículos elétricos não são ideais nos casos em que há necessidade que se deslocar grandes distâncias de uma só vez. Devido às restrições na tecnologia das baterias ainda não se pode armazenar grandes quantidades de energia num volume e peso restritos. Isto faz com que a autonomia dos atuais veículos elétricos fique em torno de 60 à 120 km podendo chegar, em alguns casos, a 200 km.

1.3.2. Falta de opções disponíveis no mercado

Não há ainda veículos elétricos disponíveis para atender à demanda reprimida que existe atualmente. A solução para este problema seria a conversão de um veículo convencional o que requer prática e habilidades mecânicas e elétricas. A falta de opções em nosso país para compra de componentes, como motores sem escova, baterias e controladores, torna a conversão uma tarefa difícil, demorada e cara.

1.3.3. Falta de oficinas especializadas

Uma eventual frota de veículos elétricos não contaria ainda com uma rede de agentes especializados na sua manutenção. Isto pode ser um problema para aquelas pessoas que não dispõe de recursos ou conhecimentos para fazer os reparos necessários no seu próprio veículo.

1.3.4. Opcionais como ar condicionado, ar quente, direção assistida e outros

Os opcionais como ar condicionado, aquecimento ou direção assistida podem representar uma demanda extra de potência da ordem de até 20%. Este valor não é suportado pelo atual estágio da tecnologia do veículo elétrico e suas baterias. A utilização destes causaria uma redução drástica na já reduzida autonomia do veículo elétrico quando comparada aquela obtida pelo veículo convencional. Se estes itens são importantes, o uso do veículo elétrico para esta aplicação deveria ser reavaliada.

No anexo A encontra-se uma relação de veículos elétricos modernos e seus dados técnicos e preços onde pode-se verificar a ampla gama de velocidades e autonomies disponíveis.

2. HISTÓRIA DO VEÍCULO ELÉTRICO

A tecnologia do veículo elétrico não é nova. De acordo com Brant, 1994, o veículo elétrico foi concebido bem antes do veículo com motor de combustão interna. Eles provavelmente coexistirão por algum tempo para em seguida ver-se a extinção do veículo convencional como é conhecido hoje. A figura 2.1, divulgada por Brant, mostra que a história dos veículos modernos se divide em três fases distintas:

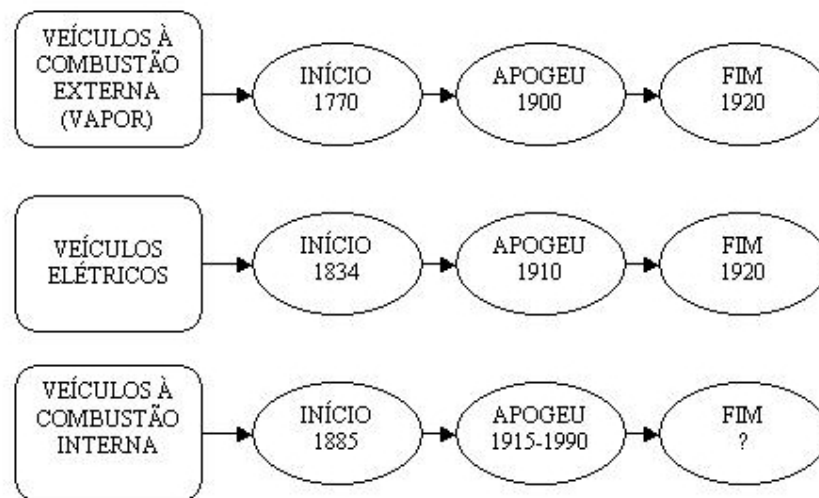


Figura 2.1 - Evolução histórica dos veículos modernos

Como mostra Brant, o período até 1915 marcou a transição entre a novidade e a produção de fato. Naquele momento, após mais de três mil fabricantes terem surgido e desaparecido, os que restaram dividiram-se em dois grupos: aqueles que conseguiam grandes lucros vendendo produtos customizados a preços altos e aqueles que ofereciam soluções padronizadas com baixo preço. A oferta de veículos elétricos e a vapor foi lentamente sendo substituída pela de veículos com motor de combustão interna devido à farta oferta de petróleo a preços muito baixos e terminou virtualmente desaparecendo após 1915.

Entre 1915 e 1990 o veículo de combustão interna teve sua era de ouro. Com a gasolina sendo oferecida a preços baixos e com a tecnologia do motor de combustão interna plenamente desenvolvida, os preços dos veículos convencionais ficaram ao alcance de praticamente todos. O crescimento das cidades fez com que o veículo se tornasse uma necessidade. A criação de uma estrutura de rodovias facilitou sobremaneira a expansão da frota de veículos.

Entre meados dos anos sessenta até os dias atuais diversos indivíduos e organizações começaram a levantar questões importantes referentes aos danos que os veículos equipados com

motores de combustão interna estavam causando ao meio ambiente e, por conseqüência, à vida das pessoas. Os constantes embargos à produção de petróleo impostos pelos países produtores, os graves acidentes causados no transporte e produção destes combustíveis fósseis e o crescente custo de exploração destes, contribuíram para dar início à uma discussão que hoje chega a seu ápice: Qual será o futuro do veículo equipado com motor de combustão interna? O resultado destas discussões levou ao ressurgimento do interesse pelos veículos elétricos e fontes renováveis de energia. A análise dos três estágios da história dos veículos ajuda a entender por que os veículos elétricos vieram, desapareceram e estão novamente em voga.

2.1. Três correntes de pensamento

Os veículos à vapor vieram primeiro seguidos pelos elétricos e, por fim, pelos dotados de motores de combustão interna. A proximidade com as reservas de carvão e ferro encontradas nos países ao norte do equador, chamados posteriormente de industrializados, tornou prática a utilização do motor a vapor, entretanto, o grande crescimento e a revolução econômica trazidos por ele aos países como os Estados Unidos, Inglaterra e outros da Europa, no período pós-industrial, foi de fundamental importância para o surgimento de invenções que se utilizavam da eletricidade. Foram estes dispositivos elétricos, como por exemplo o motor de partida, que tornaram o motor à combustão interna possível. Os veículos movidos por estes motores elétricos seguiram praticamente a mesma seqüência de desenvolvimento.

Com uma grande parte da população vivendo em áreas rurais, os Estados Unidos do início do século, foi um ambiente promissor para o desenvolvimento dos veículos à vapor. Apesar de existirem poucas ferrovias, elas ofereciam um transporte seguro e eficiente quando comparado, por exemplo ao preço dos veículos disponíveis na época. Segundo Brant, 1994, uma passagem de Nova Iorque à Califórnia custava U\$ 50, um veículo de qualquer tipo custava de U\$ 5.000 à 50.000 em valores de hoje. Isto fazia com que o veículo particular fosse um sonho de consumo quase inatingível.

Os três tipos de veículos chegaram neste ambiente de virada de século nos EUA. Cerca de 3.000 fabricantes experimentaram várias combinações de propulsão (vapor, eletricidade e combustão interna) , combustível (carvão/querosene, baterias e gasolina/diesel), arrefecimento (ar e água), posição do motor (frontal, intermediário e traseiro), tração (dianteira ou traseira através de cardan, correia ou corrente), chassi (três ou quatro rodas, suspensão independente ou molas helicoidais/feixe) e pneus (com ar ou sólidos). Após a Segunda Guerra Mundial o veículo com motor à combustão interna consagrou-se vitorioso sobre os demais.

O gráfico da figura 2.2 divulgado no livro de Brant, mostra a evolução da população de veículos dos três tipos (vapor, elétrico e combustão interna) de 1900 à 2000. Os veículos à vapor, muito populares no final do século 19, cederam espaço para os outros dois tipos de motorização nos primeiros anos do século 20. Os veículos elétricos tiveram um rápido crescimento e se popularizaram até cerca de 1910. Após esta fase, seu crescimento foi refreado até seu ressurgimento nos anos noventa. Os veículos à combustão interna passaram os outros dois no início do século 20. O fator mais importante para este crescimento foi a oferta barata e quase ilimitada de petróleo o que manteve o preço da gasolina entre dez e vinte centavos de dólar por galão (3,78 litros) de 1900 à 1920 suprimindo o interesse nas outras alternativas disponíveis por mais de 50 anos.

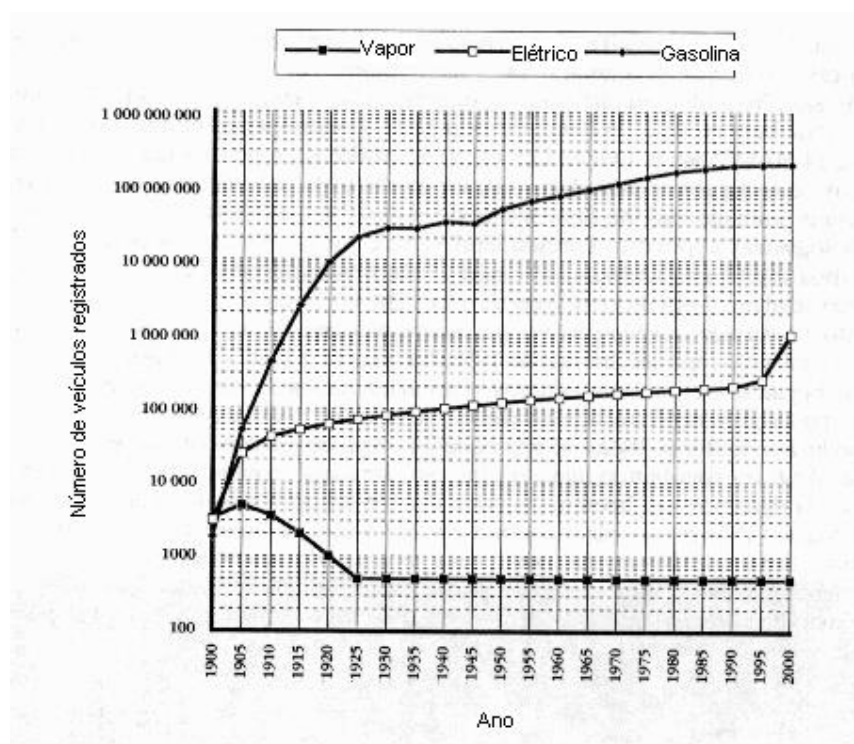


Figura 2.2 - Crescimento da frota de veículos.

Brant ainda mostra que o motor a vapor de James Watt de 1765, que foi amplamente aclamado como responsável pela revolução industrial, era uma evolução baseada em uma máquina criada por Thomas Newcomen em 1712 que, por sua vez, havia se baseado em uma mais primitiva construída em 1690 por Denis Papin, Christian Huygens e Robert Boyle e na patente de Thomas Savery de 1698. A tecnologia do vapor foi aplicada pela primeira vez em um veículo terrestre no trator de Nicolas Cugnot em 1770. Um bote a vapor foi criado em 1787 por John Fitch e uma locomotiva em 1804 por Richard Trevithick.

O problema básico dos veículos a vapor é exatamente o vapor. A água precisa de uma grande quantidade de calor para se transformar em vapor e congela a baixas temperaturas. Para solucionar estes problemas e também os relacionados com ao tempo de partida, complexidades tecnológicas foram incorporadas na forma de líquidos especialmente criados para suportar as repetidas evaporações e condensações e ligas especiais para as caldeiras, válvulas, tubulações e trocadores.

No início de 1900, os veículos a vapor ofereciam de maneira inquestionável suavidade, operação silenciosa e aceleração suficiente. As paradas para reabastecimento de água eram geralmente mais freqüentes do que as paradas para reabastecimento de querosene trazendo ainda mais complexidades ao projeto e seqüências de partida mais longas. Ainda que 40% dos veículos vendidos em 1900 eram a vapor (38% eram elétricos), os elétricos ofereciam simplicidade, confiabilidade e facilidade de operação, enquanto os veículos à gasolina ofereciam maior autonomia. Devido a isto os veículos a vapor foram sendo substituídos com o passar do tempo e hoje poucos sobraram.

A eletricidade está em todo o lugar seja alimentando uma fábrica ou conduzindo uma mensagem ou até mesmo tracionando um veículo elétrico. A eletricidade é transportável, ou seja, pode ser gerada em um ponto para ser consumida à vários de quilômetros de distância. Na sua maioria a eletricidade gerada no Brasil provém de usinas hidrelétricas que são sabidamente não poluentes (fontes renováveis). A herança elétrica, porém, deve-se a alguns pioneiros.

Segundo Brant, Alessandro Volta, baseando-se em experimentos de 1782 de Luigi Galvani, inventou a bateria elétrica, ou pilha voltaica, em 1800. Joseph Henry, espelhou-se em experimentos de Han Christian Orested em 1819 e Andre Ampere em 1820 e criou o primeiro motor elétrico de corrente contínua em 1830. Michael Faraday demonstrou o princípio da indução e o primeiro gerador elétrico de corrente contínua em 1831. O primeiro veículo elétrico movido à bateria foi criado em 1834 por Thomas Davenport. Depois disso, no mesmo ano, surgiu o primeiro barco elétrico por M. H. Jacobi e a primeira locomotiva elétrica, a Galvani de 5 toneladas, em 1838 por Robert Davidson.

Moses Farm demonstrou seu carro elétrico em 1847 e Charles Page um carro elétrico capaz de atingir 32 km/h em 1851. A bateria de chumbo-ácido recarregável de Gaston Plante, melhorada por Camille Favre em 1881 e H. Tudor em 1890, abriu caminho para ampliar o uso do veículo elétrico. O motor de corrente alternada de Nikola Tesla de 1882 e as subseqüentes patentes de motores polifásicos por sua vez abriram caminho para a estrutura de distribuição da energia elétrica que usa-se hoje em dia.

Em 1912, 34.000 veículos elétricos foram registrados nos EUA. O sucesso dos veículos elétricos naquela época devia-se a vários fatores dentre eles:

- a maioria das estradas pavimentadas encontravam-se em zonas urbanas;
- a energia elétrica estava convenientemente disponível;
- as distâncias eram relativamente curtas;
- os limites de velocidade eram baixos e,
- a segurança, o conforto e conveniência eram considerações primárias para a compra.

A suavidade, facilidade de dirigir, e alta confiabilidade fizeram dos veículos elétricos a escolha favorita dos membros mais abastados das cidades principalmente das mulheres da alta sociedade. Clara Bryant Ford (esposa de Henry Ford) podia ter o veículo que quisesse mas escolheu o Detroit elétrico para suas andanças pela cidade (ver figura 2.3).

O veículo elétrico de Thomas Edison de 1889 foi a plataforma de testes para seus experimentos com baterias de níquel-ferro. Mais tarde, estas baterias foram usadas nos veículos Bailey e em vários outros elétricos da época. Edison tinha seu próprio Studebaker elétrico e, juntamente com Henry Ford, foram ferrenhos defensores dos veículos elétricos. Segundo Stern, certa vez os dois planejaram produzir um veículo elétrico leve que custaria US\$ 750 que seria chamado de Edison-Ford.



Figura 2.3 - Detroit elétrico da Sra. Henry Ford.

Ainda de acordo com Brant, 1994, os veículos elétricos também dominaram o segmentos de frotas em áreas urbanas em diversas partes do mundo. Lojas de departamentos, companhias de entrega, correios e empresas de táxi de Nova Iorque, Chicago, Londres, Paris e Berlim usaram milhares de veículos elétricos. A alta confiabilidade (99% dos 300 dias de trabalho por ano de disponibilidade) e baixa manutenção caracterizavam os elétricos e os fizeram os veículos favoritos para frotas.

No campo da performance, um típico veículo elétrico de 1150 kg atingia 32 à 48 km/h e tinha uma autonomia de 80 à 100 km com uma carga das baterias. Caminhões leves podiam fazer 16 à 24 km/h com 65 à 80 km de autonomia. Já os médios 8 à 16 km/h e autonomia de 50 à 65 km. Foi um veículo elétrico que registrou o primeiro recorde de velocidade. O “Jamais Contente” de Camille Jenatzy, com linhas aerodinâmicas e 2 motores de 12 HP, atingiu 106 km/h em abril de 1899, um recorde que permaneceu por três anos até ser quebrado pelo “Torpedo” Baker Electric em 1902 fazendo 125 km/h. Mais tarde, em 1904, o Torpedo Kid atingiu 167 km/h. Em 1900 o carro da companhia francesa B.G.S. registrou o recorde mundial de distância com 290 km por carga.

Uma versão do Carro da senhora Clara Ford, um Detroit com motor de 5,5 H.P. de corrente contínua com sistema de 72 volts, foi testado, 60 anos mais tarde, com baterias novas e ainda atingia 40 km/h com autonomia de 129 km!

A decadência do veículo elétrico após 1915 nos Estados Unidos e conseqüente ascensão do veículo com motor à combustão interna, deveu-se à pouca eletrificação da zona rural e a oferta de gasolina barata. Ironicamente, foi um pequeno motor elétrico conjugado com uma bateria e adaptado como motor de partida em veículos equipados com motor de combustão interna, que trouxe o ocaso da era dos veículos elétricos.

A história do veículo equipado com motor de combustão interna está intrinsecamente ligada à historia do petróleo. A popularidade do veículo convencional, no entanto, deve-se mais às vantagens econômicas do petróleo do que qualquer vantagem técnica do motor de combustão interna.

Os óleos de origem animal eram usados por séculos para garantir iluminação. O óleo de pedra (antigo nome do petróleo) foi tido, em 1850, como a alternativa ideal para iluminação e lubrificação na era industrial que se aproximava. Os primeiros pesquisadores descobriram que um excelente óleo para iluminação poderia ser extraído de carvão ou do óleo de pedra. Naquela época existiam uma grande quantidade de carvão, sendo que, restava apenas descobrir uma fonte substancial de óleo cru.

A descoberta de petróleo na Pensilvânia por Edwin Drake em 1859 foi o estopim que detonou a revolução do petróleo. Quase que do dia para a noite esta descoberta na Pensilvânia tornou-se de vital importância para a economia americana. Logo o negócio do petróleo, dominado pelo querosene, era controlado por monopólios internacionais. Naquela época toda a produção era voltada para a obtenção do querosene e óleos lubrificantes e a gasolina, depois de obtido o querosene, era descartada ou, com sorte, podia ser vendida à dois centavos de dólar por galão (3,78 litros). Esta situação estava prestes a mudar.

O carvão foi o combustível principal da revolução industrial e o primeiro motor à combustão interna, de 1860, era alimentado por gás de carvão. Nicolas Otto aperfeiçoou o modelo e introduziu o conceito de quatro tempos em 1876. A descoberta de que a gasolina era um combustível ainda mais poderoso e barato impulsionou a revolução do motor de combustão interna. Tudo o que faltava era controlar a explosiva mistura ar-gasolina o que foi conseguido com o carburador de Gottlieb Daimler de 1885. O controle do ponto de ignição foi concebido por Karl Benz também em 1885 com um sistema de ignição por centelha similar ao que era usado até bem pouco tempo em todos os veículos convencionais composto por bobinas e velas de ignição.

Segundo Nicholson, os primeiros veículos equipados com motores à gasolina eram ruidosos, difíceis de dirigir, difíceis de dar a partida e sujeitos a explosões no escapamento o que foi usado pelos competidores à vapor e elétricos para caracterizá-los como perigosos. Os veículos convencionais oferecidos naquela época como o Daimler (Alemanha, 1886), o Benz (Alemanha, 1888), o Duryea (EUA, 1893), o Peugeot (França, 1894) e Bremer (Inglaterra, 1894) eram máquinas primitivas buscando o seu nicho de mercado ao mesmo tempo em que os elétricos, bem acabados e dirigidos às elites, eram vendidos por cerca de US\$ 5000.

Isto mudou rapidamente talvez devido à inspiração trazida pela competição do Dia de Ação de Graças promovida pelo jornal Chicago Times em 1895. A competição foi vencida por Frank Duryea dirigindo um veículo “Irmãos Duryea”. Isto trouxe fama instantânea aos irmãos e ajudou a reunir diversos entusiastas da pesquisa automotiva pela primeira vez. Apenas três anos mais tarde haviam mais de 200 empresas organizadas para fabricar veículos convencionais.

Naquele momento, quando os veículos convencionais ainda estavam longe de dominar o mercado, vários poços de petróleo foram descobertos nos EUA fazendo com que o barril despencasse para três centavos de dólar. Enquanto os sistemas de distribuição de energia elétrica garantiam a substituição do querosene, o petróleo cada vez mais barato garantia o sucesso do veículo com motor à gasolina. Assim como Rockefeller com o petróleo, Henry Ford foi a pessoa certa no lugar certo (Detroit) na hora certa (outubro de 1908) com a idéia certa (Ford modelo T) ao preço certo (US\$ 850). Apesar de não ter comparecido em nenhum dos eventos importantes

do setor, Ford foi certamente influenciado pela literatura advinda deles quando criou o seu quadriciclo em 1896. Em 1908 Ford já havia criado vários projetos. Várias tentativas precederam o modelo T, mas foi a introdução da fabricação seriada, com cor única e a um preço de US\$ 850, que trouxeram o sucesso do veículo com motor de combustão interna. O modelo T de 1909 tinha quatro cilindros, 20 HP e pesava 545 kg, com isso foi um sucesso de vendas por 19 anos. Mais de 15 milhões foram produzidos até maio de 1927 quando sua produção foi encerrada. Devido a economia de escala o preço médio do modelo T baixou para US\$ 290 em dezembro de 1924. Também a sua economia contribuiu para este sucesso. Por possuir uma transmissão planetária de duas velocidades à frente e uma à ré e rodas de 30 polegadas atingia 1000 RPM à 40 km/h e 1800 RPM à 72 km/h fazendo com que sua autonomia fosse de 8,5 km/l.

Muitos fatores ajudaram a consolidar a indústria do petróleo naquela época. A existência de várias companhias exploradoras e a descoberta do processo de craqueamento do petróleo gerando duas vezes mais gasolina do que o processo anterior, também contribuíram para o domínio do petróleo.

Os avanços na tecnologia automotiva também foram decisivos para a consolidação desta indústria. Isto gerou o crescimento de grandes indústrias automotivas como a GM e suas subsidiárias (Buick, Oldsmobile, Cadillac, Oakland, Chevrolet e GMC) e os fornecedores de autopeças como Fisher, Radiadores Harrison, Velas Champion, DELCO, e outros. As inovações da GM como: opções de cores, motores de 6 cilindros mais potentes e alterações anuais de modelos, fizeram com que o Ford modelo T, apesar de seu preço atrativo de US\$ 290, se tornasse obsoleto.

O crescimento dos veículos com motor à combustão interna explodiu devido à I Guerra Mundial. Aprendeu-se após a I Guerra que os veículos com motor à combustão interna (automóveis, tanques, aviões, etc.) eram superiores aqueles movidos à carvão e quem, por ventura, controlasse as reservas de petróleo ganharia a guerra. De acordo com Brant, naquela época o número de veículos registrados nos EUA subiu de meio milhão em 1910 para nove milhões em 1920 e para trinta e três milhões em 1940. O óleo cru que era vendido à US\$ 2 o barril em meados de 1920 caiu para menos de 10 centavos no início dos anos trinta. Após a II Guerra o crescimento da população destes veículos foi ainda mais rápido a nível mundial. O que tornou isto possível foi a relativa estabilidade dos preços do petróleo por mais de 50 anos variando de dez à trinta centavos de dólar conforme pode ser visto na figura 2.4. Levando-se em consideração a taxa de inflação, constata-se que a gasolina até mesmo baixou de preço. Naquela época ninguém se importava com o quão ineficientes eram os veículos, pois, a gasolina era mais barata do que a água.

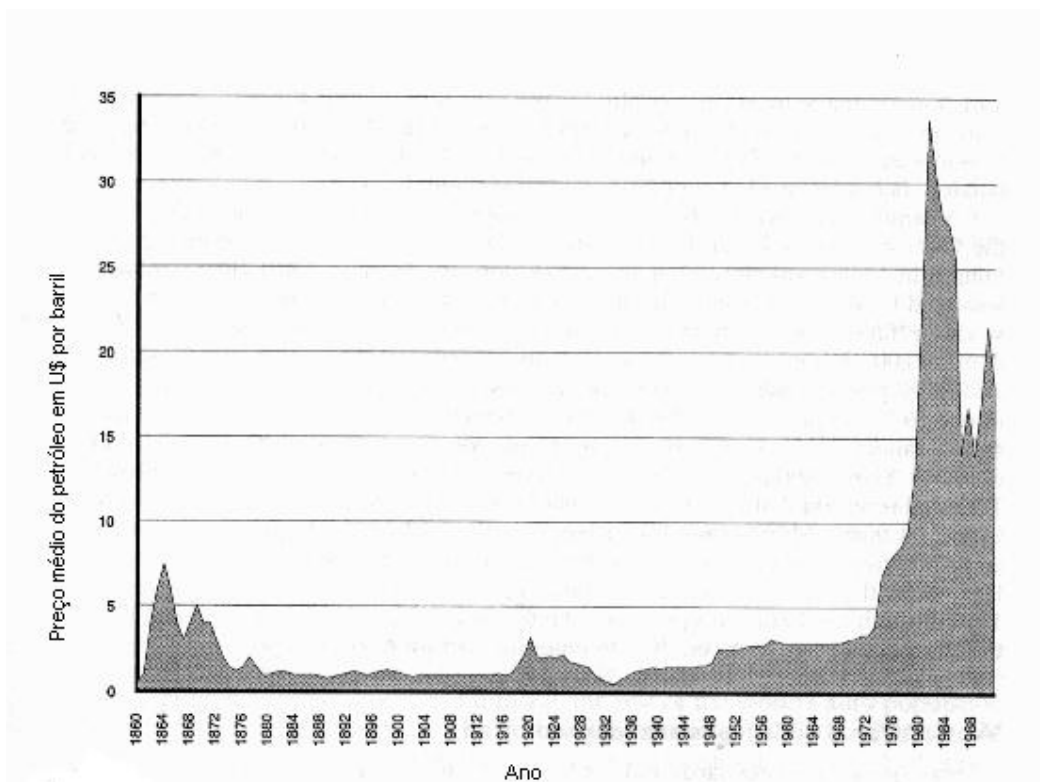


Figura 2.4 - Variação do preço do petróleo de 1860 à 1990.

O mundo estava definitivamente dependente do petróleo. “Meio-ambiente” era uma palavra pouco ouvida e com um significado não muito claro. O registro de veículos nos EUA e no mundo cresceu ainda mais como pode ser visto na figura 2.5.

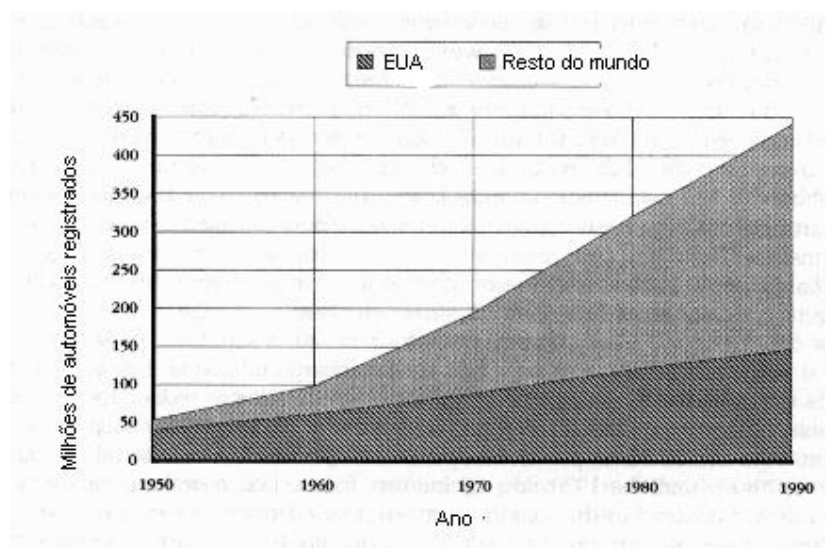


Figura 2.5 - Aumento no registro de veículos.

Em meados dos anos sessenta muitos nos governos e nas indústrias no mundo todo começaram a constatar que alguma coisa estava errada. A dependência do petróleo estava aumentando e os problemas ambientais se agravavam. Pode-se dizer que ocorreram três grandes choques que abalaram o mercado do petróleo como principal combustível. O primeiro, em 1973, surpreendeu as três grandes montadoras dos EUA. As japonesas e européias tinham modelos menores e mais eficientes como resultado de anos de oferta de combustível caro. A fatia de mercado perdida pelas montadoras americanas naquela ocasião até hoje ainda não foi plenamente recuperada. Naquela época diversos embargos e guerras envolvendo países membros da OPEP trouxeram instabilidade ao mercado. A gasolina pulou dos estáveis trinta centavos de dólar para mais de um dólar o galão. Longas filas se formavam nos postos para que os consumidores pudessem receber sua cota de gasolina racionada.

O segundo choque ocorreu devido ao embargo do Irã iniciado em 1978. O Irã era o principal país produtor e teve sua produção reduzida em 80%. O preço do barril de petróleo subiu de 13 para 34 dólares.

O terceiro choque na década de oitenta ocorreu na direção oposta. O período recessivo, a oferta de fontes alternativas e a reestruturação após o susto dos anos setenta, fizeram com que a oferta de petróleo crescesse a ponto de fazer seu preço cair muito. Alguns exportadores asiáticos o vendiam à US\$ 6 o barril em 1986. Os acidentes ocorridos em Chernobyl em abril de 1986 e do petroleiro Exxon Valdez em 1989 serviram para acirrar ainda mais a preocupação com os efeitos causados pelo homem ao ambiente na sua busca por energia barata.

O quarto choque, causado pela invasão do Kuwait pelo Iraque em agosto de 1990, fez o mundo voltar as atenções à questão do petróleo novamente.

No início dos anos noventa a festa do petróleo dos últimos 75 anos havia acabado. Problemas ambientais, a necessidade da conservação de energia e os constantes problemas envolvendo os países produtores sinalizaram o fim da era de ouro do petróleo. Isto, obviamente, não vai ocorrer da noite para o dia. Nos próximos anos os países industrializados e os emergentes do terceiro mundo consumirão ainda mais energia advinda do petróleo, mas é inevitável que outras formas de energia alternativas ao combustível fóssil sejam encontradas. As condições estão favoráveis para o ressurgimento do veículo elétrico à medida em que, às pessoas estão mais conscientes dos problemas causados ao meio-ambiente nestes últimos cem anos de exploração e crescimento industrial.

A história do veículo elétrico não parou nos anos vinte. Eles continuaram sendo construídos e quebraram algumas barreiras de autonomia e velocidade neste meio tempo. O primeiro recorde de velocidade foi alcançado por um veículo elétrico em 1899 à 106 km/h. No

mesmo ano a primeira multa já conhecida foi dada a um taxi elétrico em Manhatam por andar à 20 km/h (Frank e McCosh, 1991). Na virada do século 20 um Baker elétrico alcançou 167 km/h.

Após isto várias tentativas fizeram aumentar este limite. Em 1968 um Autolite atingiu 222 km/h, um Eagle Pitcher foi à 245 km/h em 1972 e Roger Hedlends atingiu 282 km/h em 1974. Em 1992, Satoru Sugiyama com seu Clean Liner iria tentar a marca de 400 km/h. O veículo possuía um motor Fuji de 650 HP de um trem bala japonês e 113 baterias Panasonic de níquel-cádmio. Problemas técnicos e climáticos o impediram de tentar este recorde.

Como mostra Brant, o Impact da GM (figura 2.6) por vezes deixou carros como o Nissan 300ZX e o Mazda Miata para trás em corridas de arrancada de 0 à 100 km/h. A velocidade deixou de ser considerada um tabu quando se fala em veículos elétricos.

No que diz respeito à autonomia, vários recordes também foram batidos. Pode-se projetar um veículo elétrico para cobrir a distância que for necessário hoje em dia. Um elétrico francês, o B.G.S., cobriu 290 km em 1900 com uma única carga de baterias. Uma *pick-up* Nissan EV-4H fez 496 km usando baterias do tipo chumbo-ácido em 1970. As baterias de enxofre-sódio da ABB levaram um Horlacher Sport à 547 km em 1992 e no mesmo ano um Geo Metro alcançou 725 km. Quando é sabido que a maioria dos deslocamentos são inferiores à 60 km, podemos dizer que o veículo elétrico pode, com facilidade, atender às exigências da grande parte dos consumidores.



Figura 2.6 - Veículo elétrico GM Impact.

Pode-se, para efeito de simplificação, avaliar a história moderna do veículo elétrico em quatro grande períodos.

O primeiro período, ocorrido na década de sessenta, foi marcado por veículos como os caminhões de entrega de leite ingleses que chegaram à marca de 100.000 unidades produzidas. A preocupação com o ambiente, especificamente com a poluição do ar, foi o grande elemento

motivador. Basicamente o mercado era dividido em particulares que convertiam veículos convencionais existentes e fábricas que lidavam com a demanda cada vez maior por veículos grandes e rápidos. As conversões eram feitas de maneira rudimentar com motores que eram sobras de guerra obtidos de motores de partida de aeronaves, controladores primitivos e baterias. Os veículos convertidos desta forma tinham uma performance muito aquém do esperado. O motivo principal era o uso de componentes de carros de golfe que operavam com baixas tensões, da ordem de 36 a 48 volts. Alguns veículos adaptados para 72 a 96 volts tiveram uma performance melhorada.

O segundo período ocorreu após 1973. A crise do petróleo forçou as montadoras a apresentarem modelos mais econômicos e muitos carros foram importados do Japão e Europa como alternativa aos carros ineficientes que rodavam pelas ruas nos EUA. Muitas novidades foram apresentadas ao público. A GM saiu na frente com seu Corvette elétrico, o Eletrovette e a *Van Bedford* (um modelo convertido de uma *van* inglesa). Nenhuma inovação tecnológica foi aplicada nestes veículos o que tornou suas performances pobres e afastou potenciais interessados. Também Ford, Chrysler e American Motor tiveram seus modelos no mercado. A American Motors teve grande sucesso com o fornecimento de *vans* para os correios em 1971. Mais de 350 foram produzidas e apresentaram excelente performance com baixo custo operacional e alta disponibilidade. Após o terceiro choque (petróleo em abundância a preços baixos) aquela *van* tornou-se economicamente pouco atrativa.

Numerosas montadoras independentes de veículos elétricos surgiram após o choque do petróleo de 1973. Foi uma repetição do desenvolvimento acontecido na virada do século. Haviam muitos veículos elétricos para escolher, mas a maioria não era tecnicamente atualizada, a qualidade da manufatura era inconsistente e a qualidade dos componentes era muitas vezes duvidosa.

Os projetos predominantes usavam uma conversão de veículos convencionais existentes ou novos chassis sem sofisticação e com uma engenharia pobre. Para completar o quadro, muitas empresas estavam descapitalizadas. Enquanto a indústria automotiva vendia seus veículos usando técnicas de marketing como relações públicas, pressão nos órgãos legislativos, ouvindo a opinião dos clientes através de pesquisas ou protótipos, propaganda e distribuição através de uma rede de concessionários, os fabricantes de veículos elétricos da década de setenta raramente faziam o mesmo.

O mais famoso veículo elétrico desta época foi o CitiCar da Sebring/Vanguard. Segundo Brant, a Sebring/Vanguard foi o primeiro fabricante independente em 1974 e por algum tempo vendia toda a produção que tirava de sua linha de montagem. Mais de dois mil CitiCar foram

vendidos nos Estados Unidos. Ele foi muito popular na sua época e os proprietários eram muito fiéis à marca. Ele também recebeu muita publicidade. Infelizmente, apesar de ser muito bem montado (alguns rodam até hoje), eficiente e prático, seu modelo parecia com um carro de golfe modificado, semelhante aos primeiros modelos de 1960. As críticas na imprensa especializada foram cruéis a ponto de influenciarem a opinião dos consumidores de maneira negativa. Estes começaram a associar veículos elétricos à carros de golfe criando um estigma sobre eles.

Como cita o GRUVE (Grupo de Estudos de Veículos Elétricos) da UERJ, uma nova geração de carros elétricos foi desenvolvida em diversos países, inclusive no Brasil, com o lançamento do ITAIPU ELÉTRICO, fabricado pela extinta indústria nacional GURGEL S.A. A Furnas Centrais Elétricas S.A., em 1984, era uma das empresas que de forma pioneira, contou com dois furgões elétricos deste fabricante e pôde testá-los em serviços gerais, nas áreas de Campinas e Tijuco Preto. Contudo, medidas de racionalização e substituição do petróleo em vários cantos do mundo, como a do PRO-ÁLCOOL, iniciado em 1975, foram eficazes sucedendo-se o declínio dos preços do petróleo, antes que os carros elétricos, em qualquer parte, pudessem firmar a sua utilização junto ao público.

Os novos fabricantes evitaram o visual “carro de golfe” em seus modelos. Outro fabricante bem conhecido naquela época foi o Electric Fuel Propulsion. Após lançar alguns modelos convertidos, a EFP finalmente terminou com um modelo capaz de atingir 112 km/h com autonomia de 160 km. Outros fabricantes foram Linear Alpha, Eletricar e Battronic, cuja *minivan* produzida em conjunto com o Conselho do Veículo Elétrico atingia 96 km/h apesar de seus 3100 kg.

O desenvolvimento dos veículos elétricos levava as associações das indústrias a se juntar com fabricantes individuais para lançar protótipos em feiras. Estes protótipos eram usados para todos os tipos de demonstrações o que elevou o nível de conscientização do público sobre os veículos elétricos. Muitos dos visitantes deste eventos achavam que estes protótipos eram veículos de produção e eram comuns contatos com os fabricantes para fazer encomendas.

O Electric Town Car da Copper, um dos mais conhecidos protótipos daquela época, alcançava 95 km/h e tinha autonomia para 166 km usando 18 baterias de chumbo-ácido. Outros protótipos bem conhecidos eram o Golias da Lead, o XDH-1 da Sears e Roebuck, um Fiat 128 convertido e o Maxima da Globe-Union. Era uma camionete (SW) que pesava 1973 kg e alcançava 120 km/h com suas 20 baterias.

A Inglaterra liderou o mundo por muitos anos na produção de veículos elétricos e lá haviam mais de 150.000 em operação em meados da década de setenta. Os ingleses otimizaram seus veículos elétricos para resolver o problema da poluição (atmosférica e sonora) e do tráfego

urbano restrito. Eles eram tecnicamente mais dominantes no nicho de veículos para frotas. Havia muitas *vans*, *pickups* e táxis em operação diariamente. O fato de utilizarem direção no lado direito e sistemas de recarga de 220 Volts / 50 Hz criou um empecilho para sua efetiva exportação para outros países.

Assim como os ingleses, os alemães também tiveram sua parcela no desenvolvimento da indústria do veículo elétrico. A influência alemã na otimização de veículos de pequeno porte é lendária, haja visto que mais de 20 milhões de Fuscas foram produzidos em mais de 20 países por mais de 60 anos de história. A VW em conjunto com outras empresas e órgãos colocou mais de cinquenta vans para teste nas estradas no início dos anos setenta. Os ônibus elétricos também foram amplamente desenvolvidos na Alemanha. Além da Alemanha com a VW, MB, Bosch e Varta outras empresas européias como Peugeot, Citroen e Renault na França, Fiat e Zagato na Itália e Saab na Suécia foram cruciais para o desenvolvimento do veículo elétrico naquele continente.

Neste meio tempo, o exemplo europeu era levado a sério no Japão. Mesmo antes de assumirem como líderes na produção de veículos equipados com motor de combustão interna, alguns japoneses já vislumbravam o futuro e este se mostrava favorável ao veículo elétrico. O incentivo que o Japão precisava já estava lá. Era o líder mundial em importação de petróleo, tinha níveis perigosos de poluição e a velocidade era perigosamente alta nas suas ruas estreitas.

Enquanto a Associação Japonesa do Veículo Elétrico não havia ainda sido criada, o governo japonês bancava os investimentos iniciados em 1971 com a Fase I que compreendia pesquisas nas áreas de baterias, motores, sistemas de controles e componentes de chassi para automóveis, *pick-ups* e ônibus.

Os frutos deste trabalho apareceram durante a Fase II. A tabela 2.1 mostra os modelos japoneses disponíveis e suas características. A *pick-up* Nissan EV-4P com sua autonomia de 302 km por recarga era um recorde para baterias tipo chumbo/ácido, por outro lado, os 496 km com baterias zinco/ar do EV-4H foi o recorde do período.

Fabricante	Daihatsu	Toyota	Mazda	Nissan	Nissan
Modelo	EV-1	EV-2	EV-3	EV-4P	EV-4H
Tipo	Carro	Carro	<i>Pick-Up</i>	<i>Pick-Up</i>	<i>Pick-Up</i>
Autonomia (km)	175	455	204	302	496
Velocidade máxima (km/h)	88,5	85,3	72,4	86,9	90,1
Tipo bateria	Chumbo/ácido	Zinco/ar	Chumbo/ácido	Chumbo/ácido	Zinco/ar
Massa total (kg)	1134	1256	780	2268	2490

Tabela 2.1 - Veículos elétricos japoneses da década de setenta.

Durante os anos setenta todas as nove grandes montadoras japonesas - Daihatsu, Honda, Isuzu, Mazda, Mitsubishi, Nissan, Subaru, Suzuki e Toyota - estavam envolvidas em algum tipo de desenvolvimento ligado ao veículo elétrico, umas mais profundamente, outras menos.

Enquanto o segundo choque do petróleo de 1979 fez com que o desenvolvimento do veículo elétrico avançasse, o de 1986 (com a brusca queda nos preços dos combustíveis) fez com que até mesmo as pesquisas fossem interrompidas, começava então o terceiro período da história do veículo elétrico. Muitos fabricantes pequenos de veículos elétricos foram sumindo. Com os baixos preços do petróleo muitos foram perdendo o interesse nos veículos elétricos. De meados de 1983 até o início de 1990 parecia que tudo o que se relacionava ao veículo elétrico havia desaparecido. Não haviam fabricantes, livros ou até mesmo revistas especializadas em veículos elétricos. Os sobreviventes desta tecnologia eram os que haviam feito conversões ou protótipos, os fornecedores de componentes e as associações ligadas ao veículo elétrico.

Pode-se caracterizar aquele período pelas seguintes tendências:

- Baixos níveis de atividade na GM, Ford e Chrysler (nos EUA);
- Os melhores fabricantes independentes surgiram e desapareceram;
- Baixos níveis de atividades em outros países e,
- Os que convertiam veículos convencionais continuaram a existir.

A GM até que tentou com a sua G-van, mas muitos dos que se queixavam de sua baixa performance (velocidade máxima de 85 km/h e autonomia 96 km), não a relacionaram com a sua elevada massa (3683 kg) e sua grande área frontal. A diretriz na Ford era de continuar desenvolvendo e construindo sobre um sistema de baterias de sódio-enxofre usando fundos governamentais. Já a Chrysler usava sua plataforma da *minivan* Caravan/Voyager com motor GE e 30 baterias de níquel-cádmio de 6 volts para fazê-la alcançar 104 km/h com autonomia de 193 km. Esta *minivan* pesava cerca de 2800 kg.

Vários fabricantes independentes haviam surgido e sumido durante o segundo período da história do veículo elétrico. Alguns deles, como a Electric Vehicle Associates of Cleveland, faziam veículos elétricos de excelente performance. Apesar de seus Renault 12 convertidos e da ElectroVan desenvolvida juntamente com a Chloride, eles eram mais conhecidos pelos sedans construídos sob plataformas AMC. O sedan de quatro passageiros “Change of Pace” pesava 1810 kg e usava vinte baterias de chumbo/ácido Globe-Union de 6 volts, um motor de corrente contínua e um controlador para atingir 88,5 km/h e 85 km de autonomia. As Indústrias Jet de Austin no Texas, eram inquestionavelmente a maior e melhor fabricante de veículos elétricos, e foi também o último a aparecer. Seu produto mais conhecido foi a ElectraVan 600 (baseada em um chassi Subaru) e o coupê 007 (baseado num chassi Dodge Omni). Ela também oferecia *pick-ups* e *vans* para 8 passageiros. A ElectraVan 600 pesava 1220 kg e possuía um motor de corrente contínua tipo série GE de 20 HP ou Prestolite de 22 HP, controlador eletrônico e 17 baterias de chumbo/ácido de 6 volts cada. Esta configuração a levava à 88,5 km/h e 161 km de autonomia. Centenas de ElectraVans e coupês 007 foram vendidas e hoje pertencem, em sua maioria, à sócios da EAA (Electric Auto Association), que atestam a sua qualidade e durabilidade superiores.

A Europa e o Japão sofreram os mesmos problemas sofridos pelos EUA durante o período de racionamento do petróleo seguido de abundância. Estes países também não focaram seus esforços no desenvolvimento do veículo elétrico. A VW estava envolvida em um projeto de um veículo híbrido que pouco, ou quase nada, trouxe de novo aquele cenário. Neste meio tempo, o Japão teve lentos mas contínuos avanços nos seus planos para o veículo elétrico. O desenvolvimento estava centrado nos esforços da Nissan com os seus projetos chamados Laurel, March e Atlas e na Toyota com seu EV-20 e Town Ace Van.

Casos isolados de pessoas que convertiam seus próprios veículos continuavam mas, desta vez, tendo que dispor de modestos recursos. Estes convertedores seguidamente encontravam-se em eventos e corridas para divulgação do veículo elétrico e quase sempre muito satisfeitos com as suas conversões.

O quarto período na história do veículo elétrico é o que se está vivenciando atualmente. As crescentes preocupações com a escassez futura do petróleo, o ambiente e os recursos naturais, trouxeram a mensagem que foi entendida, desta vez, até pela General Motors. De fato, a GM até mesmo liderou por algum tempo a corrida rumo ao veículo elétrico moderno. O interesse pelo veículo elétrico está levando ao desenvolvimentos das leis, da tecnologia e da cooperação entre órgãos governamentais nos EUA. Mais uma vez países como o Brasil ficam de fora, ou aguardando, estas ações. As novas leis trouxeram mais motivação para o desenvolvimento dos veículos elétricos. O estado da Califórnia, nos EUA, começou impondo um limite mínimo de 2% dos veículos novos como sendo de emissão nula começando no ano de 1998 e subindo para 10% em 2003. Isto significaria 40.000 veículos elétricos em 1998 e mais de 500.000 em 2003. Obviamente que estes limites nunca foram alcançados. Diversos adiamentos permitiram que a legislação fosse alterada para beneficiar as grandes montadoras nos EUA. Vários outros estados americanos seguiram o exemplo da Califórnia e implementaram leis de incentivo ao veículo elétrico. Os proprietários de veículos elétricos na Califórnia podem solicitar até US\$ 1.000 de crédito durante o acerto nos seus impostos estaduais. Uma lei de 1992 permite inclusive um crédito de 10%, limitado à US\$ 4.000, nos impostos federais sobre preço de compra do veículo elétrico. Estes tipos de incentivos estão sendo oferecidos inclusive fora dos EUA. No Japão foi definido um objetivo de 200.000 veículos elétrico pelo ano de 2000, o que também não foi alcançado. A França e Holanda também colocaram em prática leis de incentivo à compra de veículos elétricos.

As grandes montadoras japonesas, como Nissan e Toyota, estão sendo encorajadas a trabalhar em conjunto para atingir as metas estabelecidas. A primeira lançou o seu Hypermini enquanto a Toyota apresentou o RAV4 elétrico em março de 2002.

Os veículos elétricos atuais favoreceram-se do salto tecnológico a que foram obrigados a dar os veículos equipados com motor à combustão interna. Devido às restrições cada vez maiores no tocante à emissões, os veículos convencionais tiveram que lançar mão da eletrônica embarcada para manterem-se competitivos. Este avanço tecnológico, principalmente na área dos semi-condutores, teve aplicação prática no desenvolvimento dos componentes para veículos elétricos. Sistemas que anteriormente eram mecânicos foram aos poucos sendo substituídos por componentes eletrônicos beneficiando-se do baixo peso e baixo consumo de energia. O desenvolvimento no campo das baterias também foi igualmente aplicado. Começando pelas conhecidas chumbo/ácido até as sódio-enxofre, níquel-ferro e níquel-cádmio todas avançaram para um maior nível de performance. Vários grupos começaram a olhar para a possibilidade das baterias de lítium-polímero com mais seriedade.

A tabela 2.2 mostra como, efetivamente, os veículos elétricos se aproveitaram dos avanços tecnológicos das décadas de oitenta e noventa. A primeira vista parece que houve um retrocesso nos veículos apresentados. Mas estes novos veículos, apresentados no quarto período da história do veículo elétrico, são muito mais eficientes do que aqueles da tabela 2.1. Nota-se facilmente isto avaliando o seu MASSA TOTAL.

Fabricante	GM	Ford	Chrysler	BMW	Nissan
Modelo	Impact (carro)	Van Ecostar	Van Epic	E2 (carro)	FEV (carro)
Autonomia (km)	193	161	193	241	241
Velocidade máxima (km/h)	120	105	105	121	129
Motorização	2 X 54 H.P. ca	75 H.P. ca	65 H.P. cc	45 H.P. cc	2 X 27 H.P. ca
Tipo bateria	Chumbo/ácido	Sódio/enxofre	Níquel/ferro	Sódio/enxofre	Níquel/cádmio
Massa total (kg)	821	1157	1194	754	739

Tabela 2.2 - Veículos elétricos modernos

Pode-se sublinhar seis tendências predominantes neste quarto período da história do veículo elétrico:

1. Alto nível de atividade em empresas como Nissan e Toyota.
2. Crescimento de pequenos fabricantes independentes.
3. Os novos protótipos são cada vez melhores.
4. Alto nível de atividade fora dos EUA.
5. Altos níveis de atividade em veículos híbridos.
6. Grande número de conversões feitas por particulares.

Estas tendências serão mais amplamente analisadas a seguir onde se verá os veículos modernos disponíveis, veículos híbridos e conversões.

3. MOTORES ELÉTRICOS

O componente principal de um veículo elétrico é o seu motor. Existem motores elétricos de todas as formas, tamanhos e tipos e eles são considerados os equipamentos eletro-mecânicos mais eficientes que existem. Diferente de um motor à combustão interna, o motor elétrico tem emissões nulas de poluentes. Tendo somente uma parte móvel, o motor elétrico tem vida útil muitas vezes maior do que um motor de combustão interna. Para o proprietário de um veículo elétrico isto significa ter um veículo eficiente, não poluente, de alta performance e com baixo custo de manutenção, tudo isto devido às características próprias do motor elétrico.

O objetivo desta seção da dissertação é dar subsídios técnicos para que eventuais interessados possam conhecer melhor o funcionamento e os tipos de motores elétricos existentes, sem que para isto, precise ser um especialista no assunto. Este conhecimento técnico vai permitir que o interessado escolha a melhor opção em motor elétrico para equipar um dado veículo elétrico.

Além das vantagens já mencionadas, o motor elétrico apresenta uma característica especial que o difere do motor de combustão interna. Seu pico de torque ocorre em rotações baixas ou próximas de zero RPM. Não é a toa que motores elétricos têm sido escolhidos para mover trens, metrô e outros veículos. Sua resposta é imediata sem a necessidade de aguardar que ele chegue à uma determinada rotação para começar a usufruir de sua potência.

Motores elétricos apresentam eficiências na faixa de 90% ou mais. Isto significa que ele pode transformar cerca de 90% da energia elétrica consumida em trabalho efetivo no seu eixo. Compare-se isto com os 25-30% de um motor de combustão interna. Poucos equipamentos eletro-mecânicos chegam tão próximo ao motor elétrico no quesito eficiência.

Pelas leis de Lenz e Faraday (figura 3.1), sempre que um condutor ou espira se movimenta dentro de campo magnético, cortando as linhas de força, surge nos seus terminais uma força eletromotriz (f.e.m.) induzida, que tende a opor-se à causa que lhe deu origem. Se os condutores ou espira forem ligados a uma carga, o circuito será percorrido por uma corrente elétrica induzida. A origem da f.e.m. é a variação do fluxo através do condutor ou espira provocada pelo seu movimento no campo magnético.

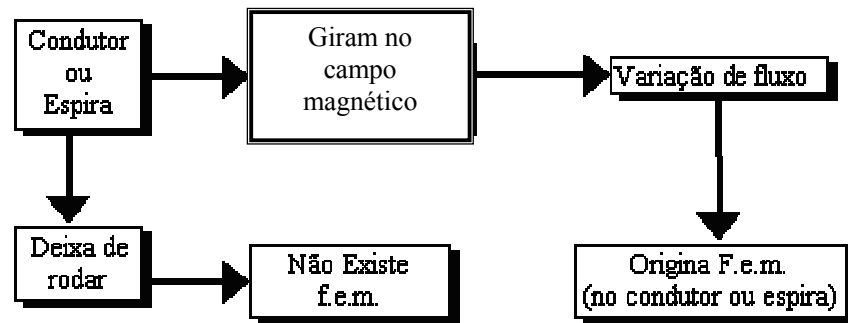


Figura 3.1 - Aplicação das leis de Lenz e Faraday

Já a lei de Laplace (figura 3.2) diz que se um condutor ou espira, alimentado por uma fonte de energia elétrica, é colocado no meio de um campo magnético, exerce-se sobre ele uma força que o faz deslocar com um determinado sentido. A força exercida sobre o condutor ou espira é proporcional:

- À intensidade de corrente no condutor ou espira.
- Ao valor da indução magnética.
- Ao comprimento do condutor ou espira submetido ao campo.
- Ao seno do ângulo formado pela indução e pelo condutor ou espira.

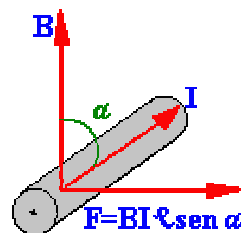


Figura 3.2 - Representação gráfica da lei de Laplace

No caso das máquinas rotativas, existem várias espiras (bobinas) apoiadas num eixo (rotor), causando o movimento do conjunto.

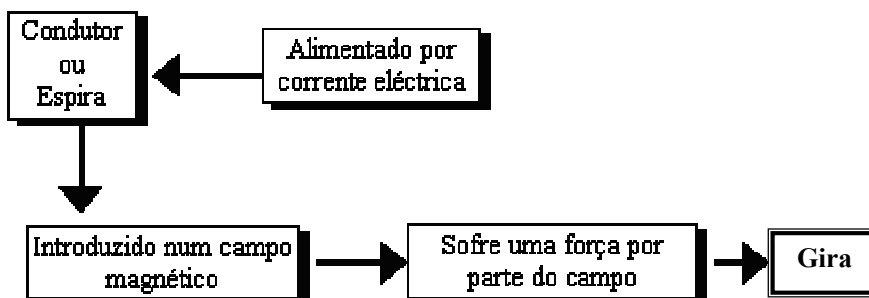


Figura 3.3 - Esquema de funcionamento de um motor elétrico

Desta maneira, quando uma corrente elétrica atravessa um condutor é criado em redor do mesmo um campo magnético. Se colocarmos esse condutor imerso em um campo magnético fixo ele ficará submetido a uma força que terá como efeito fazer com que o condutor se desloque. Assim surge o princípio de funcionamento de uma máquina elétrica elementar mostrado na figura 3.3.

3.1. Constituição de um Motor de Corrente Contínua

As máquinas de corrente contínua, sejam geradores ou motores, são constituídos por indutor, induzido, coletor e escovas.

INDUTOR - Tem como finalidade produzir o campo magnético. Faz parte do circuito magnético. Este campo tanto pode ser produzido por um ímã permanente como por um eletroímã, sendo este último o mais utilizado, pois pode produzir campos magnéticos reguláveis e mais intensos. O indutor é constituído por três partes: A parte externa, denominada por carcaça, pelos núcleos onde são implantadas as bobinas indutoras e pelas peças polares, por entre as quais se desloca o induzido. Ver figura 3.4.

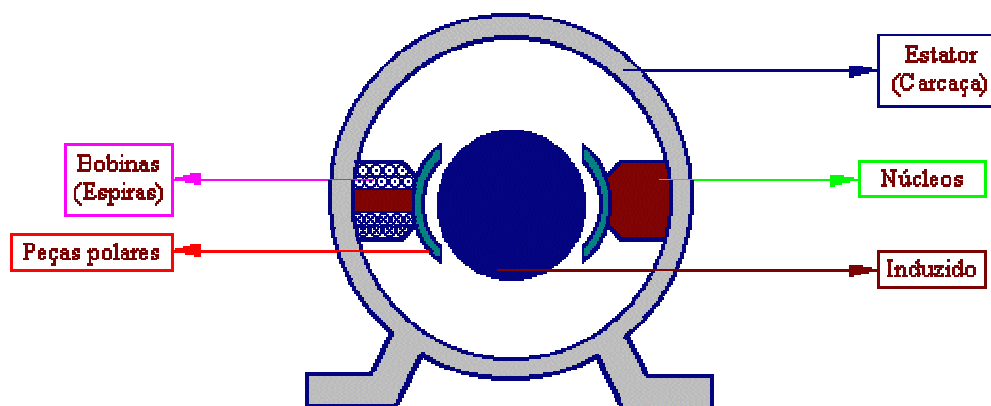


Figura 3.4 - Constituição de um motor elétrico de corrente contínua.

Os pólos são fixados ao estator e as bobinas são colocadas nas peças polares de forma circular, sendo estas enroladas de forma a terem polaridades opostas. Os eletroímãs das bobinas são excitados por corrente contínua, que passa nas bobinas que envolvem os pólos. Há dois tipos de bobinas indutoras ou de excitação: bobinas *shunt* ou paralelo, que contém um grande número de espiras de fio fino, e a sua resistência é de centenas de ohms e as bobinas série que são constituídas por um pequeno número de espiras de fio grosso, e tem um resistência da ordem das décimos de ohms.

INDUZIDO - Está sujeito ao movimento, é constituído por um certo número de bobinas que se encontram encaixadas em ranhuras existentes na periferia do cilindro. Resultam da junção de várias chapas magnéticas, de pequena espessura devidamente isoladas entre si de forma a reduzir as perdas por correntes de Foucault.

COLETOR - Este elemento é formado por um conjunto de lâminas de cobre (figura 3.5) que são dispostas lado a lado tendo folhas de mica que as isolam entre si. Depois de montadas formam um cilindro. O coletor permite captar as correntes estabelecidas nos condutores do induzido, fazendo-as passar para o circuito exterior sob a forma de corrente unidimensional, isto é, corrente contínua.

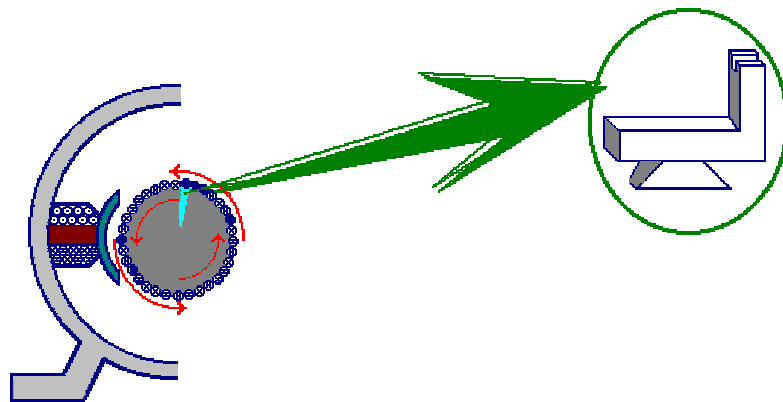


Figura 3.5 - Coletor de um motor elétrico

ESCOVAS - São peças com o formato de uma barra retangular, sendo fabricadas em grafite. Estas peças encontram-se incorporadas numa outra peça denominada de porta escovas, onde existe um mola que as comprime sobre o coletor. Existem vários fatores que influenciam a escolha do grafite como material para a produção de escovas de máquinas rotativas. O grafite tem a propriedade de lubrificar, reduzindo assim o atrito com o coletor.

As máquinas rotativas são constituídas por duas partes distintas; a parte fixa ou estator e a parte móvel ou rotor. No estator encontra-se o indutor, as tampas laterais, onde se encontram os rolamentos, os porta escovas onde estão alojadas as respectivas escovas. O rotor é constituído pelo induzido e pelo coletor.

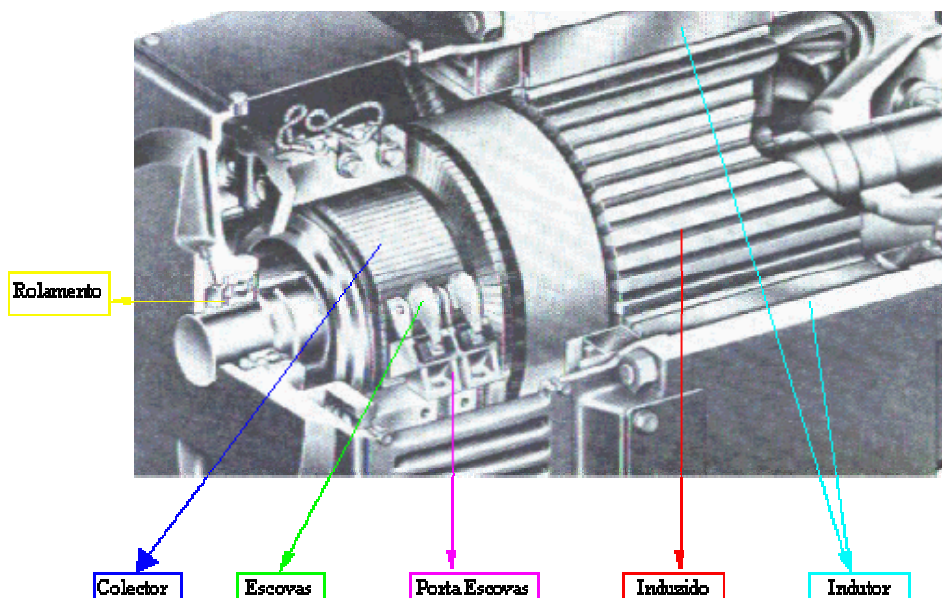


Figura 3.6 - Constituição de um motor elétrico

3.2. Tipos de motores de corrente contínua

Quando a corrente de excitação provém de uma fonte de corrente contínua independente, por exemplo uma bateria de acumuladores ou de um gerador, tem-se neste caso um motor de excitação separada ou independente. Contudo o processo de excitação mais utilizado é quando a corrente que irá produzir o campo magnético indutor é obtido através da mesma fonte de alimentação ligada ao induzido, diz-se que o motor é de auto excitação ou de excitação própria. A classificação dos motores de corrente contínua é definida quanto ao modo como é feita a excitação da máquina, ou seja a forma como é feito o fornecimento da corrente que vai alimentar as bobinas indutoras. Assim sendo, tem-se na figura 3.7 a classificação dos motores elétricos.

Motores de Corrente Contínua	Motores de excitação separada ou independente	
		Excitação em série
Motores auto excitados	Excitação em derivação ou shunt	
	Excitação composta ou compound	Composto adicional
		Composto diferencial

Figura 3.7 - Classificação de motores elétricos.

3.2.1. Motor de Excitação Separada

- ❑ O enrolamento do indutor é alimentado por uma fonte de alimentação externa ao motor.
- ❑ Os enrolamentos do indutor e do induzido formam circuitos elétricos distintos.
- ❑ O motor apresenta uma velocidade constante para qualquer valor de carga.
- ❑ Apresenta um inconveniente que é de ser necessária uma fonte de alimentação externa para o indutor.
- ❑ Para se poder inverter o sentido de rotação deste tipo de motor basta inverter a polaridade de uma das fontes de alimentação.

Este tipo de motor é o mais indicado e o mais usado em locais onde se necessite de variar freqüentemente o sentido de rotação, mantendo uma velocidade constante. É utilizado por exemplo nas antenas parabólicas dos radares.

3.2.2. Motor Série

Este tipo de motor tem a bobina do indutor ligado em série com o induzido, por este motivo as bobinas indutoras são constituídas por fio grosso e com poucas espiras, o que faz com este motor seja bastante robusto. É o tipo de motor mais conhecido e o mais utilizado para tração.

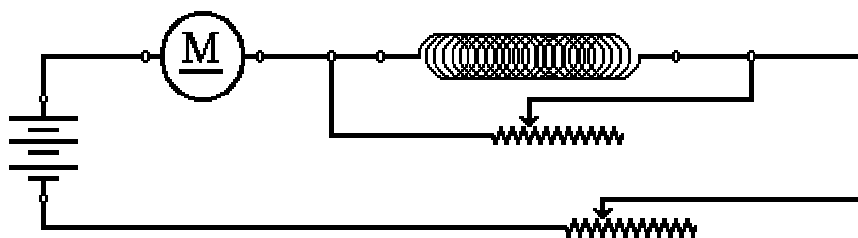


Figura 3.8 - Esquema de ligação de um motor série.

O torque de arranque é bastante elevado, o que lhe permite atingir rapidamente a velocidade normal de funcionamento, podendo arrancar a plena carga sem quaisquer dificuldades. Há cuidados que deve-se ter na utilização deste tipo de motor, pois quando a carga é nula ou muito reduzida a corrente consumida é baixa e a velocidade atingirá valores muito elevados que poderão destruí-lo, diz-se que o motor dispara. Quando tal situação acontecer deve-se desligar imediatamente o motor, porque com velocidades muito elevadas a estrutura do motor pode ser danificada, ou destruir-se por completo.

É um motor que reage muito bem às variações de carga, permitindo regular a velocidade com grande facilidade. Quanto à variação do sentido de rotação deste motor também deve-se ter especial atenção, porque não deve-se inverter o sentido de rotação do motor série invertendo a polaridade da fonte de alimentação, visto que inverte-se simultaneamente o sentido da corrente no induzido e no indutor. Deve-se deixar parar completamente o motor e só depois executa-se o processo de inversão do sentido da corrente apenas em um dos enrolamentos através de um inversor.

Este tipo de motor é utilizado em locais onde não exista o perigo de arrancar em vazio ou em locais onde seja necessário um grande binário de arranque, como é o caso de guias de elevação de cargas e motores de tração elétrica. Este pode também funcionar em corrente alternada como motor assíncrono monofásico.

3.2.3. Motor *shunt*

- Tem a bobina de campo ligada em paralelo com o induzido.
- Bobina indutora com elevada resistência por ser composta de um número muito elevado de espiras de fio fino. Isto é necessário porque a intensidade de corrente no indutor deve ser muito baixa.
 - Tem uma velocidade quase constante desde vazio até plena carga.
 - Possui um torque de arranque inferior quando comparado ao motor de excitação em série.
 - Para que o arranque deste motor seja rápido é necessário que inicialmente a intensidade de corrente no induzido seja baixa e no indutor a intensidade de corrente seja máxima.
 - Para inverter-se o sentido de rotação deve-se inverter o sentido da corrente no induzido ou no indutor.
 - Usualmente, inverte-se o sentido de corrente no induzido.

Normalmente é utilizado para acionar equipamentos em que o arranque não seja a plena carga e em que se necessite de uma velocidade quase constante. É muito utilizado em máquinas ferramentas.

3.2.4. Motor *Compound* ou Composto

No motor *compound* existem dois tipos de excitação, a excitação em série e a excitação em paralelo, podendo estes enrolamentos serem ligados em longa ou curta derivação.

3.2.4.1 Motor *compound* cumulativo;

- Quando o campo magnético criado nos enrolamentos série e derivação tiverem o mesmo sentido, denominando-se por campos adicionais (ou cumulativos).
- Além de possuir as mesmas características do motor série, este motor possui um binário de arranque maior e nunca embala em vazio.

3.2.4.2 Motor *compound* diferencial;

Quando os campos magnéticos tiverem sentidos opostos. Além das características já mencionadas anteriormente para o motor shunt, o mesmo apresenta uma velocidade mais constante e um torque de arranque menor.

Nos motores de corrente contínua a parte móvel, o rotor, encontra-se imerso em um campo magnético que pode ser produzido por um ímã permanente ou por um eletroímã. Ao aplicar-se uma tensão contínua entre as escovas do coletor, as bobinas do induzido serão percorridas por uma corrente contínua que criará um campo magnético. Isto provocará uma interação entre os dois campos magnéticos criados, o campo do indutor e o campo do induzido, o que irá produzir um binário de forças na periferia do rotor que fará com que este apresente um movimento giratório. A velocidade de um motor de corrente contínua depende sempre da intensidade de corrente que atravessa o induzido. Variando-se a tensão aplicada nos terminais do induzido a velocidade pode aumentar ou diminuir.

O número de espiras das bobinas do induzido também faz variar a intensidade do campo magnético e por conseqüência a velocidade. Além deste três fatores a velocidade ainda depende do fluxo no pólo e do número de pólos do indutor. Esta velocidade por vezes tem de ser ajustada ao sistema a que o motor está relacionado. Tendo-se em conta o que foi dito anteriormente, verifica-se que pode-se variar, ou melhor regular, a velocidade do motor variando-se a tensão a

que está sujeito. Da mesma forma, se o fluxo magnético no indutor for variado, a velocidade por consequência também varia.

Segundo Melo Neto, 2000, alguns autores apresentam duas formas de se fazer variar a velocidade, a maneira mais prática que consiste em fazer variar o fluxo magnético do indutor através de um reostato de campo, que permite variar a intensidade de corrente que atravessa as bobinas indutoras. A outra maneira, embora menos prática, consiste em adicionar ao sistema uma resistência variável em série com o induzido, que terá com finalidade fazer variar a tensão aplicada aos terminais do motor.

A técnica de variar a tensão no indutor alterando o campo é chamada de enfraquecimento do campo ou *field weakening*. É uma maneira interessante para controlar a velocidade de um motor série. Coloca-se um resistor externo em paralelo com o enrolamento de campo do motor de tal maneira que este drena parte da corrente disponível. Deve-se manter a corrente no resistor em até 50% da corrente nominal do indutor (o que significa uma resistência igual ou maior do que 1,5 vezes a resistência da bobina de campo do motor). O resultado é uma velocidade de 20 à 25% maior em torques médios sem nenhuma instabilidade na operação. Se usado com moderação é um benefício disponível quase sem investimento. Para o motor shunt faz-se de maneira similar. A diferença é que o resistor, neste caso, deve estar em série com a bobina de campo. A diferença básica é que a armadura de um motor shunt possui uma inércia quando carregada que não a permite responder de maneira instantânea às variações no controle do campo. A possibilidade de danos por sobre-aquecimento neste caso é muito grande.

3.3. Torque em Cada Tipo de Motor CC

A Figura 3.9 mostra como o torque de um motor CC varia de acordo com a corrente da armadura ou induzido.

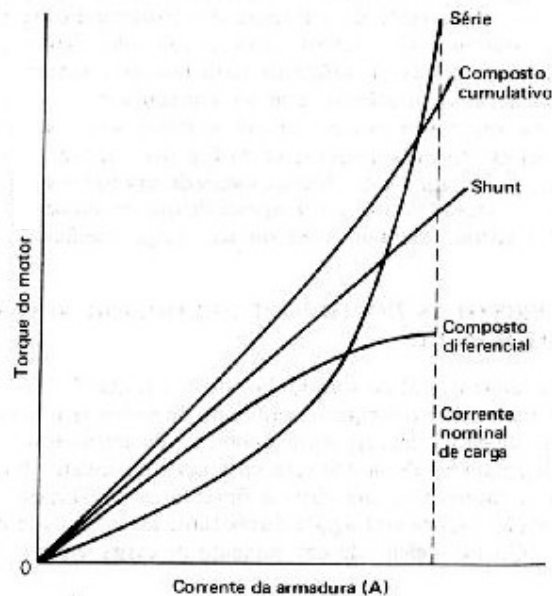


Figura 3.9 - Torque versus Corrente da armadura (Fonte Melo Neto).

3.3.1. Motor série

No motor série o torque é proporcional ao quadrado da corrente da armadura. O gráfico não mostra claramente, mas de fato durante a partida, não há força contra eletromotriz para impedir o fluxo de corrente na armadura de um motor série e o torque nesta situação pode ser muito elevado. Sem esta limitação a partida poderia ocorrer com valores de torque bem acima da linha de plena carga ou de corrente nominal de carga. Na realidade a reação da armadura e a saturação elétrica de um motor série em altas correntes impõe limite tanto ao torque como à corrente, embora geralmente seja desejável limitar o circuito e os componentes a valores mais baixos. Os altos torques de partida tornam o motor série ideal para aplicações de tração.

3.3.2. Motor Shunt

O torque em um motor tipo shunt é diretamente proporcional à corrente da armadura. Embora não exista inicialmente força contra eletromotriz para impedir o fluxo da corrente de partida na armadura, a relação linear é rapidamente estabelecida. Devido a este fato o motor tipo shunt não produz tanto torque de partida quanto o motor série. Isto se traduz em uma reduzida performance na aceleração de um veículo elétrico equipado com este tipo de motor.

3.3.3. Motor Composto

Quando se combinam enrolamentos de campo série e shunt o efeito do campo-série poderá ser composto cumulativo ou diferencial. No composto cumulativo, o fluxo do campo-

série se soma ao fluxo do campo-shunt e, no caso do motor composto diferencial, há uma oposição entre os campos. Sua característica básica vem da maneira como a corrente flui no motor. Se ela encontra primeiro a bobina de campo série chama-se composto de ligação curta ou se encontra a bobina de campo paralela primeiro chama-se composto de ligação longa. A vantagem do motor composto é o fato do mesmo ter as melhores características de ambos série e shunt. Dependendo da configuração (diferencial ou cumulativo) o torque de um motor composto pode apresentar-se de uma ou outra forma como visto na figura 3.9. O composto diferencial cresce mais lentamente até um menor valor de torque. Já o cumulativo cresce mais rapidamente até um valor maior de torque.

3.4. Velocidade em Cada Tipo de Motor CC

A velocidade de cada um dos tipos de motores CC varia com a carga que suporta.

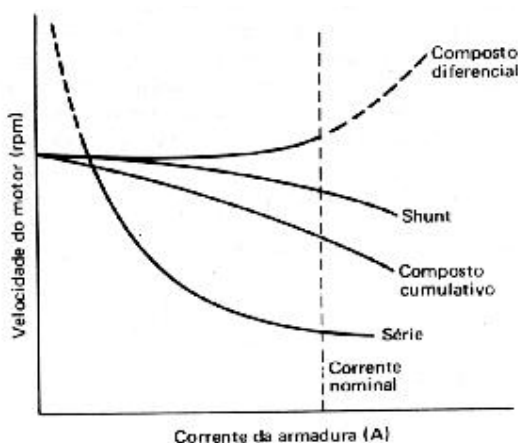


Figura 3.10 - Velocidade dos motores CC em relação à corrente da armadura (Fonte Melo Neto).

3.4.1. Motor Shunt

Quando uma carga é aplicada a um motor *shunt* o mesmo tenderá a diminuir sua velocidade e por conseqüência reduzir a força contra eletro-motriz. Isto produz um correspondente aumento na corrente da armadura. Este aumento de I_a , resulta em um aumento no torque para compensar a carga adicional. Desta maneira o motor shunt pode ser considerado como um motor de velocidade constante em um amplo espectro de correntes da armadura. As características de torque linear e velocidade constante de um motor shunt trazem dois efeitos indesejáveis para sua aplicação em tração quando controlado manualmente. Quando uma carga excessiva do tipo subida de rampas ou longas acelerações são aplicadas, o motor shunt não desacelera como o motor série e, desta maneira, a elevada corrente da armadura necessária para manter o alto torque requerido o deixa mais suscetível à dano por sobre-aquecimento. Os

modernos controladores eletrônicos podem, contudo, minimizar esta característica indesejável dos motores shunt ao ponto de torná-los aplicáveis em veículos elétricos.

3.4.2. Motor Série

Se uma carga relativamente pequena é aplicada ao eixo da armadura de um motor série, a corrente da armadura I_a é pequena, resultando numa elevada velocidade não usual. Sem carga, portanto, com pequena corrente na armadura e pequeno fluxo polar, a velocidade é excessivamente elevada. Por esta razão, o motor série é sempre operado acoplado ou engrenado com uma carga, como guindastes, elevadores ou serviço de tração em CC nos trens. Com o aumento da carga, contudo, a velocidade cai rapidamente. A linha tracejada representa a porção da característica associada a cargas extremamente leves, situação em que não se costuma usar os motores série.

A velocidade excessiva para um motor série não resulta numa corrente tão elevada na armadura, que seja capaz de abrir um fusível ou um disjuntor, desligando, deste modo, a armadura da rede (o que ocorre nos motores shunt e compostos). Portanto, deve-se usar um outro processo para a proteção contra o disparo do motor. Os motores série são usualmente equipados com chaves centrífugas, que são dispositivos sensíveis à força centrípeta e que são fechadas em operação normal e se abrem a velocidades 150% acima do valor nominal.

3.4.3. Motores Compostos

3.4.3.1 Motor Composto Cumulativo

A velocidade de um motor composto cumulativo cairá numa razão maior do que a velocidade do motor-shunt com a aplicação da carga.

3.4.3.2 Motor Composto Diferencial

Com o aumento da carga e de I_a a velocidade pode cair ligeiramente para cargas leves, mas, com o aumento da carga, a velocidade aumenta. Esta condição estabelece uma instabilidade dinâmica. Com o aumento da velocidade, a maioria das cargas mecânicas aumenta automaticamente (pois maior trabalho é executado em velocidades mais elevadas) causando um aumento na corrente, um decréscimo no fluxo total e uma velocidade mais elevada, produzindo, assim, mais carga. Devido a essa instabilidade inerente, os motores compostos diferenciais

raramente são usados em aplicações práticas. Inclusive, podem até haver casos em que ocorre uma inversão no sentido de rotação do motor.

3.5. Torque Externo, Potência e Velocidade Nominais

Pode-se notar que a comparação entre tipos de motores CC feita na Figura 3.11 diz respeito à potência de saída, que é a capacidade que os motores têm em realizar trabalho mecânico. Porém, para efeitos de dimensionamento ou de escolha de motores para aplicação numa determinada situação, pode ser melhor expressar a capacidade de torque que o motor pode exercer para executar trabalho útil na sua velocidade nominal.

$$P = T * N \quad (1)$$

onde P é a potência útil do motor em W

T é o torque interno ou externo em N.m

N é a rotação do motor em RPS

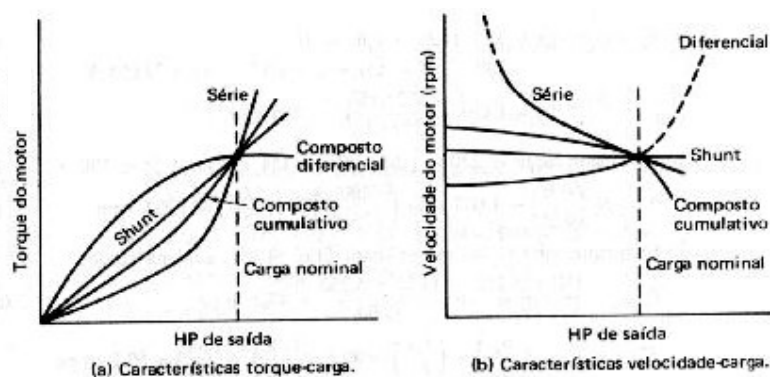


Figura 3.11 - Relação de torque-carga e velocidade-carga para motores CC (Fonte Melo Neto).

3.6. Invertendo o Sentido da Rotação

Para inverter o sentido de rotação de qualquer motor CC, é necessário inverter o sentido da corrente na armadura em relação ao sentido do campo magnético. Para o motor-shunt e para o motor série, basta inverter o circuito da armadura em relação ao circuito que gera o campo ou vice-versa (o mais comum é inverter o circuito da armadura). A inversão de ambos manterá o mesmo sentido de rotação.

Pode parecer que, devido ao fato de a corrente de campo ser maior do que a corrente na armadura, seria melhor inverter o sentido de rotação pela inversão do circuito de campo.

Contudo, o mais comum é que se projetem motores em que a inversão no sentido de rotação seja obtida através da inversão do circuito de armadura pois:

- ✓ Os circuitos de campo são circuitos altamente indutivos, o que implica em *fem* induzidas muito elevadas ao executar o chaveamento, o que pode causar desgaste prematuro dos contatos das chaves.
- ✓ Se o campo-shunt é invertido, o campo-série também o deve ser, senão o motor composto cumulativo se tornará um motor composto diferencial.
- ✓ As ligações do circuito da armadura estão naturalmente disponíveis por motivos de regeneração e frenagem, de modo que pode-se aproveitá-las para executar a inversão.

No caso de motores compostos, a inversão apenas das conexões da armadura provoca a inversão no sentido de giro do motor tanto para as ligações longas, como para as curtas, como pode-se perceber na Figura 3.12, sem precisar mudar o sentido da corrente nos enrolamentos de campo.

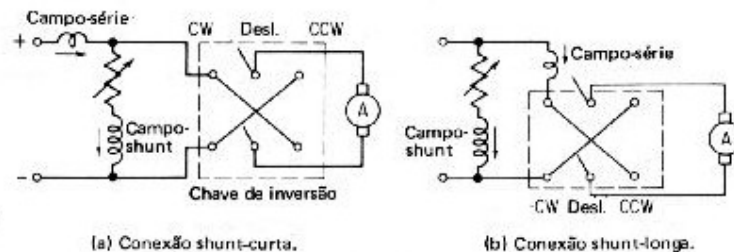


Figura 3.12 - Inversão da rotação em motores compostos.

3.7. Frenagem regenerativa

Todos os motores, devido ao fato de gerarem força contra eletro-motriz, podem ser considerados como geradores. A recíproca também é verdadeira, geradores produzem torque em sentido contrário. A frenagem regenerativa permite diminuir a velocidade do veículo (diminuindo a utilização dos freios mecânicos) e re-alimentar as baterias aumentando assim, a autonomia do veículo. O motor série é raramente usado na prática para frenagem regenerativa devido às suas propriedades instáveis como gerador. Os modernos controladores eletrônicos podem resolver este problema mas, ainda assim, de maneira não tão efetiva, de tal sorte, que no caso da frenagem ser realmente necessária deve-se escolher outro tipo de motor que não o série.

O motor shunt é diretamente adaptável como um gerador. A maioria dos geradores são na prática do tipo shunt. O comportamento linear ou quase linear do torque e velocidade versus a corrente de um motor *shunt* traduz-se numa linearidade entre a tensão e

corrente quando este é usado como gerador. Este efeito também traduz-se num alto grau de estabilidade que faz do motor shunt o ideal para frenagem regenerativa tanto manual quanto eletrônica.

O motor composto pode ser facilmente adaptável para atuar como um motor shunt durante a frenagem regenerativa. Seu enrolamento em série fornece um torque de partida adicional, mas que pode ser contornado durante a frenagem, e seu enrolamento shunt lhe fornece melhores características como gerador. Os motores compostos podem ser manual ou eletronicamente controlados para seu uso durante a frenagem regenerativa. Segundo Palhares e Pomilio, 1987, a autonomia de um dado veículo elétrico pode ser aumentada em cerca de 30% com o uso da frenagem regenerativa.

3.8. Outros tipos de motores

3.8.1. Motores CC de imã permanente

Os motores CC de imã permanente tem sido cada vez mais utilizados. Os novos materiais utilizados para construção destes imãs têm permitido redução do peso e do tamanho dos mesmos. Embora ainda necessitem de comutadores e escovas, sua complexidade é menor devido ao fato de não possuírem enrolamento de campo e por este mesmo motivo há um ganho em eficiência já que não há necessidade de corrente para o campo. Os motores de imã permanente tem características semelhantes aos motores shunt quanto ao torque, velocidade, reversão e frenagem regenerativa. Devido ao fato dos materiais modernamente utilizados permitirem maiores níveis de força magnética, os motores de imã permanente tem torque de partida muitas vezes maior do que o motor shunt e sua curva característica velocidade versus carga é mais linear e mais fácil de prever.

3.8.2. Motores CC sem escovas

O próximo passo na otimização da eficiência é a eliminação das escovas e comutadores do motor CC. Isto é hoje uma realidade com o uso de semicondutores de potência que podem trabalhar com altas correntes, altas tensões elétricas e altas frequências. A configuração destes motores sem escova lembra a dos motores de imã permanente com a troca de posição entre o campo fixo do estator por um campo fixo no rotor e vice-versa. Seu rotor compõe-se de dois ou mais pólos de imãs permanentes e o estator carrega o enrolamento principal anteriormente encontrado no rotor ou armadura. Sensores de posição no eixo do rotor enviam sinais à chaves

semicondutoras que controlam as correntes no enrolamento em relação à posição do rotor magnético. Sem escovas para substituir ou comutadores para consertar, os motores sem escova são considerados os motores com maior vida útil e livres de manutenção que existem. Já que este tipo de motor carrega vários componentes eletrônicos, é possível adequá-lo para vários perfis de trabalho. Na verdade o motor sem escovas se assemelha muito à um motor de corrente alternada na sua construção. Os motores sem escova se assemelham aos motores de ímã permanente quanto às suas características como alto torque de partida e relações lineares de velocidade e torque e com uma eficiência ainda maior pelo fato de não possuir escovas e comutadores.

3.8.3. Motores CC universais

Embora qualquer motor CC possa operar em CA, nem todos os tipos de motores CC operam de maneira tão eficiente e alguns podem até não partir. Caso queira-se operar um motor CC em CA deve-se projetá-lo para tanto. Um motor CC série é geralmente escolhido como ponto de partida para um motor universal que deva operar tanto em CC como em CA. Motores CC projetados para operar em CA têm tipicamente núcleos do rotor e estator com sua laminação otimizada para minimizar as perdas por histerese. Da mesma maneira seu enrolamento é otimizado para evitar perdas e compensar a menor densidade de fluxo de campo. Comutadores com maior número de segmentos são usados para reduzir a produção de faíscas. No geral os motores série CC operando em CA apresentam quase a mesma performance mas são menos eficientes à uma dada tensão.

3.8.4. Motores De Indução De Corrente Alternada

Segundo Brant, o motor de indução de corrente alternada, criado por Nikola Tesla em 1888, é basicamente um transformador rotativo cuja carga no secundário foi substituída por uma peça rotativa. Este rotor somente precisa que seus condutores sejam rigidamente agrupados e conectados ao eixo do motor.

Quando uma corrente alternada é aplicada no enrolamento primário (estator), o campo magnético alternante resulta numa transferência de energia por indução ao rotor. Como a energia é recebida pelo rotor sem a necessidade de ligação direta, não se faz necessário o uso de escovas e comutadores.

Já que o rotor é um componente simples ainda que de construção robusta, os motores de indução são muito mais baratos do que os similares de corrente contínua na mesma faixa de potência. Isto se confirma tanto no custo inicial quanto no custo de manutenção.

As principais vantagens do motor CA de indução sobre o motor CC são:

- ✓ Não necessita de escovas ou comutadores;
- ✓ Custos de manutenção mais baixos;
- ✓ Possibilidade de operar em ambientes contaminados ou explosivos;
- ✓ Maior confiabilidade;
- ✓ Maior eficiência;
- ✓ Mais robusto;
- ✓ Menor custo;
- ✓ Menor peso;
- ✓ Menor volume;
- ✓ Menor inércia.

Apesar desta lista de vantagens o uso dos motores de indução para aplicação que exigem velocidades variáveis só foi possível após a introdução de controladores eletrônicos de estado sólido. Estes novos componentes eletrônicos fizeram com que os motores de indução apresentassem performance igual ou até melhor do que os motores CC. Esta é uma tendência que vai aumentar a utilização do motor CA de indução para tração veicular.

Normalmente encontram-se motores CA monofásicos ou trifásicos. Os trifásicos exigem mais componentes de controle o que os torna muito mais caros e complexos. Os motores CA monofásicos precisam de um dispositivo de partida para que possam sobrepujar sua inércia. Existem basicamente duas maneiras de partir um motor monofásico. Uma delas é o uso de um segundo enrolamento junto ao estator que induza uma corrente no rotor que esteja fora de fase com o campo principal. Neste caso, normalmente a resistência do segundo enrolamento é maior para maximizar a diferença de fase. Para minimizar a dissipação de potência e eventual aquecimento dos componentes uma chave centrífuga é usada para desligar esta segunda bobina quando o rotor atinge $\frac{3}{4}$ de sua velocidade síncrona. A segunda e mais comum maneira de partir um motor CA monofásico é o uso de um capacitor de partida. Este capacitor fornece uma diferença de fase ainda maior, próximo à 90° , se comparado ao método anterior. Neste caso temos também um maior torque de partida, cerca de três a cinco vezes maior. A tabela 3.1 mostra um quadro comparativo entre os diversos tipos de motores elétricos.

Tipo	Torque de partida	Velocidade	Frenagem regenerativa
Excitação separada	Fraco	Constante	raramente usado
Série	Elevado	Variável (embala em vazio)	raramente usado
Shunt	Fraco	Constante	diretamente adaptável
Composto Cumulativo	Elevado	Pouco variável	Adaptável
Composto Diferencial	Fraco	Constante	Adaptável

Tabela 3.1 - Quadro Comparativo de Motores de CC

3.9. Avarias Típicas de um Motor de CC

3.9.1. Produção de Faíscas entre o Comutador e as Escovas

As escovas podem estar em posição errada ou o contacto com o comutador pode ser defeituoso; a sua qualidade pode ser ruim ou a montagem no porta-escovas pode não ser a mais correta, podendo também ser um problema da mola que pressiona a escova contra o comutador. Como o comutador necessita de um ajuste perfeito com as escovas, se existir neste um estado de conservação precário, por exemplo sujo e com irregularidades ou com micas salientes, pode haver produção de faíscas. Além disso, uma outra situação que pode influenciar as faíscas é o caso das bobinas indutoras se encontrarem em curto-circuito. Também pode acontecer que as bobinas dos pólos auxiliares estejam com defeito na ligação, portanto mal ligados ou em curto-circuito. O curto-circuito no indutor e a inadequada ligação das bobinas do induzido às lâminas do comutador podem também provocar faíscas. Se houver falta de isolamento entre as lâminas do comutador pode-se provocar um curto-circuito que mais uma vez pode ser a causa das faíscas que surgem. A sobrecarga e a velocidade excessiva também influenciam o aparecimento deste fenómeno.

3.9.2. Aquecimento Anormal dos Componentes do Motor

3.9.2.1 Aquecimento do Induzido

Este aquecimento pode ser provocado pela sobrecarga ou pelo curto circuito, tendo também de se considerar as perdas exageradas por histereses e pelas correntes parasitas ou correntes de Foucault ou ainda defeitos de fabricação. O defeito de isolamento em relação à

carcaça devido à umidade ou o curto circuito entre espiras ou entre as extremidades das espiras provoca uma redução brusca da resistência do circuito fazendo elevar a sua temperatura.

3.9.2.2 Aquecimento do Indutor

A corrente de excitação que passa nas bobinas indutoras quando excessivas provoca um aquecimento. Quando a temperatura aumenta, pode provocar falhas no isolamento (derretendo o verniz que isola espiras entre si).

3.9.2.3 Aquecimento do Comutador

O aquecimento do comutador pode ser provocado pela pressão exagerada das escovas ou pela posição errada das mesmas em relação ao comutador ou uma falha de dimensionamento das escovas para o comutador em questão. A sobrecarga e o isolamento inadequado entre as lâminas do comutador devido à sujeira também são fatores que influenciam o aumento de temperatura.

3.9.2.4 Aquecimento dos Apoios

Se a máquina estiver em funcionamento e lubrificação não for efetuada regularmente e de uma forma eficaz, ou por qualquer motivo o óleo que se destinava à lubrificação estiver em falta ou ainda se estiver em mau estado ou impróprio, ou também é possível que os anéis de lubrificação estejam em mau funcionamento ou defeituosos, assim a máquina começa a girar comprimindo as superfícies metálicas, provocando um aquecimento. Se o sistema a que o motor está ligado não for adequado para as suas características, ele fica sujeito a uma tensão excessiva, tendo também como consequência um aquecimento exagerado.

3.9.3. Motor Não Parte

Caso o motor não arranque, deve-se verificar se existe falta de tensão elétrica e se o circuito elétrico até ao motor encontra-se em pleno estado de conservação e de funcionamento. No entanto, deve-se verificar se o reostato de arranque está em perfeito estado de funcionamento e se não possui nenhuma interrupção no seu circuito elétrico, podendo também existir erros de ligação do reostato. Um outro motivo pelo qual o motor pode não arrancar deve-se à interrupção ou curto-circuito nos enrolamentos indutores ou à posição inadequada das escovas. No caso de o isolamento do motor estar defeituoso, ele poderá também não funcionar.

3.9.4. Funcionamento Ruidoso

O funcionamento ruidoso do motor pode dever-se a um curto-circuito ou à falta de carga que poderá levar o motor a atingir velocidades muito elevadas. A sobrecarga, o mau estado do comutador e das escovas, o choque do induzido contra as peças polares, o induzido desequilibrado, defeitos nos apoios do veio, parafusos desapertados, rolamentos mal lubrificados e defeitos no acoplamento da correia de transmissão são fatores que farão, certamente, com que o motor funcione de uma forma ruidosa.

Os motores existentes no mercado custam de U\$ 50 à U\$ 1.700 dependendo da potência e recursos desejados. Os fabricantes mais conhecidos são Advanced DC, General Electric, Kostov, Lemco e Prestolite. A figura 3.13 mostra um motor Advanced DC em corte.

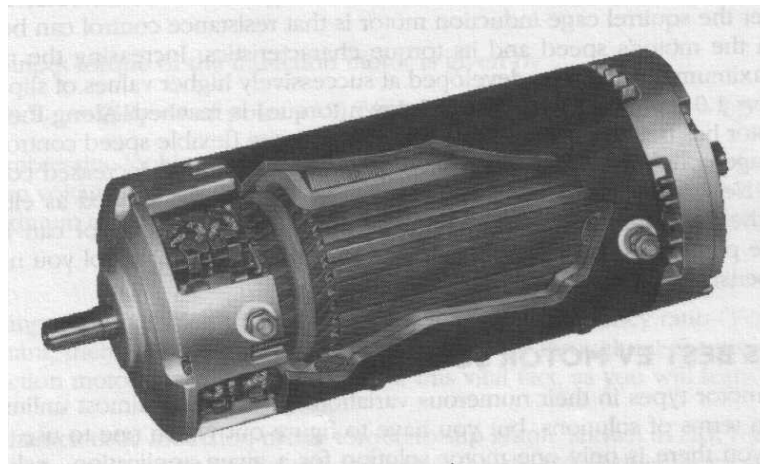


Figura 3.13 - Motor Advanced DC em corte.

4. CÉLULA DE COMBUSTÍVEL

O veículo elétrico convencional tem geralmente como fonte de energia baterias elétricas. Embora as baterias elétricas representem atualmente a maneira mais barata e acessível de armazenar a energia elétrica necessária para mover um veículo elétrico, existem outras fontes que podem ser usadas. Dentre elas destaca-se a célula de combustível. Relatos recentes mostram que no ano de 2004 já serão comercializados veículos elétricos equipados com este tipo de fonte de energia. Na figura 4.1 podemos ver o Nekar3 que é um protótipo da Daimler-Chrysler que usa esta tecnologia.



Figura 4.1 - Nekar, protótipo da Daimler-Chrysler movido à célula de combustível.

4.1. Funcionamento célula de combustível

Uma célula de combustível é um equipamento eletro-químico que usa hidrogênio e oxigênio e gera eletricidade e calor. É similar à uma bateria que pode ser recarregada enquanto retira-se energia dela.

Ao invés de usar eletricidade, para recarregá-la usa-se hidrogênio e oxigênio.

A célula de combustível compete com outras formas de conversão de energia como turbinas à gás, motores à gasolina e baterias. Ela fornece corrente contínua que pode ser usada para acionar motores, iluminação e outros equipamentos elétricos.

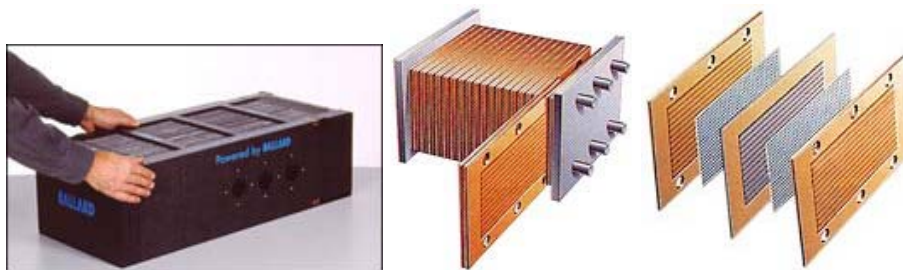


Figura 4.2 - Célula de combustível adaptável à um veículo elétrico (Fonte site How Stuff Works)

Existem muitos tipos de célula de combustível, cada um usando um tipo diferente de química. A célula de combustível é classificada de acordo com o tipo de eletrólito utilizado. Alguns tipos de células de combustível podem ser usadas em plantas de geração de energia e outras podem ser usadas para aplicações portáteis menores ou para mover veículos.

Segundo Nice, 2003, a célula de combustível tipo de membrana de troca de prótons ou “*proton exchange membrane fuel cell (PEMFC)*” é uma das mais promissoras tecnologias. Este é o tipo de célula de combustível que mais provavelmente irá fornecer energia para mover carros, ônibus e outros veículos.

4.2. Membrana de troca de prótons

A tecnologia PEMFC é uma das mais simples reações que podem ser utilizadas em uma célula de combustível. A figura 4.3 mostra a composição de uma célula de combustível tipo PEMFC.

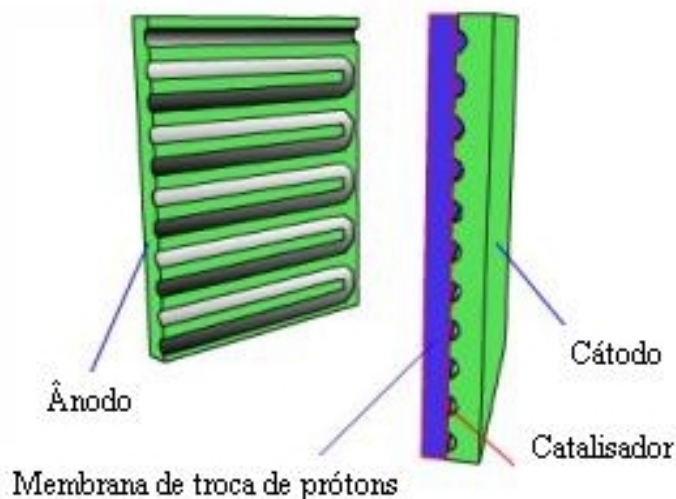


Figura 4.3 - Componentes de uma célula de combustível tipo PEMFC.

Neste tipo de célula de combustível encontram-se quatro elementos básicos:

- ❑ O ânodo é o pólo negativo da célula de combustível e tem várias funções. Ele conduz os elétrons que são liberados das moléculas de hidrogênio para que eles possam ser usados no circuito externo. Ele possui canais gravados em sua superfície que dispersam o gás hidrogênio homogeneamente sobre a superfície do catalisador.
- ❑ O cátodo é o pólo positivo da célula de combustível e tem canais gravados em sua superfície que distribuem o oxigênio para a superfície do catalisador. Ele também conduz os elétrons de volta do circuito externo para o catalisador, onde eles podem re-combinar com os íons de hidrogênio e oxigênio para formar água.
- ❑ O eletrólito é a membrana de troca de prótons. Esta membrana de material tratado especialmente, permite apenas a passagem de íons positivos. A membrana bloqueia elétrons.
- ❑ O catalisador é um material especial que facilita a reação do oxigênio com o hidrogênio. Ele é geralmente feito de pó de platina finamente depositado sobre um papel ou tecido de carbono. O catalisador é grosso e poroso de maneira a expor ao hidrogênio e ao oxigênio a maior área possível de platina. A superfície do catalisador coberta de platina é posicionada de frente para a membrana de troca.

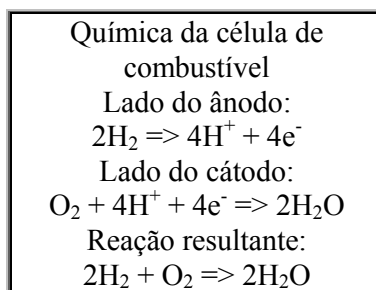


Figura 4.4 – Equação eletro-química de uma célula de combustível

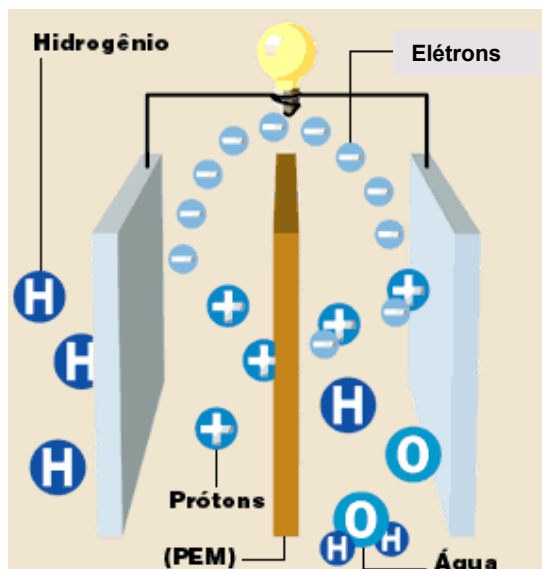


Figura 4.5 - Reações químicas em uma célula de combustível

O processo de reação química que ocorre na célula de combustível pode ser visto nas figuras 4.4 e 4.5. O gás hidrogênio pressurizado (H_2) entra na célula de combustível pelo lado do ânodo. Este gás é forçado sob pressão através do catalisador. Quando uma molécula de H_2 entra em contato com a platina no catalisador esta se divide em dois íons H^+ e dois elétrons (e^-). Os elétrons são conduzidos através do ânodo e fazem seu caminho para o circuito externo (esta corrente é a que gira um motor por exemplo) e retorna pelo lado do cátodo da célula de combustível.

Durante este processo, no lado do cátodo da célula de combustível, gás oxigênio (O_2) é forçado através do catalisador onde se formam dois átomos de oxigênio. Cada um destes átomos tem uma forte carga negativa. Esta carga negativa atrai os dois íons H^+ através da membrana onde eles se combinam com um átomo de hidrogênio e dois dos elétrons do circuito externo para formar uma molécula de água (H_2O).

Esta reação numa única célula de combustível produz apenas cerca de 0,7 volts. Para conseguir tensões elétricas mais altas muitas células de combustível são agrupadas para formar uma bateria.

A membrana opera em baixas temperaturas (cerca de $80^\circ C$) elimina a necessidade de estruturas reforçadas de contenção. Com as melhorias contínuas na tecnologia e nos materiais empregados nas células de combustível têm-se obtido aumento na densidade de potência de tal maneira que uma célula de combustível de tamanho reduzido poderá alimentar um carro.

4.3. Problemas com células de combustível

A célula de combustível usa oxigênio e hidrogênio para produzir eletricidade. O oxigênio vem do ar. Normalmente numa célula de combustível com membrana de troca, o ar atmosférico é bombeado para dentro do cátodo. O hidrogênio, por sua vez, requer um processo mais complicado e de maior custo para sua obtenção. Ele possui certas limitações que o tornam impraticável para seu uso em muitas aplicações. Não existem, por exemplo, estações de hidrogênio disponíveis nas cidades. Deve-se lembrar de que o hidrogênio é um gás explosivo.

O hidrogênio é difícil de ser armazenado e distribuído, então seria mais conveniente que as células de combustível usassem combustíveis encontrados mais facilmente. Este problema é resolvido com um equipamento chamado reformador. Um reformador transforma combustíveis fósseis ou álcool em hidrogênio que é então utilizado pela célula de combustível. Infelizmente estes equipamentos não são perfeitos, pois, geram calor e produzem outros gases além do hidrogênio. O reformador usa diversos dispositivos para purificar o hidrogênio, mas mesmo assim o hidrogênio gerado por ele não é puro e isto diminui a eficiência da célula de combustível. Os mais promissores combustíveis são o gás natural, o propano e o metanol. Como muitas residências são providas de tubulações de gás natural, este provavelmente será mais utilizado para células de combustível residenciais. Já o metanol é um combustível líquido com propriedades similares às da gasolina. Tem a mesma facilidade para se armazenar e distribuir se tal modo que provavelmente será o mais indicado para alimentar as células de combustíveis automotivas.

4.4. Eficiência da célula de combustível

As células de combustível podem ser usadas para aumentar a eficiência dos veículos. A redução da poluição é um dos objetivos primários da célula de combustível. Para avaliar-se o impacto ambiental, uma comparação entre um veículo equipado com uma célula de combustível, um veículo convencional com motor de combustão interna e um veículo elétrico equipado com baterias deve ser feita. Já que eles possuem o mesmo tipo de transmissão, pneus e outros sistemas pode-se ignorá-los e comparar as eficiências até o ponto onde a potência mecânica é gerada. Começando com os veículos com célula de combustível e lembrando que, apesar de serem aproximações, estas eficiências devem estar muito próximas da realidade para efeito de comparação.

4.4.1. Veículo elétrico movido à célula de combustível

De acordo com Nice, se a célula de combustível é alimentada com hidrogênio puro, ela tem o potencial de chegar até 80% de eficiência. Isto significa que ela pode converter 80% da energia contida no hidrogênio em energia elétrica. Como hidrogênio puro é de difícil armazenagem no veículo, quando adicionamos o reformador para converter o metanol em hidrogênio, a eficiência cai para 30 à 40%.

Ainda é necessário converter energia elétrica em trabalho mecânico. Isto é conseguido pelo motor elétrico e pelo inversor. Um valor razoável para a eficiência do conjunto motor/inversor é de cerca de 80%. Desta forma teremos uma eficiência global de conversão da energia contida no hidrogênio para trabalho mecânico de 24 à 32%.

4.4.2. Veículo com motor de combustão interna

A eficiência de um veículo movido à gasolina é surpreendentemente baixa. Todo o calor que sai pelo escapamento ou é dissipado no radiador é energia desperdiçada. O motor também usa muita energia para acionar válvulas, bombas, ventiladores e alternadores. Segundo Nice, a eficiência global do motor de um veículo à gasolina é cerca de 20%, ou seja, somente cerca de 20% da energia térmica da gasolina é convertida em trabalho mecânico.

4.4.3. Veículo Elétrico à bateria

Este tipo de veículo tem uma eficiência razoavelmente alta (Brant, 1994). A bateria é cerca de 90% eficiente e o conjunto motor/inversor tem 80% de eficiência. Isto nos dá uma eficiência global de aproximadamente 72%.

A energia elétrica usada pelas baterias tem de ser gerada em outra parte. Se esta energia veio de uma usina que usa a combustão em seu processo ao invés de nuclear, hidroelétrica, solar ou eólica, então somente cerca de 40% do combustível necessário na usina foi convertido em eletricidade. O processo de recarga do veículo requer a conversão de corrente alternada para contínua. Este processo tem uma eficiência de 90%.

Olhando o ciclo completo, a eficiência de um veículo elétrico é 72% para o veículo, 40% da usina e 90% da recarga. Isto nos dá uma eficiência global de 26%. Esta eficiência global varia

consideravelmente e depende do tipo de geração da energia elétrica utilizada. No caso da geração hidrelétrica, que é o caso do Brasil, a eficiência global do veículo sobe para cerca de 65%.

Esta comparação mostra a importância de se considerar a fonte geradora da energia no princípio do processo e não apenas o veículo. Deve-se inclusive ir além e questionar qual é a eficiência do processo de obtenção da gasolina, metanol ou carvão.

A eficiência não é o único ponto a considerar. As pessoas não comprarão um veículo por que ele é o mais eficiente se isto significar também uma mudança no comportamento delas. Elas se preocupam com vários outros detalhes. Eles querem saber, por exemplo:

- ❑ O veículo é rápido e fácil de abastecer?
- ❑ Ele tem uma boa autonomia?
- ❑ Ele é tão rápido quanto os outros veículos disponíveis?
- ❑ Quanta poluição ele produz?

Esta lista de indagações continua. No final, a tecnologia que vencer será uma combinação entre a eficiência e a praticidade.

4.5. Outros tipos de células de combustível

Segundo Nice, existem muitos outros tipos de tecnologias sendo desenvolvidas para um possível uso comercial:

- ❑ Célula de combustível alcalina (AFC): Este é um dos projetos mais antigos. Ele tem sido usado no programa espacial americano desde 1960. Este tipo é muito sensível à contaminação, por isto exige hidrogênio e oxigênio puros. Este tipo é também muito caro e por isso dificilmente será fornecido comercialmente.
- ❑ Célula de combustível de ácido fosfórico (PAFC): Este tipo de célula de combustível tem potencial para aplicação em pequenos geradores estacionários. Ele opera em temperaturas mais altas do que a célula de combustível tipo PEM e devido a isto requer um tempo de aquecimento maior. Este fato o torna inviável para o uso em veículos.
- ❑ Célula de combustível tipo óxido sólido (SOFC): Estas células são melhor aplicadas a geradores estacionários de grande porte que poderiam suprir eletricidade à fábricas ou pequenas cidades. Elas operam à altas temperaturas, cerca de 1.000 °C. Estas altas temperaturas trazem uma menor confiabilidade ao sistema mas também uma vantagem. O vapor produzido por esta célula pode ser

canalizado para turbinas para gerar ainda mais eletricidade. Isto melhora a eficiência global do sistema.

- Célula de combustível de carbonato fundido (MCFC): Estas células também são melhores aplicadas a geradores estacionários de grande porte. Elas operam a 600°C e também produzem vapor que pode ser usado para gerar mais potência. Elas operam em uma temperatura menor do que as do tipo SOFC o que significa que elas não requerem materiais tão sofisticados na sua construção. Isto torna o seu custo um pouco mais baixo.

4.6. Aplicação das células de combustível

Segundo diversas revistas especializadas, os automóveis movidos à célula de combustível começarão a substituir os carros à gasolina e diesel no ano de 2005. Um automóvel deste tipo será muito similar a um veículo elétrico atual mas com uma célula de combustível e um reformador no lugar das baterias. Muito provavelmente estes veículos usarão metanol como combustível mas algumas empresas estão trabalhando com reformadores de gasolina. Outras empresas esperam que o reformador não seja necessário e estão trabalhando com sistemas avançados de estocagem e distribuição do hidrogênio.

As células de combustível também são aplicáveis a equipamentos eletrônicos portáteis como laptops, telefones celular ou até mesmo aparelhos auditivos. Nestas aplicações a célula de combustível terá uma vida muito maior do que uma bateria e poderão ser rapidamente recarregada com um combustível líquido ou gasoso.

Ônibus movidos à célula de combustível já estão rodando em algumas cidades na Europa e EUA. O ônibus foi um dos primeiros veículos a usar células de combustível por que no início as células precisavam ser muito grandes para produzir a energia suficiente para acionar um veículo. No primeiro ônibus movido à célula de combustível cerca de um terço do veículo era ocupado pela célula de combustível. Atualmente, a densidade de potência cresceu a tal ponto que um ônibus pode ser alimentado com uma célula muito menor.

A geração de energia elétrica residencial é uma aplicação promissora da tecnologia da célula de combustível que poderá logo ser adquirida comercialmente. A General Electric oferecerá um sistema de geração à célula de combustível que usará um reformador de gás natural ou propano para gerar até sete kilowatts de potência que é suficiente para a maioria das casas. Este sistema produzirá além da eletricidade uma considerável quantidade de calor que poderá ser

usada para aquecer a água e o ambiente da residência economizando ainda mais outros tipos de energia.

Algumas tecnologias têm potencial para substituir atuais usinas termoelétricas. Grandes células de combustível poderão até mesmo gerar eletricidade com mais eficiência do que as termoelétricas. A tecnologia empregada será aquela que obtém eletricidade diretamente do hidrogênio na célula de combustível. Estas usinas também usarão o vapor produzido na célula para alimentar turbinas e, desta maneira, aumentar ainda mais a geração de eletricidade. Já existem em alguns lugares células de combustível de grande porte funcionando como sistemas de alimentação de emergência em hospitais e fábricas.

5. BATERIAS

Apesar das novas tecnologias que estão sendo pesquisadas, as baterias tipo chumbo-ácido continuam sendo a opção mais disponível e de menor custo para a utilização em veículos elétricos. Se elas são instaladas e mantidas corretamente podem durar de 500 à 800 ciclos de recarga em uma aplicação típica de tração.

A análise da estrutura e funcionamento de uma bateria traz um melhor entendimento de suas capacidades e limitações quando usadas em veículos elétricos.

Uma bateria é, na realidade, uma usina eletroquímica. Ela transforma energia química em elétrica. Segundo Brant, foi descoberta no ano de 1798 por Alessandro Volta. Desde então as baterias têm sido aperfeiçoadas mas o seu princípio de funcionamento ainda é o mesmo. O fenômeno acontece no interior de cada célula que compõe uma bateria. Esta célula contém dois materiais ativos ou eletrodos e uma solução ou eletrólito que é o meio condutivo entre eles. Existem dois tipos de baterias a primária e a secundária. Na primária todo o material de um dos eletrodos (geralmente o negativo) é consumido durante o processo de tal forma que sua célula têm de ser descartada ou seu eletrodo substituído. Um exemplo típico são as pilhas usadas em pequenos aparelhos eletrônicos ou elétricos. Na bateria secundária, o processo químico é reversivo, ou seja, os materiais ativos ou eletrodos podem ser recuperados à sua condição original quando a célula é recarregada. Uma bateria pode ser constituída de uma célula, como nos casos das pilhas, ou de várias células em um compartimento como as baterias utilizadas em veículos automotores.

Os elementos ativos são conhecidos como pares eletroquímicos. Isto significa que um dos materiais ativos, o pólo positivo ou ânodo, tem deficiência de elétrons enquanto o outro material, o pólo negativo ou cátodo, é rico em elétrons livres. Os eletrodos são geralmente sólidos mas podem ser líquidos ou gases dependendo do tipo de bateria considerada.

Quando uma carga é conectada à bateria, a tensão da mesma produz uma corrente externa que flui do pólo positivo para o negativo e que corresponde ao fluxo interno de elétrons do pólo negativo para o positivo. A tensão observada em uma célula galvânica é a soma do que acontece no ânodo e no cátodo. Para fazer uma bateria ideal deve-se escolher um material com maior potencial de oxidação para o ânodo e um material com maior potencial de redução para o cátodo. A escolha ideal seria então o Lítio, com potencial de redução de +3,045 volts (em relação ao hidrogênio), com algum material que receba elétrons, ou o Flúor, com potencial de oxidação de -2,87, com algum material doador de elétrons.

Na prática, muitos outros fatores tornam difícil a obtenção de tal bateria ideal como a disponibilidade dos materiais e seu custo e a capacidade de produzi-lo em larga escala. Como resultado disto e devido a problemas relacionados com o meio-ambiente, apenas alguns pares eletroquímicos podem ser utilizados comercialmente na prática.

O eletrólito serve de caminho para a migração dos elétrons entre os eletrodos e, em alguma células, participa da reação química. O eletrólito é geralmente um líquido formado de um ácido, sal ou uma base diluído em água, mas pode ser encontrado também sob a forma de gel. As figuras 5.1 à 5.4 mostram as reações eletro-químicas dentro de uma célula simples tipo chumbo-ácido em quatro estágios: totalmente carregada, descarregando, completamente descarregada e carregando. Ela consiste de dois eletrodos sendo o cátodo(-) feito de liga de chumbo (Pb) e o ânodo(+) de óxido de chumbo (PbO₂), imersos no eletrólito composto de ácido sulfúrico (H₂SO₄) diluído em água.

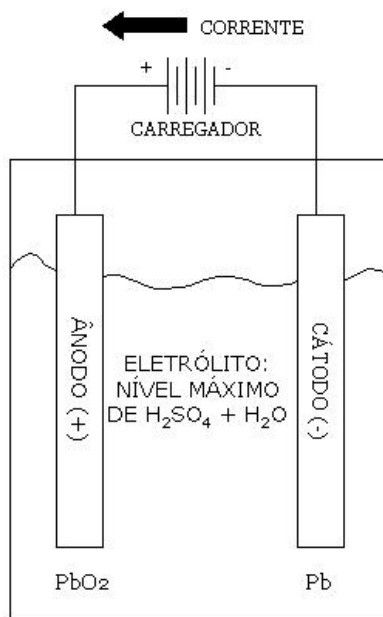


Figura 5.1 - Célula completamente carregada.

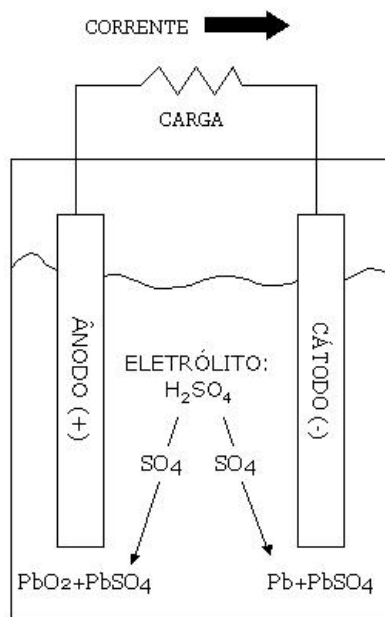


Figura 5.2 - Célula sendo descarregada.

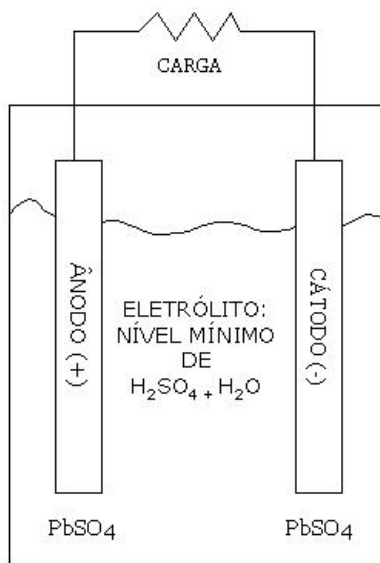


Figura 5.3 - Célula completamente descarregada.

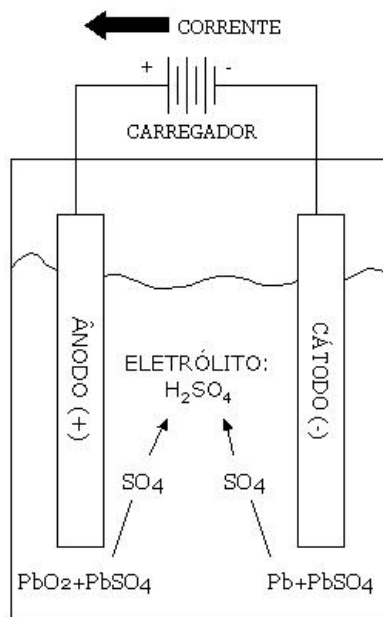
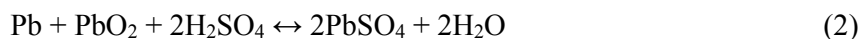


Figura 5.4 - Célula sendo recarregada.

A equação que descreve o processo que ocorre no interior de uma bateria tipo chumbo-ácido é:



O lado esquerdo da equação representa a célula na condição carregada e o lado direito na condição descarregada. Em uma célula carregada seu pólo positivo (ânodo) é formado quase que totalmente de óxido de chumbo (PbO_2), seu cátodo de liga de chumbo (Pb) e o eletrólito ácido sulfúrico (H_2SO_4) diluído em água. Na condição descarregada ambos os pólos são formados por sulfato de chumbo PbSO_4 e o eletrólito tem sua menor concentração de ácido sulfúrico.

Analisando a equação geral acima separadamente em cada eletrodo tem-se uma visão mais precisa do processo de descarregamento de uma bateria. No ânodo temos:

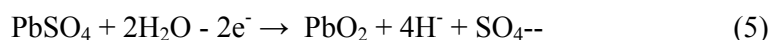


Já no cátodo a equação fica:



Durante a descarga, o cátodo adquire o íon sulfato SO_4^{--} do eletrólito e libera dois elétrons no processo. Estes elétrons são capturados pelo ânodo que é deficiente em elétrons. O fluxo de elétrons do pólo negativo para o positivo no interior da bateria provoca a corrente elétrica de mesmo sentido através da carga aplicada aos pólos positivo e negativo externos da bateria. Durante o processo de descarga ambos os eletrodos tornam-se cobertos por sulfato de chumbo que é um isolante elétrico e os íons sulfato são consumidos do eletrólito. Isto faz com que a área livre de sulfato nos eletrodos diminua o que acarreta um aumento na resistência interna da célula e por conseqüência diminui também sua tensão de saída. Em um determinado ponto, antes que todos os íons sulfatos sejam consumidos do eletrólito, não há mais área disponível nas placas para a reação química e a bateria é considerada totalmente descarregada.

A reação química de carga no ânodo é descrita por:



No cátodo tem-se:



O processo de carga reverte o fluxo de elétrons através da bateria e causa a quebra na ligação química entre o chumbo e o íon sulfato liberando este último de volta na solução. Quando todos os íons sulfato estão de volta ao eletrólito a bateria é considerada totalmente carregada.

O ácido sulfúrico, quando puro, tem densidade igual à 1,830 em relação à água. Em uma bateria totalmente carregada à temperatura de 25°C, o eletrólito, numa proporção de 25% de ácido para 75% de água, tem densidade de 1,2075. Neste caso o ácido sulfúrico representa aproximadamente 36% da massa da solução. A densidade da solução é importante em uma bateria tipo chumbo-ácido pois, a quantidade de ácido sulfúrico que está se combinando com os eletrodos em um dado instante, é diretamente proporcional à razão de descarga geralmente medida em Ah. Desta maneira pode-se adotar a densidade do eletrólito como um indicador direto do estado da carga.

A tensão, a resistência interna e a quantidade de ácido sulfúrico que se combina com os eletrodos em um determinado instante são todos indicadores da quantidade de energia que uma bateria armazena. Frequentemente este valor é expresso em termos de porcentagem em relação ao seu estado de carga máxima. Por exemplo quando falamos em 75% significa dizer que 75% da energia da bateria ainda está disponível e 25% já foi gasta.

Tradicionalmente a densidade do eletrólito é usada como medida. Atualmente, devido a facilidade de se medir a tensão de cada célula, a medição com o densímetro vai sendo substituída, visto que, esta pode trazer imprecisões de leitura e contaminação do eletrólito.

A medida que a bateria completa seu ciclo de recarga, outro fenômeno ocorre no interior da célula. Gás hidrogênio H_2 é liberado no cátodo e gás oxigênio O_2 no ânodo. Isto se deve ao fato de que qualquer corrente além daquela necessária para liberar pequenas quantidades de sulfato das placas ioniza a água presente no eletrólito e inicia o processo de hidrólise separando o hidrogênio e o oxigênio. A maior parte do hidrogênio e oxigênio se recombina formando vapor de água. A presença do gás hidrogênio que é altamente inflamável e explosivo é o que leva a necessitar um ambiente ventilado e livre de faíscas ou fogo quando as baterias estão sendo carregadas. O vapor de água liberado é o principal motivo da necessidade constante de verificar-se o nível do eletrólito e em certos casos completá-lo com água destilada.

Com o tempo as células de uma bateria começam a mostrar diferenças na leitura da tensão. Este fato pode ser causado pela temperatura, materiais utilizados, tipo de construção ou eletrólito. A estratificação do eletrólito devido à maior densidade do ácido sulfúrico pode causar um desgaste maior das placas na região mais baixa da bateria e estimular esta diferença. A única solução para este problema é o uso de uma corrente de sobrecarga controlada para equalizar as células. Isto é feito através do aumento da tensão após a bateria estar completamente carregada. Deve-se manter esta tensão por algumas horas até que todas as células apresentem valores semelhantes. Obviamente este processo leva à uma produção maior de hidrogênio e vapor de água o que obriga a tomar-se maiores cuidados em relação à segurança mantendo a área bastante ventilada.

Adicionar ácido sulfúrico à uma bateria descarregada não a faz recarregar-se. Isto apenas aumenta a densidade do eletrólito sem converter o sulfato de chumbo das placas em material ativo. Somente com a passagem de uma corrente através do eletrólito é que teremos a célula de volta a sua condição de carga total.

A vida útil limitada de uma bateria é causada pelo fato de não se poder remover todo o sulfato de chumbo das placas durante a recarga. Quanto mais tempo o sulfato permanecer aderido à placa mais difícil será removê-lo. Para prolongar a vida útil de uma bateria deve-se mantê-la carregada e a equalização das células deve ser realizada regularmente.

Para classificar uma bateria usa-se alguns valores padronizados. Capacidade é a medida de quanta energia a bateria pode conter. A capacidade depende de muitos fatores e os mais importantes são:

- Área das placas em contato com o eletrólito;
- Peso e quantidade da material nas placas;
- Número de placas e tipo de separadores usados entre elas;
- Quantidade e densidade do eletrólito;
- Tempo de uso da bateria;
- Condição da célula, sulfatação, sedimentação, etc.;
- Temperatura;
- Razão de descarga.

A capacidade da bateria é medida em amperes-hora (Ah). Uma bateria de 100 Ah poderia, em teoria, fornecer tanto um ampere por cem horas ou cem amperes por uma hora. Na verdade isto não ocorre. Cada bateria possui um índice de descarga próprio. Este índice indica quão rápido a energia pode ser drenada desta bateria para fornecer aquele número de Ah. Retirar 10 amperes de uma bateria de 100 Ah totalmente carregada significa um índice C/10, ou seja, a energia será drenada na razão de 10 amperes durante 10 horas. Segundo Brant, a capacidade de baterias comerciais é regulamentada pelo Conselho Internacional de Baterias também conhecido pela sigla BCI em inglês. O BCI define dois valores para classificar as baterias, uma razão de descarga de 20 horas, ou C/20, e uma reserva de capacidade.

- Razão de descarga de 20 horas (C/20): É dada em Ah e é a capacidade que a bateria teria se fosse descarregada em 20 horas. Se a mesma bateria for descarregada em menor tempo então a capacidade disponível será menor.
- Minutos de reserva à razão de descarga de 25 amperes (RC): É o número de minutos que uma bateria totalmente carregada pode produzir uma

corrente de 25 amperes. Estipulou-se este valor pois esta é a corrente drenada em um veículo por seus acessórios. Este valor nos mostra quanto tempo a bateria poderia alimentar os acessórios sem estar recebendo carga do alternador no caso de uma falha na correia ou no próprio alternador.

- Minutos de reserva à razão de descarga de 75 amperes: É o número de minutos que uma bateria totalmente carregada pode fornecer uma corrente de 75 amperes. Este índice foi criado para comparar baterias utilizados em carros de golfe ou pequenos rebocadores elétricos pois, 75 amperes é a corrente normalmente solicitada pelo motor elétrico destes equipamentos quando em uso e dá uma idéia de quanto tempo os mesmos poderiam permanecer operando continuamente.

- Capacidade de reserva de três horas: este padrão foi criado pelo BCI para cobrir a necessidade surgida com os veículos elétricos. É definida como 74% da capacidade da bateria na razão C/20. É também dada em Ah. Três horas é o tempo médio que um veículo elétrico opera por dia.

A velocidade com que uma bateria é carregada ou descarregada é um fator determinante sobre sua eficiência e vida útil. A razão de descarga de uma bateria aplicada à um veículo elétrico é muito variável. Durante arrancadas e acelerações a razão de descarga é certamente muito maior do que C/20, mas na maior parte do tempo os valores são bem menores. Deve-se evitar razão de descarga altas (na faixa de C/1) contínuas. Um jogo de baterias que fornece 100% de sua capacidade em n horas irá provavelmente fornecer apenas 50% deste valor se descarregada em n/3. Deve-se evitar também descarregar uma bateria abaixo de 20% de sua capacidade. Razões de descargas altas nesta faixa podem reduzir a vida útil da bateria ou até mesmo danificá-la permanentemente.

Ao contrário do processo de descarga, o processo de recarga pode ser controlado e otimizado para aumentar a vida útil de uma bateria. Uma recarga muito rápida pode destruir uma bateria, assim como, uma bateria descarregada pode sulfatar e se tornar ineficiente. A figura 5.5 mostra a curva de carga ideal para uma bateria. Deve-se manter as altas razões de carga na faixa de 20% à 90% do estado de carga pois a capacidade de uma bateria de armazenar energia é menor abaixo de 20% e acima de 90% de carga. Nestas faixas a razão de carga ideal é a C/20, ou seja, divide-se a capacidade da bateria por 20 horas e têm-se a corrente que deve ser aplicada. Na faixa de 20% à 90% a razão ideal é a C/10, pois, dá a velocidade de carga mais rápida na qual se

pode carregar eficientemente uma bateria. Este valor libera mais calor do que a razão C/20 mas economiza tempo. Abaixo de 90% deve-se controlar a carga limitando-se a corrente para evitar recarregar baterias muito descarregadas muito rapidamente. Acima de 90% deve-se limitar a tensão para não sobrecarregar a bateria ou danificar componentes eletrônicos ligados à ela.

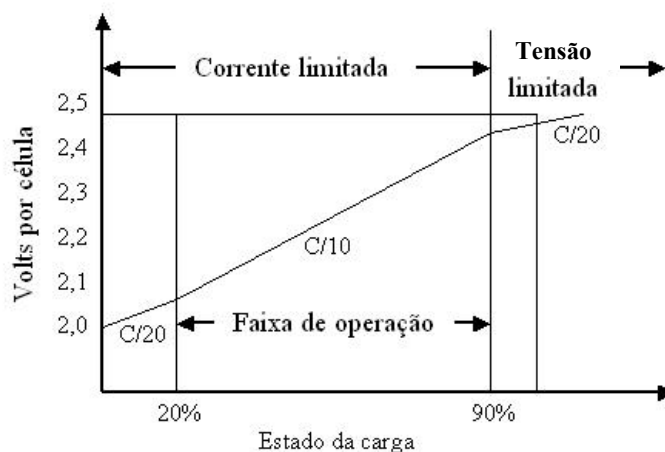


Figura 5.5 - Curva ideal de carga para uma bateria chumbo-ácido (Fonte Brant, 1994).

A capacidade de uma bateria é altamente dependente de seu tempo de uso. Esta capacidade é de 95% quando a bateria é tirada de fábrica, sobe para 105% após esta ter sido usada por cerca de 20% de sua vida útil. Após este período permanece estável e cai rapidamente após decorridos 90% de sua vida útil.

Devido à sua resistência interna, a bateria normalmente descarrega-se mesmo quando não é utilizada. A temperatura e idade da bateria são fatores determinantes do quão rápido isto acontecerá. Um aumento na temperatura e idade da bateria causa um acréscimo na razão de descarga. Uma perda de 5% da capacidade por semana é uma taxa considerada normal para uma bateria tipo chumbo-ácido. Isto significa 50% em dez semanas. Por esta razão é necessário recarregar as baterias periodicamente. Embora baterias que são mantidas à baixas temperaturas não descarreguem, elas também não podem fornecer energia nesta condição. Para estocar baterias a temperatura ideal é 4°C, mas para usá-la é necessário aquecê-la antes.

Segundo Anderman, 2000, existem também outros tipos de baterias que estão sendo testadas ou utilizadas em veículos elétricos. A maior parte tem limitação de uso devido ao custo elevado enquanto outras ainda encontram-se em desenvolvimento:

- Níquel-cádmio: este tipo de bateria é comumente encontrado em aparelhos eletrônicos domésticos como lap-tops, barbeadores, etc. São inquestionavelmente melhores do que as baterias tipo chumbo-ácido no quesito energia específica (kWh/kg) e podem fornecer até o dobro de energia com a mesma massa. Elas também possuem ciclos de vida 50% maiores. O par eletroquímico Níquel-Cádmio tem uma baixa tensão por célula o que exige um número maior de células por bateria o que a torna cara.

- Níquel-ferro: são conhecidas como baterias de Edson pois eram usadas nos primeiros veículos elétricos datados de 1900. Também possuem maior energia específica e vida útil, porém com baixa tensão por célula e uma taxa de perda de carga maior, de cerca de 10% por semana, devido à sua elevada resistência interna. Custa cerca de quatro vezes mais do que uma chumbo-ácido.

Outras tecnologias que estão em estudo incluem baterias tipo:

- Níquel-hidreto metálico;
- Zinco-ar;
- Lítio-polímero;
- Lítio-íon;
- Sódio-enxofre;
- Sódio-níquel-cloreto;
- Lítio-sulfeto metálico.

As baterias tipo chumbo ácido também são apresentadas em vários tipos:

- Baterias de partida: são aquelas usadas para partir motores de combustão interna. São encontradas em quase todos os veículos equipados com motor de combustão interna. É uma bateria projetada para fornecer altas correntes por um tempo curto, sendo que, no restante do tempo estão sendo recarregadas por um alternador ou dínamo. Este tipo não é adequado para utilização em veículos elétricos pois, suas placas são geralmente finas e possuem pouco material ativo. Se utilizadas em veículos elétricos sua vida útil seria reduzida para cerca de 100 ciclos.

- Baterias de descarga profunda (deep-cycle): são as baterias normalmente utilizadas em veículos elétricos. Algumas são utilizadas em carros de golfe, rebocadores ou veículos aquáticos, enquanto outras de maior capacidade são utilizadas em veículos

elétricos de maior porte. Suas placas são muito mais espessas se comparadas às baterias de partida e podem atingir facilmente de 400 à 800 ciclos de carga (figura 5.6).

- Baterias industriais: são grandes e pesadas baterias utilizadas em empilhadeiras elétricas ou aplicadas estaticamente junto a geradores solares ou eólicos. Possuem grandes capacidades, resistem a muitos ciclos de recarga (geralmente mais do que 1000) e servem de contra-peso para as empilhadeiras e por este motivo não são aplicáveis em veículos elétricos.

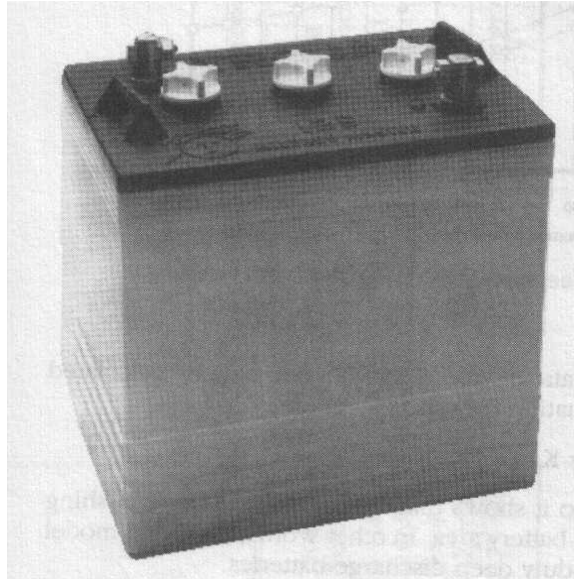


Figura 5.6 - Bateria tipo tracionária

A alternativa viável para um veículo elétrico de custo razoável ainda é a bateria tipo chumbo-ácido de descarga profunda. Não existem opções tecnologicamente mais avançadas em produção hoje em dia em no Brasil. Existem fornecedores para baterias de descarga profunda tipo chumbo-ácido no país e outras que podem ser importadas a preços razoáveis. Basta determinar de maneira criteriosa qual é a melhor alternativa para equipar o veículo elétrico considerado dando ênfase à autonomia ou à velocidade final. Conforme o catálogo da Moura baterias as do tipo tracionárias (chumbo-ácido) apresentam relação de 4,7 Ah (12 volts) por kg.

6. CONTROLADORES

Além do motor e das baterias, o sistema de controle de potência de um veículo elétrico seja ele com baterias, híbrido ou célula de combustível é um dos componentes mais importantes. Sua função é dosar a energia entregue pelas baterias ao motor fazendo com que o veículo se movimente de maneira adequada à cada situação. Nas arrancadas o movimento deve ser suave. Após estabelecida a velocidade de cruzeiro deve-se fornecer ao motor apenas a potência necessária para manter o veículo nesta velocidade constante. Nas subidas o sistema de controle fornece ao motor potência suficiente para que a rampa seja vencida com velocidade suficiente.

Existem vários tipos de sistemas de controle disponíveis atualmente e alguns outros sendo desenvolvidos. Basicamente eles podem ser divididos nas seguintes categoria:

- De partida resistiva;
- Estado sólido para motores CC,
- Estado sólido para motores CA.

Os controladores tipo PWM (*pulse modulation width*) têm sido usados por muito tempo em empilhadeiras elétricas e veículos elétricos e estão comercialmente disponíveis. Eles utilizam circuitos integrados para controlar a energia entregue ao motor.

Embora sejam mais adequados para uso em veículos elétricos, os motores de indução de corrente alternada precisam de controladores mais complexos e por conseqüência mais caros. Geralmente um controlador CA é 4 a 6 vezes mais complexo do que um similar para motores CC.

Uma alternativa de baixo custo aos controladores sofisticados pode ser um simples sistema de chaves e resistores que quando montados de em um certo arranjo fornecem uma opção econômica para veículos elétricos mais simples.

Para escolher melhor o tipo de controlador adequado à cada veículo é necessário estudar os parâmetros de utilização dos veículos urbanos. Estes parâmetros estão melhores descritos na norma SAE J227. Esta norma fornece um padrão de velocidade e tempos nos quais os veículos de diferentes fabricantes podem ser comparados e testados em relação à emissões, autonomia, etc. Estes padrões assemelham-se ao modo de dirigir um veículo nas condições urbanas.

Basicamente a norma fornece instruções do tipo: ligar o motor, acelerar até uma determinada velocidade, permanecer nesta velocidade por algum tempo, desacelerar, parar, etc.

Com o objetivo de economizar energia, tanto em veículos elétricos como nos convencionais, os melhores motoristas aprendem a não acelerar em demasia o veículo, gastando mais energia, apenas para chegar a um semáforo fechado e ter que usar os freios e jogar fora aquela energia.

Em um veículo elétrico, devido ao baixo atrito do motor elétrico, é muito mais vantajoso acelerar até uma determinada velocidade e então deixar o veículo “deslizar” utilizando aquela energia cinética acumulada. Isto fará com que a autonomia do veículo aumente consideravelmente.

Os freios regenerativos também podem ser usados para recuperar a energia cinética imprimida ao veículo, porém, em ciclos urbanos onde a velocidade é raramente superior à 50 km/h e a maior parte do tempo o veículo está parado em um semáforo, este recurso é muito pouco utilizado.

Devido à estas características peculiares do tráfego urbano, o veículo elétrico é mais indicado do que um veículo convencional nestas condições. Basta apenas uma pequena quantidade de energia para acelerar o veículo a partir do estado de velocidade zero para depois usufruir de seu baixo atrito para se deslocar até o próximo semáforo ou ponto de parada. Devido a isto muitos veículos elétricos precisam apenas de um sistema de interruptores e resistências para funcionar no trânsito urbano.

Caso deseje-se economizar no custo do controlador, pode-se considerar a substituição do mesmo por um sistema de mais baixo custo para o veículo elétrico. Pode-se então utilizar um arranjo de interruptores e resistências que fornecem pouca energia para que o início do deslocamento seja suave e então ir reduzindo a dissipação da energia nos resistores até que se atinja a velocidade desejada. As figuras 6.1 à 6.3 mostram como um sistema simples e barato pode ser construído para controlar um veículo elétrico. Na figura 6.1 ve-se um arranjo com apenas um interruptor entre o banco de baterias e o motor. É o sistema de mais baixo custo porém não fornece partidas suaves. O arranjo mostrado na figura 6.2 prevê a instalação de alguns resistores que possibilitam a variação da energia dissipada das baterias obtendo-se assim partidas mais suaves. O lado negativo desta solução é o decréscimo da autonomia do veículos devido à energia dissipada nos resistores. A alternativa mostrada na figura 6.3 é o arranjo de baterias. Pode-se projetar um sistema que alimente o motor com metade das baterias para a partida trazendo a suavidade necessária e após utilizando o banco completo de baterias para velocidade

máxima. Com isso ganha-se em autonomia mas deve-se ter o cuidado de inverter periodicamente os bancos de baterias para possibilitar uma descarga uniforme entre os mesmos.

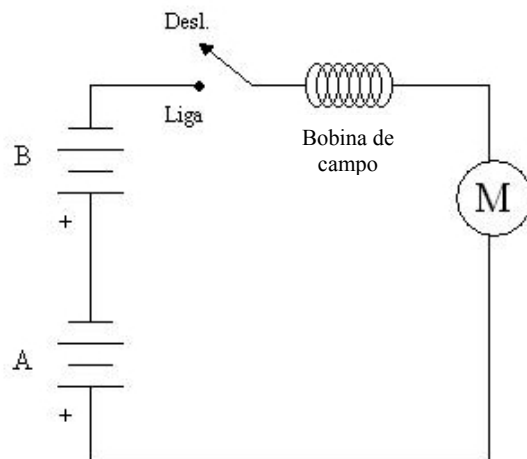


Figura 6.1 - Controle tipo interruptor simples

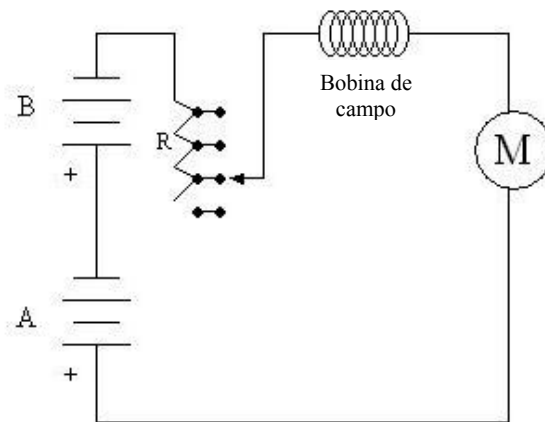


Figura 6.2 - Controle com resistência

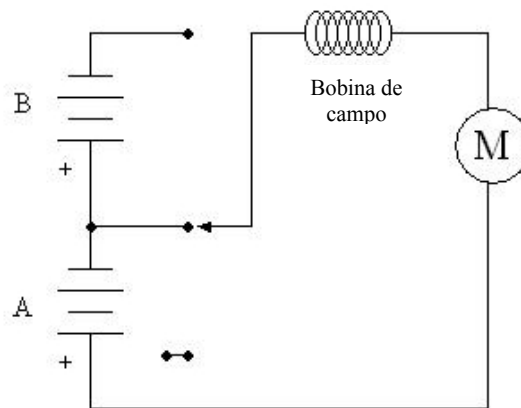


Figura 6.3 - Controle com alternância de bancos de baterias

A melhor solução, segundo Brant, seria uma combinação dos três métodos descritos. Para a partida utiliza-se os resistores em série e baterias em bancos para atingir a velocidade escolhida. Neste caso deve-se carregar as baterias em série para homogeneizar sua carga. Deve-se utilizar os resistores pelo tempo mais curto possível até que se atinja a velocidade escolhida. A figura 6.4 mostra o circuito ideal de cinco posições (Desligado, 1, 2, 3 e Ligado) para uso em um veículo elétrico onde deseja-se um baixo custo. Ele utiliza três níveis de resistência conectados ao banco de baterias A e mais uma posição onde a energia flui do banco inteiro de baterias para o motor quando máxima potência é requerida.

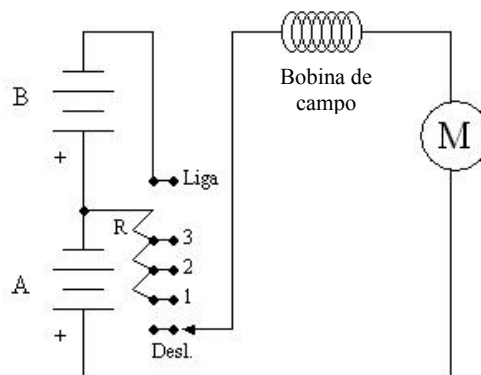


Figura 6.4 - Circuito de controle eletro-mecânico.

As vantagens de um controlador de chaves e resistências são a simplicidade e baixo custo, porém, ele fornece apenas degraus de energia discretos ao contrário da operação suave normalmente associado ao acelerador de um veículo equipado com motor de combustão interna.

Os benefícios de um controlador de estado sólido estão no uso da eletrônica. A tendência mundial no momento é a de aumentar a utilização da eletrônica nos veículos devido aos benefícios no aspecto de monitoramento e controle.

Em muitos casos uma simples chave de contato é mais eficiente que um circuito eletrônico no que diz respeito às perdas elétricas associadas, mas as características de um controlador eletrônico como conveniência, flexibilidade e adaptabilidade a futuros sistemas digitais compensam sobremaneira estas perdas.

Basicamente um controlador eletrônico tipo PWM funciona dosando a energia fornecida pela bateria em uma onda quadrada de frequência fixa. A quantidade de pulsos, ou estado ligado, no tempo define qual a tensão que o motor recebe. O fenômeno segue a equação 7 abaixo.

$$V_{\text{motor}} = ((t_{\text{on}})/(t_{\text{on}}+t_{\text{off}}))*V_{\text{bateria}} = (t_{\text{on}}/P)*V_{\text{bateria}} \quad (7)$$

Onde V_{motor} é a tensão entregue ao motor, t_{on} é ao tempo na qual o estado é ligado, t_{off} é o tempo na qual o estado é desligado e V_{bateria} é a tensão entregue pela bateria ao controlador. Nota-se que $t_{\text{on}} + t_{\text{off}}$ é na verdade o período de uma oscilação completa que podemos chamar de P. O inverso deste período P é a frequência de operação do controlador. Atualmente os controladores possuem frequências de operação maiores do que 15 kHz para que o ruído produzido pelo mesmo torne-se inaudível ao ouvido humano.

Controladores para motores de corrente alternada são mais complexos e não serão explorados neste trabalho.

Os controladores existentes no mercado custam de US\$ 200 à US\$ 3.000 dependendo da capacidade e recursos desejados. Os fabricantes mais conhecidos são Curtis, Auburn, Sevcon, Zapi e DCP. A figura 6.5 mostra um controlador Curtis.

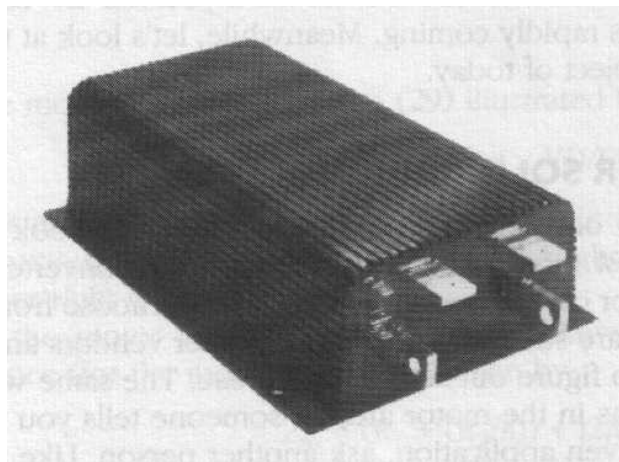


Figura 6.5 - Controlador Curtis CC.

7. VEÍCULOS HÍBRIDOS ELÉTRICOS

O avanço da tecnologia na direção dos veículos equipados com células de combustível passa por um estágio intermediário baseado nos veículos híbridos elétricos. Estes veículos são basicamente compostos por um motor de combustão interna convencional, um motor elétrico, gerador e baterias.

Existem três tipos básicos de veículos híbridos elétricos:

1. Série (Figura 7.1) – O motor de combustão interna move o gerador para gerar energia elétrica, e o gerador pode tanto carregar as baterias ou alimentar um motor elétrico que conduz as rodas. As locomotivas diesel-elétricas seguem este modelo.
2. Paralelo (Figura 7.2) – O motor a combustão é conectado à transmissão, assim como o motor elétrico. Então ambos podem fornecer energia às rodas, comutando alternadamente.
3. Split – Combina as características dos sistemas série e paralelo. O motor de combustão interna conduz um eixo e o motor elétrico, o outro.

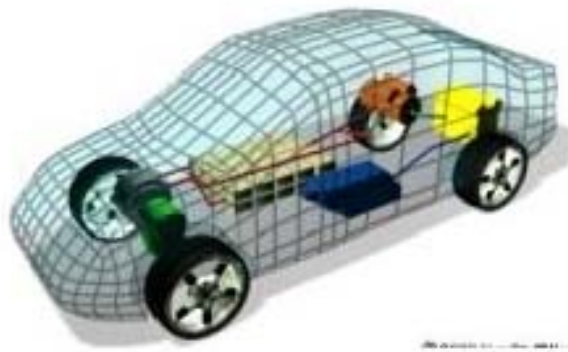


Figura 7.1 – Esquema de um híbrido tipo série

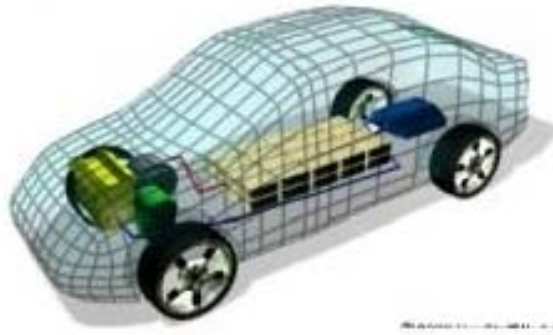


Figura 7.2 – Esquema de um híbrido tipo paralelo

As principais vantagens do veículo híbrido elétrico são:

- ❑ Economia de 30% a 50% no consumo de combustível.
- ❑ Redução da emissão de poluentes na atmosfera.
- ❑ Flexibilidade de usar combustíveis a base de petróleo ou alternativos.

A primeira e segunda estão relacionadas ao fato de o motor de combustão interna, no caso de um híbrido em série, poder operar em uma faixa específica de rotação onde apresenta maior rendimento.

Nos Estados Unidos existem alguns modelos de veículos híbridos que podem ser facilmente adquiridos. Os principais são:

- ❑ HONDA INSIGHT:
 - Modelo: Esportivo com dois lugares.
 - Motor: Gasolina, 1.0-litro, 3-cilindros, 12-válvulas.
 - Híbrido: Tipo Paralelo.
 - Motor Elétrico/Gerador: Motor elétrico ultra fino de ímãs permanentes (60mm de largura).
 - Potência do Motor Elétrico: 13hp, 3000rpm.
 - Rendimento: 26 km/l na cidade - 29 km/l na estrada.



Figura 7.3 - Honda Insight híbrido

□ HONDA CIVIC HYBRID

- Modelo: Sedan.
- Motor: Gasolina, 1.0-litro, 4-cilindros, 8-válvulas.
- Motor Elétrico/Gerador: Motor elétrico ultra fino de ímãs permanentes (60mm de largura).
- Potência do Motor Elétrico: 13.4hp, 4000rpm.
- Rendimento: 19.5 km/l na cidade – 21.7 km/l na estrada.

□ TOYOTA PRIUS

- Modelo: sedan com 5-lugares.
- Motor: Gasolina, 1.5-litros, 4-cilindros, 16 válvulas.
- Híbrido: Tipo Split.
- Motor Elétrico/Gerador: Motor de ímãs permanentes trifásico AC.
- Potência do Motor Elétrico: 44hp, 1040-5600rpm.
- Rendimento: 22.1 km/l na cidade – 19.13 km/l na estrada – 20.4 km/l combinado.



Figura 7.4 - Toyota Prius híbrido

Segundo Jayme Buarque de Hollanda, 2002, o veículo híbrido elétrico poderia ser utilizado na geração distribuída de energia elétrica. Sua constatação vem do fato de que 90% do tempo o veículo se encontra estacionado e poderia ser conectado à uma linha de distribuição para auxiliar na geração de energia.

A International Trucks and Engine Corporation está levando a cabo um projeto de veículo híbrido elétrico tipo série (Figura 7.5 e 7.6) baseado no seu chassi de caminhão médio. Três protótipos estão atualmente sendo testado por empresas como a UPS de entregas nos Estados Unidos (Figura 7.7).

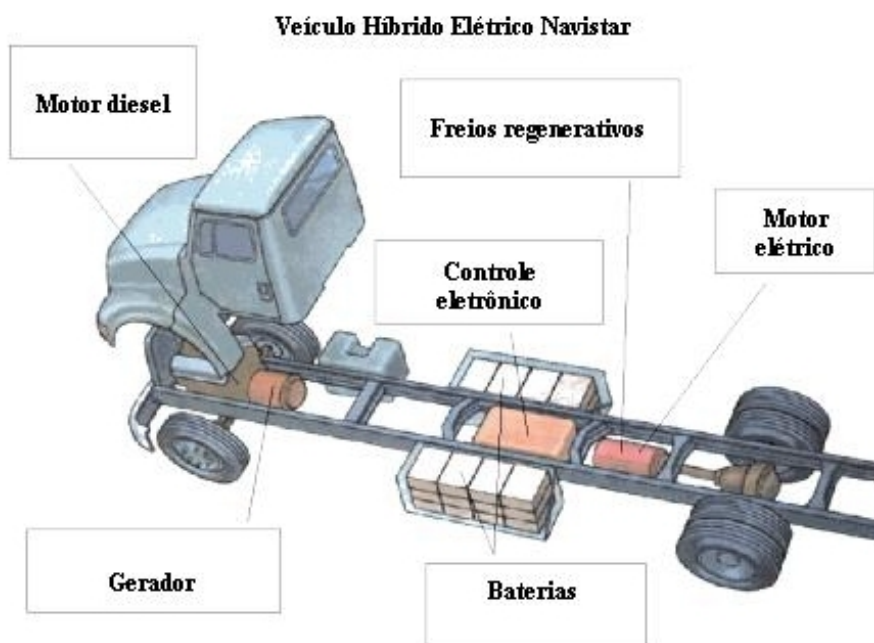


Figura 7.5 - Esquema do protótipo do veículo híbrido International



Figura 7.6 - Chassi híbrido International



Figura 7.7 - Veículo híbrido International (Van UPS)

8. CONVERSÃO DE UM VEÍCULO ELÉTRICO – OBTENÇÃO DOS COEFICIENTES DE RESISTÊNCIA

No projeto de um veículo elétrico, seja ele um novo desenvolvimento ou a conversão de um veículo equipado originalmente com um motor de combustão interna, é necessário especificar a potência e o torque do motor e a capacidade total do banco de baterias a ser utilizado. O motor do veículo deve ser capaz de produzir a potência necessária para sobrepujar as forças inerciais dos diversos sistemas durante a arrancada, acelerá-lo até a velocidade requerida pelo seu usuário, atingir velocidade mínima determinada por norma durante as subidas e manter a velocidade estipulada durante a fase de cruzeiro. Estas forças são as chamadas cargas de estrada.

A teoria da dinâmica veicular mostra um caminho para se possa estimar as cargas de estrada às quais o veículo estará submetido sem que seja preciso ensaiá-lo fisicamente o que somente pode ser feito após a fase de protótipo. Para tanto é necessário dispor dos valores de projeto associados aos coeficientes de arrasto aerodinâmico e de rolamento.

O objetivo deste capítulo da dissertação é avaliar o método empírico para determinação dos coeficientes de arrasto aerodinâmico e de rolamento sugerido pela Bosch no seu “Automotive Handbook” quinta edição, 2000. Serão comparados os valores fornecidos pelo fabricante de um determinado veículo e de tabelas com os resultados obtidos através da utilização do método proposto após a obtenção dos dados experimentais. Após a validação do método, pode-se então utilizar os resultados obtidos para estimar a potência nominal (contínua) do motor e a capacidade do banco de baterias para o veículo ensaiado, supondo-se que a intenção seja convertê-lo para tração elétrica.

Este trabalho se restringirá a condição de velocidade constante e pista plana para simplificar o estudo. Como opção para futuros trabalhos sugere-se explorar as outras fases do movimento como a arrancada, aceleração e subida (rampa).

O principal desafio a que os projetistas de veículos automotores estão submetidos atualmente é o de desenhar veículos cada vez mais eficientes e econômicos. Alguns, ainda assim, preferem dar ênfase ao visual agressivo abrindo mão da eficiência energética o que contraria totalmente a tendência mundial para preservação dos recursos naturais e redução dos níveis de poluição atmosférica. Vê-se hoje em dia nas ruas das cidades veículos cada vez menos aerodinâmicos e mais pesados que apresentam alto consumo de combustível por quilômetro

rodado, e portanto, eficiência baixíssima. Os Estados Unidos são hoje os principais representantes desta triste tendência. O número de SUV's ou *Sport Utility Vehicles* vendidos naquele país há muito já ultrapassou o de automóveis convencionais. Talvez isto explique por que os Estados Unidos sejam hoje o país responsável por 25% das emissões poluentes.

O aumento da eficiência energética está intimamente relacionado a projetos que reduzam significativamente o coeficiente de arrasto aerodinâmico e o coeficiente de resistência ao rolamento produzido pelo rodado do veículo. É imperativo portanto, dominar a técnica que permite determinar estes coeficientes para qualquer veículo, esteja ele na fase de projeto, protótipo ou já devidamente desenvolvido. Para os veículos que já estejam na fase de protótipo ou já desenvolvidos existe um técnica sugerida pela Bosch no livro "Automotive Handbook", 2000, que permite, mesmo que não se disponha de sofisticados equipamentos de medição, obter os coeficientes de arrasto aerodinâmico e de rolamento. Esta técnica pode então, ser utilizada para otimizar o projeto original com a finalidade de se obter veículos mais eficientes. A técnica sugerida pode ser implementada com a utilização de equipamentos simples que podem ser facilmente encontrados.

8.1. Descrição do problema

Qualquer veículo automotor em deslocamento está sujeito a reações advindas de diferentes fontes. A atmosfera terrestre composta por uma mistura de gases, principalmente oxigênio e nitrogênio, impõe ao veículo uma resistência aerodinâmica que se opõe ao deslocamento do mesmo. Esta reação está associada a diversos fatores. Os principais são: massa específica do ar no entorno do veículo, velocidade, área frontal do veículo e um coeficiente associado à sua forma. Com o intuito de reduzir esta reação aerodinâmica pode-se apenas interferir na forma do veículo alterando sua área frontal ou a sua forma propriamente dita. Modernamente a tendência é a de ter-se áreas frontais grandes para acomodar todos os passageiros e motorista do veículo de maneira confortável. Resta então atuar sobre a forma do mesmo com o objetivo de reduzir o coeficiente de arrasto aerodinâmico.

Outra resistência importante que atua no veículo é a resistência ao rolamento. Este fator está intimamente relacionado aos pneus utilizados no mesmo. Como ficará claro na revisão bibliográfica, o tipo de superfície na qual o veículo se desloca também é fator fundamental que afeta a resistência ao rolamento.

Para poder atuar sobre estes coeficientes é preciso conhecê-los. A obtenção dos coeficientes da maneira tradicional é realizada através do uso de equipamentos de custo elevado como o banco dinamômetro e o túnel de vento.

A possibilidade de uso de um método alternativo para obtenção destes coeficientes que dispense o uso destes equipamentos e que possa ser realizado por pessoal não especializado passa a ser uma vantagem estratégica para as empresas e indivíduos responsáveis pelo desenvolvimento de veículos. A bibliografia utilizada será o livro “Fundamentals of Vehicle Dynamics” de autoria de Gillespie, 1992, Automotive Handbook editado pela Bosch, 2000, e a normas SAE J1263, J2263 e J2264. Estas últimas fornecem técnicas para medir as cargas de estrada em veículos automotores. Os dados referentes ao veículo testado foram obtidos a partir de informações fornecidas pelo fabricante do mesmo e através de medições realizadas.

8.1.1. Resistência aerodinâmica

De acordo com Gillespie, 1992, o fluxo de ar sobre um veículo é tão complexo que é necessário o desenvolvimento de modelos semi-empíricos para representar o efeito do mesmo. Assim sendo, o arrasto aerodinâmico é caracterizado pela seguinte equação:

$$D_A = 1/2 \rho V^2 C_{DA} \quad (8)$$

Onde D_A é a força reativa aerodinâmica, ρ é a massa específica do ar, V é a velocidade, C_D é o coeficiente de arrasto aerodinâmico e A é a área frontal projetada perpendicularmente à trajetória do veículo.

O termo $1/2 \rho V^2$ é a pressão dinâmica do ar e normalmente é dada em N/m^2 . O coeficiente de arrasto, C_D , é determinado empiricamente para cada veículo. A área frontal, A , é obtida pela projeção da área do veículo no plano transversal ao movimento.

A massa específica do ar depende da temperatura, pressão e umidade. Nas condições padrão, 15 °C e 101.32 kPa, a massa específica do ar seco é $1,225 \text{ kg/m}^3$. A massa específica em condições diferentes da padrão pode ser obtida a partir da seguinte fórmula:

$$\rho = 1,225 \left(\frac{Pr}{101,325} \right) \left(\frac{288,16}{273,16 + Tr} \right) \quad (9)$$

Onde P_r é a pressão atmosférica em kPa e T_r é a temperatura em graus Celsius.

O coeficiente de arrasto é determinado experimentalmente através de túnel de vento.

A definição do coeficiente de arrasto vem da equação (10):

$$C_D = \frac{D_A}{1/2\rho V^2 A} = \frac{\text{Força_de_arrasto}}{(\text{Pressão_dinâmica})(\text{área})} \quad (10)$$

A proposta deste trabalho é exatamente analisar o método empírico alternativo para obtenção deste coeficiente através da técnica chamada “*coast down*”. Como será mostrado no tópico 8.4, esta técnica é aplicada experimentalmente com o veículo já em fase de protótipo. O veículo é acelerado a uma determinada velocidade e então tem sua transmissão colocada em neutro. Mede-se o tempo gasto para a desaceleração da velocidade inicial até uma velocidade final determinada.

O coeficiente de arrasto sofre uma grande variação dependendo da forma do corpo. A figura 8.1 mostra o coeficiente para diversos tipos de corpos.

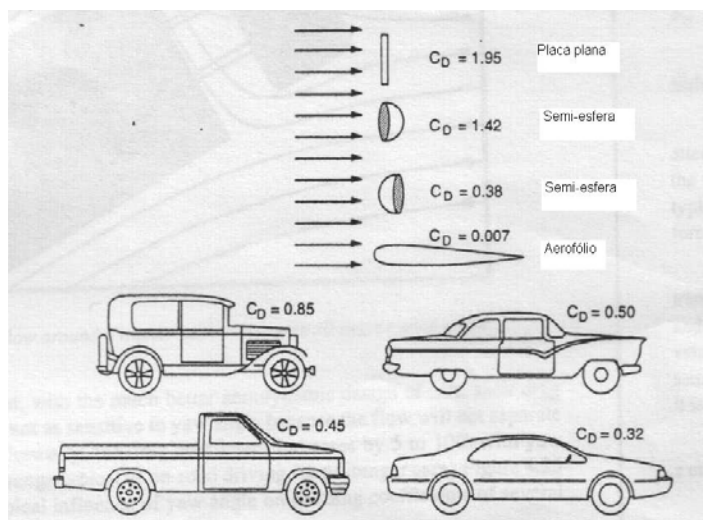


Figura 8.1 - Coeficientes típicos de arrasto aerodinâmico (Fonte Gillespie)

Da figura notamos que em uma placa plana, com fluxo perpendicular a superfície, o coeficiente de arrasto é 1,95. Isto significa dizer que a força de arrasto é 1,95 vezes maior do que a pressão dinâmica que atua na área da placa.

Como o método a ser analisado somente pode ser aplicado em condições de vento mínimo, não será discutido aqui os efeitos deste na determinação do coeficiente de arrasto aerodinâmico.

8.1.2. Resistência ao rolamento

Outra importante força resistiva que atua sobre um veículo em movimento é a resistência ao rolamento dos pneus. Como relata Gillespie, 1992, em baixas velocidades sobre pavimento rígido, a resistência ao rolamento é a componente principal da força resistiva que atua no veículo. Na prática o arrasto aerodinâmico somente iguala-se à resistência ao rolamento a partir de velocidades da ordem de 25 m/s (90 km/h).

Enquanto outros fatores somente atuam sob certas circunstâncias, a resistência ao rolamento está presente no momento em que as rodas começam a girar. Como a resistência ao rolamento é a causa principal do aquecimento dos pneus, ela acaba tornando-se também o fator limitante da eficiência do pneu.

Existem sete mecanismos responsáveis pela resistência ao rolamento. São eles:

1. Perda de energia devido a deflexão das paredes laterais dos pneus próximo à área de contato;
2. Perda de energia devido à deflexão dos elementos da banda de rodagem;
3. Atrito na superfície de contato;
4. Deslizamento do pneu nas direções longitudinal e lateral;
5. Deflexão da superfície de rolamento;
6. Arrasto aerodinâmico das superfícies externas do pneu e,
7. Perda de energia nas imperfeições da estrada.

A resistência ao rolamento total é a soma das resistências nos eixos traseiro e dianteiro do veículo, ou:

$$R_x = R_{xf} + R_{xr} = f_r W \quad (11)$$

Onde R_{xf} é a resistência ao rolamento no eixo dianteiro, R_{xr} é a resistência ao rolamento no eixo traseiro, f_r é o coeficiente de resistência ao rolamento e W é o peso do veículo.

Nos cálculos teóricos a correção devido à transferência do peso dinâmico do veículo entre os eixos traseiro e dianteiro é importante, entretanto, na estimativa da eficiência do veículo a correção devido ao peso dinâmico traz complexidade aos cálculos sem oferecer uma melhora significativa na sua precisão. Por esta razão a utilização do peso estático do veículo é suficiente

para o cálculo do coeficiente de rolamento do veículo. Por esta razão, o método a ser validado apenas considera o movimento retilíneo e acelerações (ou desacelerações) suaves que pouco afetam a distribuição de peso no veículo.

O coeficiente de rolamento, f_r , é adimensional e expressa os efeitos das propriedades físicas do pneu e da superfície de rolamento. Algumas destas propriedades que afetam este coeficientes são também discutidas por Gillespie. Devido ao fato de que grande parte da resistência ao rolamento em superfícies pavimentadas advém da perda de energia e da deflexão do material do pneu, a temperatura deste tem um efeito significativo na resistência ao rolamento.

A figura 8.2 mostra o comportamento da resistência ao rolamento a medida que o pneu se aquece devido ao seu atrito com a superfície. Normalmente uma distância de 30 km deve ser percorrida para que a condição se estabilize. É por este motivo que em testes de pneus é comum rodar com o veículo por 20 minutos ou mais antes de se começar a medir os parâmetros desejados. Fica claro então, que durante a operação normal de um veículo urbano (em distância menores do que 30 km) nunca se consegue atingir uma condição de diminuição da resistência ao rolamento devido à baixa temperatura dos pneus. Este fato faz com que o veículo tenha um maior consumo de combustível nesta condição.

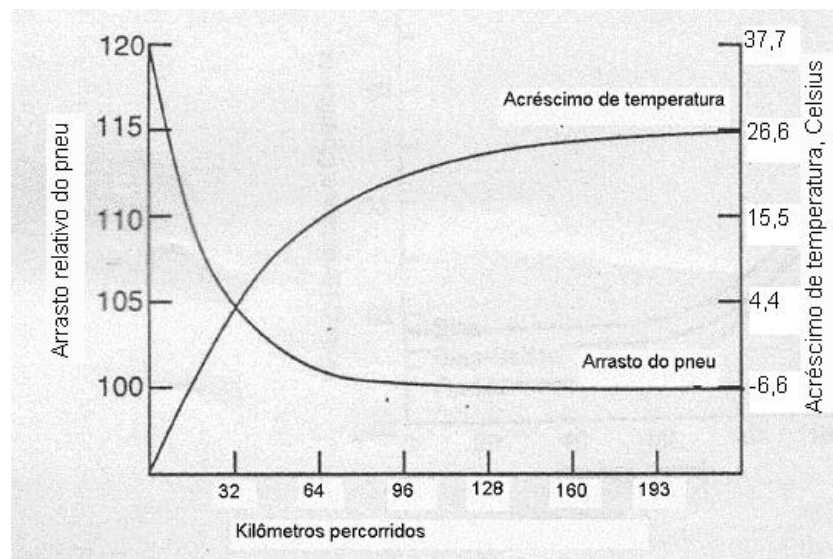


Figura 8.2 - Gráfico resistência ao rolamento e temperatura do pneu (Fonte Gillespie)

Outro aspecto importante é a pressão interna do pneu. A pressão interna do pneu acaba determinando o grau de deflexão (ou deformação) nas laterais e na área de contato do mesmo durante a operação. O efeito global na resistência ao rolamento também depende da elasticidade

da superfície de rolamento. A figura 8.3 mostra o comportamento do coeficiente de resistência ao rolamento para diferentes pressão e tipos de piso.

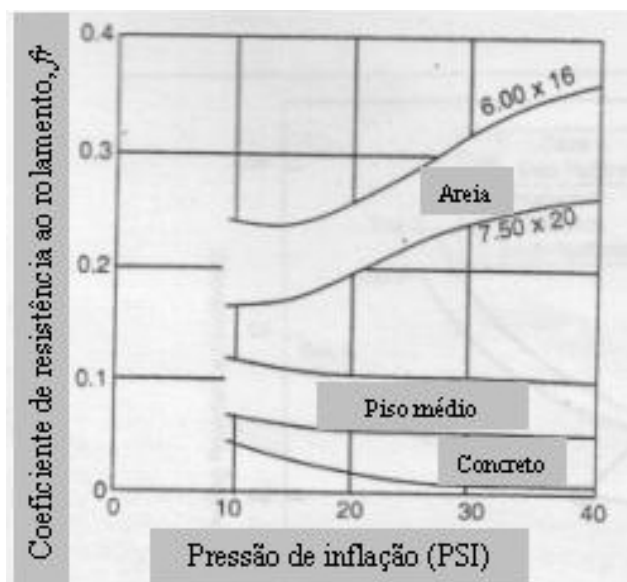


Figura 8.3 - Gráfico resistência ao rolamento e pressão interna (Fonte Gillespie)

Em superfícies macias como areia uma alta pressão interna provoca uma penetração maior do pneu no solo causando um coeficiente maior. Por outro lado uma pressão interna maior em superfícies rígidas faz com que o coeficiente de resistência ao rolamento diminua em razão da diminuição na deformação do pneu. Em superfície de rigidez intermediária o coeficiente de resistência ao rolamento é pouco afetado pela variação na pressão interna.

A velocidade é outro fator que influencia o coeficiente de resistência ao rolamento. Ele é diretamente proporcional à velocidade já que esta aumenta bastante o trabalho de deformação e vibração no corpo do pneu. Como mostra a figura 8.4, para velocidades de até cerca de 100 km/h o coeficiente é considerado constante para efeito de cálculo. Nesta figura pode-se verificar também o comportamento do coeficiente para vários tipos de pneus.

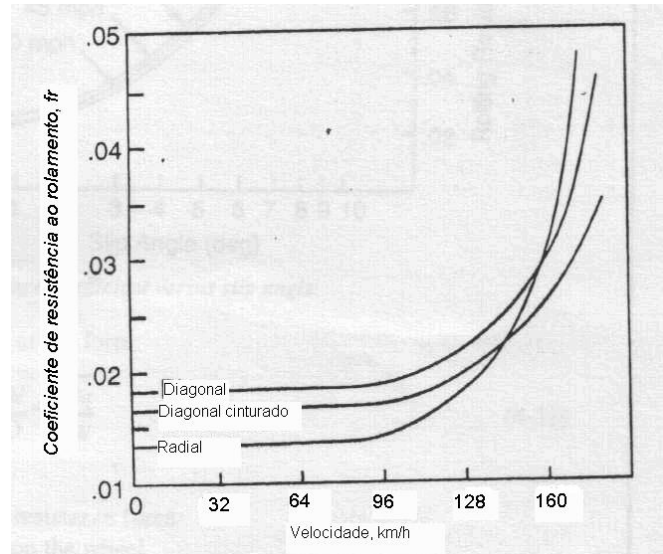


Figura 8.4 - Gráfico resistência ao rolamento e velocidade (Fonte Gillespie)

A grande variedade de fatores que afetam a resistência ao rolamento torna difícil definir uma equação que os leve em consideração simultaneamente. Com o passar do tempo, foram desenvolvidas várias equações usadas para estimar este coeficiente. Segundo Gillespie, os estudos sobre as perdas de rolamento de pneus de borracha levaram à seguinte equação:

$$f_r = \frac{R_x}{W} = C \frac{W_r}{D} \sqrt{\frac{h_t}{w}} \quad (12)$$

Onde, f_r é o coeficiente de rolamento, R_x é a força de resistência ao rolamento, W_r é o peso na roda, C é uma constante que reflete as características de perda e elasticidade do material do pneu, D é o diâmetro externo, h_t é a altura da seção do pneu e w é a largura da seção do pneu.

Esta relação mostra que a resistência ao rolamento é sensível a carga aumentando linearmente com a mesma e que pneus com maior diâmetro reduzem a resistência ao rolamento, assim como, os que apresentam menores razão de aspecto (h/w).

Outras equações para o coeficiente de rolamento de pneus de carros de passageiros deslocando-se sobre concreto foram desenvolvidas. As variáveis nestas equações são geralmente pressão interna, velocidade e carga. A precisão dos cálculos é naturalmente limitada pela influencia dos fatores omitidos no cálculo.

De uma maneira mais genérica, o coeficiente de rolamento pode ser estimado como uma constante. A tabela 8.1 mostra alguns valores típicos que podem ser utilizados.

Tipo de veículo	Concreto	Sup. de média rigidez	Areia
Carro de passageiros	0,015	0,08	0,30
Caminhões pesados	0,012	0,06	0,25
Tratores	0,020	0,04	0,20

Tabela 8.1 - Valores típicos para o coeficiente de resistência ao rolamento

Em velocidades baixas o coeficiente cresce aproximadamente de forma linear com a velocidade. Desta forma foram desenvolvidas equações que levam em conta esta característica.

$$f_r = 0,01(1 + V/161) \quad (13)$$

Onde V é a velocidade em km/h.

Para os demais valores de velocidade o coeficiente de rolamento é proporcional ao quadrado da velocidade. Segundo Gillespie, 1992, o Instituto de Tecnologia de Stuttgart desenvolveu a seguinte equação para o coeficiente de resistência ao rolamento sobre uma superfície de concreto:

$$f_r = f_0 + 3,24 f_s (V/161)^{2,5} \quad (14)$$

Onde V é a velocidade em km/h, f_0 é o coeficiente base e f_s é o coeficiente afetado pela velocidade.

Os dois coeficientes f_0 e f_s dependem da pressão interna e são determinados através do gráfico da figura 8.5.

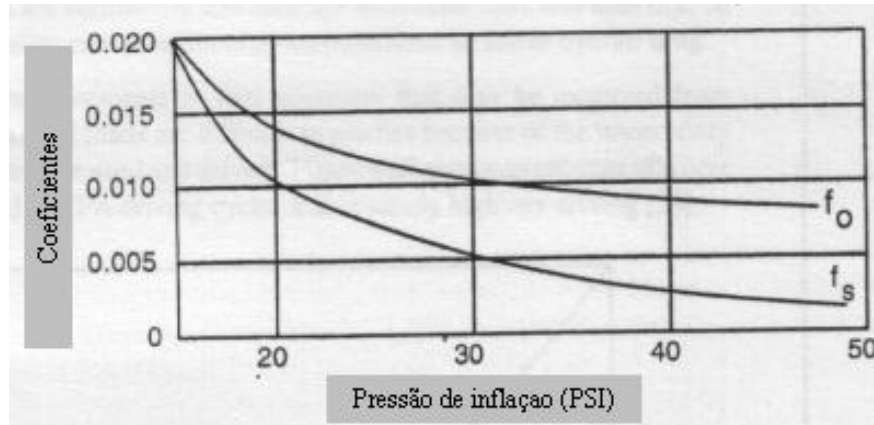


Figura 8.5 - Gráfico para determinação de f_0 e f_s (Fonte Gillespie)

Conforme Gillespie, 1992, foram desenvolvidas, no Instituto de Pesquisa do Transporte da Universidade de Michigan, equações similares para estimar a resistência ao rolamento de pneus radiais e diagonais para caminhões. Elas são:

$$f_r = (0,0041 + 0,000025V) * Ch \text{ Para pneus radiais} \quad (15)$$

$$f_r = (0,0066 + 0,000029V) * Ch \text{ Para pneus diagonais} \quad (16)$$

Onde V é a velocidade em km/h e Ch é o coeficiente associado ao tipo de superfície e vale 1,0 para concreto liso, 1,2 para concreto gasto, paralelepípedo ou asfalto e 1,5 para asfalto aquecido.

8.2. Carga total de estrada

A soma da resistência ao rolamento, do arrasto aerodinâmico e das forças de rampa constituem o total de resistência, R_{RL} , oferecida pelo veículo durante o seu deslocamento. Normalmente esta resistência total é chamada carga de estrada e calcula-se da seguinte maneira:

$$R_{RL} = f_r W + 1/2 \rho V^2 C_{DA} + W \text{sen} \theta \quad (17)$$

A potência necessária para manter este veículo em uma determinada velocidade V é dada por:

$$P_{RL} = R_{RL} * V \quad (18)$$

As cargas de estrada que atuam em um veículo automotor estão normalmente associadas à condição específica em que este se encontra. Durante a arrancada prevalecem as forças associadas à inércia dos componentes e sistemas que estão intimamente ligados ao deslocamento do veículo como: componentes rotacionais do motor, embreagem, transmissão, rodas e pneus e a massa do veículo. Nas subidas, o ângulo de rampa e a massa do veículo são fundamentais para a determinação da potência necessária. Em ambos os casos as forças associadas ao atrito aerodinâmico aparecem em segundo plano assim como aquelas associadas ao rolamento dos pneus na superfície.

Durante a fase de cruzeiro, em pista plana, o problema torna-se mais simples já que pode-se desprezar o efeito inercial rotacional e de rampa. Nesta fase o veículo estará basicamente sob o efeito do atrito aerodinâmico e do rolamento.

A potência a ser fornecida pelo motor poderá então ser facilmente estimada através da multiplicação entre o somatório das forças envolvidas (arrasto e rolamento) pela velocidade do veículo. Mantendo-se os outros parâmetros estáveis, a potência torna-se então uma função somente da velocidade instantânea do veículo.

Como já visto, os parâmetros necessários para o cálculo da potência são os encontrados na tabela 8.2 abaixo.

Parâmetro	Unidade de medida	Método para obtenção
Massa do veículo	kg	Medição direta
Coefficiente de arrasto	adimensional	Calculado pelo método sugerido
Área frontal	m ²	Medição direta ou estimada
Massa específica do ar	kg/m ³	Através da temperatura e pressão
Velocidade veículo	km/h	Medição direta
Velocidade do vento	m/s	Informações meteorológicas
Direção do vento	graus	Informações meteorológicas
Coefficiente rolamento pneu	adimensional	Calculado pelo método sugerido

Tabela 8.2 - Dados do problema

8.3. Procedimento experimental

O método empírico para determinação dos coeficientes de arrasto aerodinâmico e de rolamento sugerido pela Bosch no “Automotive Handbook” quinta edição utiliza a técnica de “coast down” ou como popularmente é chamado de “banguela”. Ela consiste em acelerar o veículo até uma velocidade alta determinada v_{a1} e depois deixá-lo desacelerar até uma velocidade v_{b1} . Após aplica-se o mesmo procedimento para uma velocidade baixa v_{a2} até v_{b2} . Mede-se o tempo transcorrido entre elas (t_1 e t_2) e desta forma calcula-se as acelerações a_1 e a_2 , assim como, as velocidades médias alta v_1 e baixa v_2 . Com estes valores e utilizando a massa total do veículo m e a área frontal A pode-se calcular o coeficiente de arrasto aerodinâmico e o de rolamento conforme as equações a seguir:

$$v_1 = \frac{v_{a1} + v_{b1}}{2} \quad (19)$$

$$v_2 = \frac{v_{a2} + v_{b2}}{2} \quad (20)$$

$$a_1 = \frac{v_{a1} - v_{b1}}{t_1} \quad (21)$$

$$a_2 = \frac{v_{a2} - v_{b2}}{t_2} \quad (22)$$

$$C_d = \frac{6 * m * (a_1 - a_2)}{A * (v_1^2 - v_2^2)} \quad (23)$$

$$f_r = \frac{28,2 * (a_2 v_1^2 - a_1 v_2^2)}{10^3 * (v_1^2 - v_2^2)} \quad (24)$$

Este método é aplicável para velocidades de até 100 km/h.

As equações 23 e 24 podem ser reescritas para levar em consideração a massa específica do ar e as demais unidades no SI:

$$C_D = \frac{M * (a_1 - a_2)}{A * \rho * 0,5 * (v_1^2 - v_2^2)} \quad (25)$$

$$f_r = \frac{(a_2 v_1^2 - a_1 v_2^2)}{g * (v_1^2 - v_2^2)} \quad (26)$$

As normas SAE J1263 “*Road Load Measurement And Dynamometer Simulation Using Coastdown Techniques*”, SAE J2263 “*Road Load Measurement Using Onboard Anemometry And Coastdown Techniques*” e SAE J2264 “*Chassis Dynamometer Simulation Of Road Load Using Coastdown Techniques*” fornecem os valores mínimos de precisão e resolução dos instrumentos de medição a serem utilizados quando da obtenção dos dados para utilização na determinação das cargas de estrada. São eles:

- Tempo: precisão de $\pm 0,1\%$ do intervalo total medido e resolução de 0,1 segundos;
- Velocidade: precisão de $\pm 0,4$ km/h e resolução de $\pm 0,2$ km/h
- Temperatura: resolução de 1 °C e precisão de ± 1 °C
- Pressão atmosférica: precisão de $\pm 0,7$ kPa
- Velocidade do vento: componente longitudinal com precisão de ± 1.6 km/h
- Massa do veículo: precisão de ± 5 kg
- Pressão interna dos pneus: precisão ± 3 kPa

Para medir o tempo foi utilizado um cronômetro Casio. Este instrumento possui precisão de 0,05% e resolução de 0,01 segundos. Para calibrar o velocímetro do veículo foi utilizado um GPS marca Garmin modelo E-Trex com precisão de $\pm 0,2$ km/h e resolução de $\pm 0,1$ km/h.

Dentre as condições gerais para o teste destacam-se a temperatura ambiente que deve estar entre -1 °C e 32 °C, sem neblina, velocidade média do vento inferior a 16 km/h com rajadas inferiores a 20 km/h e componente transversal menor do que 8 km/h. Outras condições incluem inclinação da pista menor do que 0,5% com pista seca, limpa e sem ondulações. O intervalo de medição deve estar entre 100 km/h e 40 km/h.

A preparação do veículo deve prever o amaciamento do mesmo com o mínimo de 500 km antes do teste sendo que os pneus devem ter no mínimo 160 km de uso e possuir pelo menos 75% da altura original dos sulcos.

Para o registro das informações pertinentes ao veículo e ao experimento foi criado o formulário apresentado no anexo B.

A área frontal do veículo deve ser medida ou estimada de acordo com a seguinte equação sugerida pelo manual Bosch:

$$A = 0,9 * B * H \quad (27)$$

Onde B é a distância entre as rodas e H é a altura do veículo, ambos em metros.

Com os dados obtidos do fabricante do veículo utilizado (Renault do Brasil), a área calculada desta forma é de:

$$A = 0,9 * 1,385 * 1,417 = 1,766 \text{ m}^2$$

Antes do experimento foi necessário realizar a calibração do velocímetro do veículo já que o mesmo seria utilizado como referência na medição das diversas velocidades. Esta calibração foi realizada através do uso do GPS. Para as velocidades indicadas no velocímetro foi criada uma tabela que mostra a velocidade real em km/h conforme a tabela 8.3.

V indicada	V real
10	10,56
20	19,86
30	29,16
40	38,46
50	47,76
60	57,06
70	66,36
80	75,66
90	84,96
100	94,26
110	103,56
120	112,86

Tabela 8.3 - Calibração do velocímetro do veículo testado (em km/h)

Para a obtenção dos dados experimentais, o veículo foi acelerado até a velocidade indicada de 100 km/h (real de 94,26 km/h) e então a transmissão foi posicionada em neutro. A partir deste momento foi registrado o tempo decorrido para que o veículo fosse desacelerado até 90 km/h (real de 84,96 km/h) e após o mesmo procedimento foi realizado para as velocidades de 60 km/h (57,06 km/h) à 50 km/h (47,76 km/h). O experimento foi desenvolvido em um trecho da RST-453 entre os quilômetros 65 e 69 por apresentar uma extensão plana suficiente para a realização do mesmo. Apesar da baixa velocidade do vento no momento do experimento, as medições foram realizadas em ambos os sentidos da via (direção 1 e 2) a fim de eliminar o efeito

do mesmo em sua componente longitudinal. Este procedimento também elimina o efeito de qualquer inclinação que aquele trecho possa ter.

O veículo vazio foi “pesado” e sua massa é de 1050 kg. Foi adicionado ao cálculo uma massa de 177 kg referente ao motorista, auxiliar e equipamentos totalizando 1227 kg.

8.4. Validação da teoria

Os resultados do experimento podem ser vistos na tabela 8.4. Os valores obtidos na experimentação mostram claramente uma diferença entre os tempos medidos nas direções 1 e 2 dentro de uma mesma faixa de velocidades, o que se supõe seja devido a influência do vento e/ou de uma pequena inclinação na pista. Os tempos medidos na direção 1 foram consistentemente sempre maiores do que os medidos na direção 2. O cálculo da média dos tempos nas duas direções possibilitou a eliminação desta influência. Os dados obtidos foram inseridos em uma planilha Excel para o cálculo dos coeficientes de arrasto aerodinâmico C_D e de rolamento f_r .

		t_1 (s)				t_2 (s)	
		Direção 1	Direção 2			Direção 1	Direção 2
		8,32	8,05			13,66	13,21
		8,29	8,15			13,52	13,33
		8,43	8,08			13,81	13,27
		8,33	8,06			13,70	13,19
		8,41	8,13			13,55	13,25
		8,30	8,10			13,72	13,14
Médias		8,35	8,10	Médias		13,66	13,23
Média total		8,22		Média total		13,45	

Tabela 8.4 - Resultados obtidos no experimento

Os dados utilizados nas equações foram:

$$v_{a2} \quad 57,06 \text{ km/h ou } 15,85 \text{ m/s}$$

$$v_{b2} \quad 47,76 \text{ km/h ou } 13,27 \text{ m/s}$$

$$t_2 \quad 13,45 \text{ s}$$

$$v_{a1} \quad 94,26 \text{ km/h ou } 26,18 \text{ m/s}$$

$$v_{b1} \quad 84,96 \text{ km/h ou } 23,60 \text{ m/s}$$

$$t_1 \quad 8,22 \text{ s}$$

v_2	52,41 km/h ou 14,56 m/s
v_1	89,61 km/h ou 24,89 m/s
a_2	0,192 m/s ²
a_1	0,314 m/s ²
Pr	100,8 kPa
Tr	25 °C
H	1,417 m
B_i	1,385 m
M	1227 kg
A	1,766 m ²
ρ	1,178 kg/m ³
<i>Direção 1: 243°</i>	
<i>Direção 2: 63°</i>	
<i>Velocidade do vento 3 km/h ou 0,83 m/s</i>	
<i>Direção do vento 80° (leste)</i>	
g	9,81 m/s ²

Utilizando as equações 25 e 26, os valores calculados para o coeficiente de arrasto aerodinâmico e de rolamento foram respectivamente 0,3534 e 0,0131.

O veículo utilizado foi um automóvel marca Renault modelo Clio Sedan 2003 ano de fabricação 2003 de propriedade do aluno mostrado na figura 8.6, entretanto é importante salientar que o método proposto pode ser aplicado para qualquer veículo automotor inclusive para os caminhões produzidos pela International Caminhões do Brasil. A informação obtida junto ao fabricante do veículo mostra um valor para o coeficiente de arrasto aerodinâmico muito próximo do valor obtido pelo método. O fabricante informa para este modelo um C_D de 0,35 enquanto que o experimento levou a um coeficiente de 0,3534. O valor encontrado é típico para veículos tipo sedan cinco portas. Para veículos de alta performance desenvolvidos originalmente com o foco na otimização do coeficiente de arrasto aerodinâmico os valores típicos são menores. Para efeito de comparação podemos citar o EV1 da General Motor com $C_D = 0,19$, o Precept da mesma montadora com $C_D = 0,163$ e o Honda Insight híbrido com $C_D = 0,25$.

O coeficiente de resistência ao rolamento obtido pelo método (0,0131) é muito próximo ao valor calculado quando utiliza-se as equações 13 e 14. Os valores obtidos desta forma considerando uma velocidade média de 71 km/h, f_0 0,01 e f_s 0,005 são:

- Pela equação 6: 0,0144
- Pela equação 7: 0,0121

Por estas razões, pode-se considerar válido o método empírico para obtenção do coeficiente de arrasto aerodinâmico e rolamento proposto pela Bosch no livro “Automotive Handbook” quinta edição.



Figura 8.6 - Veículo utilizado para validação do método

8.5. Cálculo da potência e capacidade do banco de baterias

De posse dos valores dos coeficientes obtidos através da experimentação, pode-se usar as equações 17 e 18 para calcular a potência necessária para movimentar o veículo nas diversas condições a que ele será submetido. Este trabalho está focado apenas na condição de velocidade constante de 90 km/h, piso plano e sem vento. Este cálculo, a 90 km/h, vai propiciar a comparação entre os valores de consumo específico divulgados pelo fabricante do veículo com o desempenho do mesmo veículo se este fosse equipado com tração elétrica.

Quando aplica-se as equações 17 e 18 na condição de pista plana com $\theta = 0$, massa do veículo vazio mais um passageiro de 70 kg e velocidade de 90 km/h (25 m/s) e nas condições normais de temperatura e pressão, obtém-se os seguintes resultados:

$$R_{RL} = 0,0131 * 1120 * 9,81 + 0,5 * 1,225 * 0,3534 * 1,766 * 25^2$$

$$R_{RL} = 143,93 + 238,91 = 382,84 \text{ N}$$

$$P_{RL} = 382,84 \text{ N} * 25 \text{ m/s} = 9571 \text{ W ou } 12,83 \text{ HP (veículo original)}$$

Nota-se que após a conversão o veículo venha a pesar mais do que o original equipado com motor de combustão interna devido ao peso adicionado do banco de baterias. Como pode-se ver no tópico 8.7, o banco de baterias pode acrescentar cerca de 500 kg à massa original do veículo após a conversão. Refazendo os cálculos para uma massa de 1050 kg mais um passageiro de 70 kg mais 500 kg de baterias tem-se:

$$R_{RLE} = 0,0131 * 1620 * 9,81 + 0,5 * 1,225 * 0,3534 * 1,766 * 25^2$$

$$R_{RLE} = 208,19 + 238,91 = 447,1 \text{ N}$$

$$P_{RLE} = 447,1 \text{ N} * 25 \text{ m/s} = 11177,5 \text{ W ou } 15 \text{ HP (veículo elétrico)}$$

8.6. Consumo específico

Assumindo uma eficiência 80% para o motor elétrico e 80% para a transmissão, que são valores normalmente encontrados, obtemos o valor para o consumo específico, C_e de 0,194 kWh/km através da relação:

$$C_e = (11177,5 \text{ W} / (90 \text{ km/h} * 0,8 * 0,8 * 1000 \text{ W/kW})) = 0,194 \text{ kWh/km}$$

Como o preço do kWh fornecido pelas distribuidoras é de R\$ 0,40, este automóvel gastaria 0,0766 R\$/km (0,40 R\$/kWh*0,194 kWh/km) em eletricidade. Seria o equivalente a um consumo de 28,1 km/l (2,15 R\$/litro/0,0766 R\$/km) de gasolina. O Clio Sedan possui um motor com potência máxima de 110 CV ou aproximadamente 82 kW mas gasta apenas 11,96 kW (9571 W/0,8 eficiência da transmissão/1000 W/kW) para mover-se com velocidade constante de 90 km/h em piso plano. De acordo com o fabricante, o veículo original com motor de combustão interna possui um consumo de 16 km/l na estrada (nas mesmas condições), ou seja, a economia seria 43% com a adoção da tração elétrica usando, por exemplo, um motor de 14 kW (cerca de 19 HP) de potência nominal. Este valor é obtido dividindo-se a potência P_{RLE} (já considerando o peso extra das baterias) pela eficiência da transmissão (estimada em 80%). De acordo com o site da KTA, a potência máxima de um motor elétrico é, em média, cerca de três vezes o valor da potência nominal as demais condições de uso (rampas e acelerações) poderiam ser atingidas bastando operar o motor no regime de potência máxima. Obviamente cada motor apresenta uma curva característica de potência e a máxima é restrita a intervalos limitados de tempo a fim de

não causar sobre aquecimento o que poderia danificar permanentemente o mesmo. Como sugestão poderia ser utilizado nesta aplicação o motor marca Advanced DC modelo 203-06-4001 que tem potência nominal de 19 HP e potência máxima de 55 HP mostrado no site da KTA. Ele opera em 120 volts CC e pesa 48,5 kg. De acordo com o mesmo site, especializado em componentes para veículos elétricos, este motor pode ser empregado em veículos elétricos que tenham até 1815 kg de massa. Este motor custa em média nos EUA U\$ 1.200,00.

8.7. Especificação do banco de baterias

Nas condições ideais, 90 km/h e pista plana, seria necessário um banco de baterias que fornecesse cerca de 19,4 kWh para que o veículo tivesse uma autonomia de 100 km ($0,194 \text{ kWh/km} * 100 \text{ km}$). A capacidade do sistema de baterias irá depender da tensão escolhida para o sistema de tração. Caso o sistema operasse com 120 volts, valor comumente encontrado em veículos elétricos de boa performance, a capacidade total necessária seria de 161,7 Ah ($19,4 \text{ kWh} / 120 \text{ volts} * 1000 \text{ W/kW}$). O motor nesta condição consumiria $14 \text{ kW}/120 \text{ volts} = 116,7 \text{ A}$. Conforme o gráfico da figura 8.8, uma bateria marca Trojan modelo T-125 pode fornecer 115 A em um ciclo de descarga de 75 minutos, tempo suficiente para percorrer até 112,5 km a 90 km/h. Esta bateria possui uma tensão nominal de 6 volts o que tornaria necessário um banco com 20 baterias deste modelo para alimentar o veículo testado. A massa total das baterias seria de aproximadamente 600 kg ocupando um volume de $0,27 \text{ m}^3$ (270 litros). O preço desta bateria nos EUA é cerca de U\$ 116,00 cada. A diferença entre o peso dos componentes removidos do veículo antes da conversão e o peso extra das baterias, motor elétrico e demais componentes adicionados deve então ser confirmada para validar o cálculo da carga de estrada apresentado anteriormente.

O anexo C mostra detalhadamente os passos a seguir para a conversão de um veículo equipado com motor de combustão interna para tração elétrica.

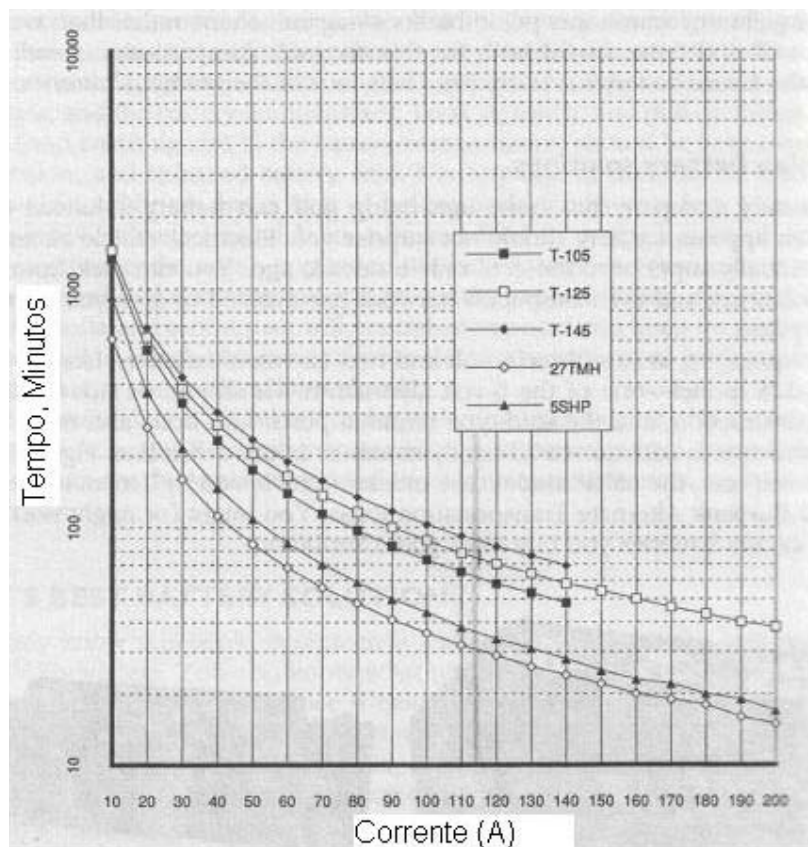


Figura 8.7 - Gráfico Tempo x Corrente para diversos modelos de baterias (Fonte Brant)

8.8. Reduzindo as emissões veiculares

Como já citado anteriormente, 80% da poluição atmosférica nos grandes centros urbanos provém das emissões geradas no escapamento dos veículos automotores. A conversão do veículo testado para tração elétrica contribuiria significativamente para diminuir este efeito nocivo característico dos veículos ditos convencionais. Segundo a Agência de Certificação Veicular da Inglaterra (VCA), um veículo de 5 portas como o Volkswagen Golf que utiliza um motor de 1598 cm³ similar ao que equipa o veículo testado, emite cerca de 170 g de CO₂ por quilômetro rodado. Considerando um total de 7000 quilômetros rodados anualmente por este veículo em um ciclo urbano, poderia-se evitar que 1,2 toneladas de CO₂ fossem jogados na atmosfera.

O benefício econômico fica claro quando compara-se o consumo específico nos dois casos. O veículo equipado com tração elétrica teria um consumo específico equivalente de 28,1 km/litro enquanto o convencional com motor de combustão interna apresenta, em média, 16 km/litro. Esta análise é válida para os atuais preços da gasolina e do kWh (R\$ 2,15 e R\$ 0,40 respectivamente).

8.9. Avaliação dos resultados

Após a análise dos dados obtidos, verifica-se que o método empírico proposto pela Bosch fornece uma metodologia eficiente e de baixo custo para obtenção dos coeficientes de arrasto aerodinâmico e de rolamento. Este método pode ser aplicado sem a necessidade de equipamentos sofisticados e pessoal especializado e fornece boas aproximações em relação aos valores informados pelo fabricante do veículo e aqueles fornecidos em tabelas e formulações elaboradas por renomados institutos de pesquisa.

Estes coeficientes permitiram calcular o valor da potência nominal de um motor elétrico que poderia ser aplicado na conversão do veículo testado. Neste capítulo mostrou-se também que existem opções de motores elétricos disponíveis comercialmente para esta aplicação. Os dados também foram usados para definir um banco de baterias que permitiria ao veículo atingir uma autonomia de aproximadamente 100 km. Também neste caso, as baterias poderiam ser facilmente encontradas no mercado.

A conclusão mais importante deste capítulo porém, é a de que a conversão do veículo testado traria benefícios importantes do ponto de vista da preservação do meio-ambiente pela redução das emissões dos gases causadores do efeito estufa.

9. CONCLUSÃO

O nascimento do veículo elétrico se confunde com o surgimento do automóvel. Até meados do ano de 1910 o veículo elétrico dominou o cenário vindo a ser substituído gradativamente pelo veículo equipado com motor de combustão interna até se tornar quase inexistente. Naquela época pouco, ou quase nada, se falava em termos de alterações climáticas devido às emissões poluentes dos veículos. O petróleo era abundante e o veículo convencional era mais adaptável às necessidades de velocidade e autonomia. Hoje a situação inverteu-se a tal ponto que as atuais regulamentações de emissões estão se tornando cada vez mais restritivas.

O sistema de tração dos veículos atuais deverá ser gradativamente substituído por meios menos agressivos ao meio-ambiente. Várias tecnologias têm sido estudadas mas a maioria baseia-se na propulsão elétrica através de um motor elétrico. A indefinição fica apenas em torno do meio utilizado para gerar a energia elétrica necessária para acionar o motor elétrico. A tecnologia que se encontra em estágio mais avançado é a da célula de combustível. Apesar disto ainda existem sérias indefinições em relação à obtenção e armazenagem do hidrogênio necessário para a geração de eletricidade. Armazenar hidrogênio, seja este no estado gasoso ou líquido, representa um risco sério de explosão. Deve-se lembrar que este produto é amplamente utilizado como combustível para foguetes. Outra forma sendo estudada é o uso de reformadores que extraem o hidrogênio a partir de um combustível fóssil (como a gasolina ou diesel) ou vegetal (como o álcool). Neste caso, continuaríamos a depender dos combustíveis convencionais com o agravante da baixa eficiência na extração do hidrogênio para a célula de combustível e posterior descarte para a atmosfera dos resíduos do processo que são tão danosos ao meio-ambiente quanto o gás carbônico.

O armazenamento da energia elétrica em acumuladores é uma tecnologia já dominada e em constante processo de aperfeiçoamento. As baterias modernas já apresentam uma densidade de energia muito superior aquelas utilizadas nos veículos do início do século vinte. Já se consegue autonomia suficiente para uso urbano até mesmo com baterias de baixo conteúdo tecnológico como as já conhecidas baterias tipo chumbo-ácido de ciclo de descarga profunda utilizadas para tração.

Os atuais ciclos de utilização dos veículos urbanos tornam possível a utilização de veículos elétricos simples e de fácil construção. As velocidades típicas nos grandes centros urbanos também já não são fatores limitantes para o uso de veículos elétricos à bateria. Alguns fabricantes mundo afora já oferecem opções de veículos elétricos urbanos à bateria. É de fundamental importância que o governo e a sociedade utilizem esta tecnologia disponível até que

as novas tecnologias que estão em estudo possam ser implementadas a nível comercial. Mesmo com uma pequena parcela da frota de veículos urbanos operando com energia elétrica já se poderia ter um grande benefício em termos de redução das emissões de gases causadores do efeito estufa.

Outro aspecto importante a considerar diz respeito à economia trazida pelo veículo elétrico ao seu usuário. Com a utilização mais eficiente da energia, o veículo elétrico proporciona um menor custo por quilômetro rodado. Caso as distribuidoras adotassem um sistema de tarifas reduzidas para usuários de veículos elétricos que reabastecem as baterias fora do horário de pico de consumo, a economia poderia ser ainda maior.

Veículos elétricos também podem ser obtidos através da conversão de veículos convencionais. Para tanto é necessário conhecer as cargas de estrada que estarão associadas com a operação do mesmo. Os coeficientes de arrasto aerodinâmico e de rolamento deve ser determinados a fim de possibilitar a definição da potência do motor elétrico e capacidade do banco de baterias a ser utilizado na conversão.

O trabalho explorou o método sugerido pela Bosch no Automotive Handbook, 2000, e mostrou ser o mesmo adequado para este fim. Ficou claro na simulação da conversão que o veículo obtido seria menos poluente e mais econômico. Mostrou-se também que os componentes necessários para a conversão estão comercialmente disponíveis.

Espera-se que este trabalho seja útil para que a comunidade acadêmica explore de maneira mais profunda este tema e que a sociedade e o governo sejam alertados para a necessidade urgente de mudança na maneira pela qual as pessoas se deslocam nas grandes cidades. Deve-se ter a consciência de que o que fazemos hoje pode afetar negativamente a qualidade de vida das gerações vindouras.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Anderman, M., Kalhammer, F., MacArthur, D., 2000. **“Advanced Batteries for Electric Vehicles: An Assessment of Performance, Cost and Availability”**, California Air Resources Board, USA.

Bosch, Robert, 2000. **“Automotive Handbook”**, Germany.

Brant, Bob, 1993. **“Build Your Own Electric Vehicle”**, McGraw-Hill, USA.

California Environmental Protection Agency, 2001. **“Impacts of Alternative ZEV Sales Mandates on California Motor Vehicle Emissions: A Comprehensive Study”**, USA.

Gillespie, Thomas D., 1992. **“Fundamentals of Vehicle Dynamics”**, Society of Automotive Engineers, USA.

Gurgel, João Augusto Conrado do Amaral, 1982. **“Porquê Veículos Elétricos?”**, Gurgel, Brasil.

Hollanda, Jayme Buarque, **“Veículo Elétrico Híbrido e a Geração Distribuída”**, Fórum de Cogeração, abril de 2002.

Melo Neto, Alberto Oliveira de A. e outros, 2000. **“Motores Elétricos de Corrente Contínua”**, Universidade Federal da Bahia, Brasil.

Moore, Bill, 2002. **“Why Electric Vehicles”**, EVWorld, USA.

Pomilio, Antenor José e Palhares, Álvaro G. Badan, **“Veículo Elétrico com Frenagem Regenerativa, Desempenho e Aumento de Autonomia”**, IX COBEM, 1987.

Society of Automotive Engineers, 1996. **“J2263 - Road Load Measurement Using Onboard Anemometry And Coastdown Techniques”**, USA.

Society of Automotive Engineers, 1992. **“J227 – Electric Vehicle Test Procedure”**, USA.

Society of Automotive Engineers, 1995. “**J1263 - Road Load Measurement And Dynamometer Simulation Using Coastdown Techniques**”, USA.

Society of Automotive Engineers, 1995. “**J2264 - Chassis Dynamometer Simulation Of Road Load Using Coastdown Techniques**”, USA.

Dables, John R., “**Is The Electric Vehicle For You?**”, GM Electric Vehicles.

Stern, Philip Van Doren, “**Tin Lizzie – Story of the Fabulous Model T Ford**”, Simon and Schuster, 1955.

Nicholson, T. R., “**Passanger Cars 1863-1904**”, The McMillan Company, 1970.

Frank, Len e McCosh, Dan, “**Electric Vehicles Only**”, Popular Science, maio de 1991.

Sites na Internet:

Nice, Karim, 2003, “**How Fuel Cells Work**”, <http://www.howstuffworks.com/>.

KTA componentes para veículos elétricos, <http://www.kta-ev.com/>.

International Trucks and Engine Corporation, (intranet restrito à funcionários).

VCA Vehicle Certification Agency, Inglaterra, <http://www.vcacarfueldata.org.uk/>.

GRUVE, Grupo de Estudo sobre Veículos Elétricos da UERJ, <http://www.gruve.eng.uerj.br/>.

Energy Information Administration, Department of Transportation, Estados Unidos da América, <http://www.eia.doe.gov/>.

California Air Resources Board (CARB), Estados Unidos da América, <http://www.arb.ca.gov/>.

11. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

Brain, Marshal, 2003. **“How Electric Cars Work”**, USA, <http://www.howstuffworks.com/>.

Electric Auto Association and AC Propulsion Inc., 2003. **“The EV Business: A Post-Mandate Perspective”**, USA.

Electric Vehicle Association of Canadá, 2000. **“Full Fuel Cycle Emissions Reductions through the replacement of ICEVs with BEVs”**, USA.

ANEXO A - Veículos elétricos modernos

Atualmente existem no mercado várias classes de veículos elétricos. Desconsiderando um sem-número de patinetes, cadeiras tipo triciclos e outros veículos elétricos menores, podemos encontrar desde *scooters* até *pick-ups*, ônibus e caminhões dotados de tração elétrica. Muitos deles são oferecidos por empresas de pequeno porte, enquanto outros, por grande montadoras como a Toyota. Alguns são versões convertidas de veículos convencionais que geralmente são oferecidos por empresas especializadas neste tipo de tarefa. Existem ainda os veículos elétricos que são convertidos por seus próprios donos.


Para analisar os modelos elétricos disponíveis atualmente, pode-se dividi-los em 6 classes:

- Scooters (motonetas) e motocicletas;
- NEV's ou veículos elétricos suburbanos;
- Comutadores de três rodas;
- Automóveis;
- *Pick-ups e SUV's*;
- Caminhões e ônibus;

Motonetas


As motonetas elétricas disponíveis comercialmente são fabricadas principalmente na Ásia, Europa e Estados Unidos. Dentre os modelos que mais se destacam podemos encontrar:

MODELO: ScootElec	FABRICANTE: Peugeot
	
AUTONOMIA (km):	45
VELOCIDADE MÁXIMA (km/h):	50
MASSA TOTAL (kg):	115
POTÊNCIA (kW):	2,8
TENSÃO (volts):	18
PREÇO ESTIMADO (US\$):	3.425,00

MODELO: Lynx	FABRICANTE: EVThai
	
AUTONOMIA (km):	50
VELOCIDADE MÁXIMA (km/h):	45
MASSA TOTAL (kg):	95
POTÊNCIA (kW):	1,25
TENSÃO (volts):	24
PREÇO ESTIMADO (US\$):	990,00


MODELO: Esarati 300	FABRICANTE: Esarati
	
AUTONOMIA (km):	80
VELOCIDADE MÁXIMA (km/h):	80
MASSA TOTAL (kg):	126
POTÊNCIA (kW):	2,2
TENSÃO (volts):	36
PREÇO ESTIMADO (US\$):	3.350,00

MODELO: EVT4000e	FABRICANTE: EVT America
	
AUTONOMIA (km):	65
VELOCIDADE MÁXIMA (km/h):	48
MASSA TOTAL (kg):	170
POTÊNCIA (kW):	3,3
TENSÃO (volts):	48
PREÇO ESTIMADO (US\$):	ND


MODELO: EMB	FABRICANTE: Lectra
	
AUTONOMIA (km):	24
VELOCIDADE MÁXIMA (km/h):	72
MASSA TOTAL (kg):	145
POTÊNCIA (kW):	2,24
TENSÃO (volts):	24
PREÇO ESTIMADO (US\$):	ND

Nev's ou veículos elétricos suburbanos

Os NEV's ou veículos elétricos suburbanos são, na realidade, uma evolução dos carros de golfe. Sua utilização principal é no deslocamento em curtas distâncias e que não é exigido grandes velocidades. Seu uso é restrito à locais fechados como empresas, parques, condomínios e bairros residenciais fora da área central das cidades. São muito utilizados por pessoas idosas com dificuldade de locomoção. Os mais conhecidos são:

MODELO: Think NEV	FABRICANTE: Ford
	
AUTONOMIA (km):	48
VELOCIDADE MÁXIMA (km/h):	40
MASSA TOTAL (kg):	612
POTÊNCIA (kW):	5
TENSÃO (volts):	72
PREÇO ESTIMADO (US\$):	6.495,00


MODELO: E825	FABRICANTE: GEM
	
AUTONOMIA (km):	56
VELOCIDADE MÁXIMA (km/h):	40
MASSA TOTAL (kg):	500
POTÊNCIA (kW):	ND
TENSÃO (volts):	72
PREÇO ESTIMADO (US\$):	6.995,00


MODELO: ParCar NEV	FABRICANTE: Columbia
	
AUTONOMIA (km):	80
VELOCIDADE MÁXIMA (km/h):	40
MASSA TOTAL (kg):	340
POTÊNCIA (kW):	ND
TENSÃO (volts):	48
PREÇO ESTIMADO (US\$):	6.694,00

Comutadores de três rodas

Os comutadores são utilizados para percorrer distâncias maiores. São normalmente utilizados para transportar o usuário de casa para o trabalho e vice-versa. Os modelos mais facilmente encontrados são:

MODELO: City-EI	FABRICANTE: Claus Broja
	
AUTONOMIA (km):	50
VELOCIDADE MÁXIMA (km/h):	50
MASSA TOTAL (kg):	290
POTÊNCIA (kW):	3,6
TENSÃO (volts):	36
PREÇO ESTIMADO (US\$):	6.600,00

MODELO: Sparrow	FABRICANTE: Corbin Motors
	
AUTONOMIA (km):	64
VELOCIDADE MÁXIMA (km/h):	112
MASSA TOTAL (kg):	612
POTÊNCIA (kW):	18,6
TENSÃO (volts):	144
PREÇO ESTIMADO (US\$):	14.900,00


MODELO: Gizmo	FABRICANTE: NEVCO
	
AUTONOMIA (km):	72
VELOCIDADE MÁXIMA (km/h):	64
MASSA TOTAL (kg):	315
POTÊNCIA (kW):	4,5
TENSÃO (volts):	48
PREÇO ESTIMADO (US\$):	8.650,00


Automóveis

Existem basicamente três categorias de automóveis de passeio elétricos: os de pequeno porte concebidos para serem elétricos desde o princípio, os que nasceram com motor à combustão interna e foram adaptados pelos fabricantes para rodar com motores elétricos e os convertidos pelos proprietários. Vejamos alguns:


MODELO: Think	FABRICANTE: Ford
	
AUTONOMIA (km):	85
VELOCIDADE MÁXIMA (km/h):	90
MASSA TOTAL (kg):	960
POTÊNCIA (kW):	27 máx.
TENSÃO (volts):	114
PREÇO ESTIMADO (US\$):	ND


MODELO: IT	FABRICANTE: Dynasty
	
AUTONOMIA (km):	48
VELOCIDADE MÁXIMA (km/h):	40
MASSA TOTAL (kg):	657
POTÊNCIA (kW):	12 máx.
TENSÃO (volts):	72
PREÇO ESTIMADO (US\$):	12.000,00


MODELO: Reva	FABRICANTE: Reva EC
	
AUTONOMIA (km):	80
VELOCIDADE MÁXIMA (km/h):	65
MASSA TOTAL (kg):	745
POTÊNCIA (kW):	13 máx.
TENSÃO (volts):	48
PREÇO ESTIMADO (US\$):	6.000,00

MODELO: Bingo	FABRICANTE: Bingo
	
AUTONOMIA (km):	80
VELOCIDADE MÁXIMA (km/h):	45
MASSA TOTAL (kg):	710
POTÊNCIA (kW):	4
TENSÃO (volts):	48
PREÇO ESTIMADO (US\$):	7.000,00

MODELO: Seicento	FABRICANTE: Fiat
	
AUTONOMIA (km):	56
VELOCIDADE MÁXIMA (km/h):	83
MASSA TOTAL (kg):	1.040
POTÊNCIA (kW):	ND
TENSÃO (volts):	180
PREÇO ESTIMADO (US\$):	13.500


MODELO: EV1	FABRICANTE: GM
	
AUTONOMIA (km):	140
VELOCIDADE MÁXIMA (km/h):	128
MASSA TOTAL (kg):	1.360
POTÊNCIA (kW):	102
TENSÃO (volts):	312
PREÇO ESTIMADO (US\$):	ND


MODELO: 106	FABRICANTE: Peugeot								
									
<table border="1"> <tr> <td>Longueur</td> <td>3,68m</td> </tr> <tr> <td>Largeur</td> <td>1,60m</td> </tr> <tr> <td>Hauteur</td> <td>1,38m</td> </tr> <tr> <td>Poids Total en Ordre de Marche</td> <td>1 087Kg</td> </tr> </table>		Longueur	3,68m	Largeur	1,60m	Hauteur	1,38m	Poids Total en Ordre de Marche	1 087Kg
Longueur	3,68m								
Largeur	1,60m								
Hauteur	1,38m								
Poids Total en Ordre de Marche	1 087Kg								
AUTONOMIA (km):	80								
VELOCIDADE MÁXIMA (km/h):	91								
MASSA TOTAL (kg):	1.087								
POTÊNCIA (kW):	11								
TENSÃO (volts):	120								
PREÇO ESTIMADO (US\$):	ND								


MODELO: Zenn	FABRICANTE: Feel Good Cars
	
AUTONOMIA (km):	55
VELOCIDADE MÁXIMA (km/h):	40
MASSA TOTAL (kg):	465
POTÊNCIA (kW):	4
TENSÃO (volts):	72
PREÇO ESTIMADO (US\$):	10.000,00


Pick-up's e suv's

Neste segmento encontram-se o maior número de veículos convertidos pelos proprietário. O destaque nesta categoria é a nova SUV da Toyota a RAV4 elétrica lançada em março de 2002. Outros modelos disponíveis são conversões de fábrica de montadoras como a Ford e a GM:

MODELO: RAV4 EV	FABRICANTE: Toyota
	
AUTONOMIA (km):	200
VELOCIDADE MÁXIMA (km/h):	125
MASSA TOTAL (kg):	1.560
POTÊNCIA (kW):	50
TENSÃO (volts):	144
PREÇO ESTIMADO (US\$):	42.000,00


MODELO: Ranger EV	FABRICANTE: Ford
	
AUTONOMIA (km):	80
VELOCIDADE MÁXIMA (km/h):	120
MASSA TOTAL (kg):	2.449
POTÊNCIA (kW):	67 máx.
TENSÃO (volts):	312
PREÇO ESTIMADO (US\$):	42.000,00

MODELO: E-10	FABRICANTE: Solectria
	
AUTONOMIA (km):	65
VELOCIDADE MÁXIMA (km/h):	112
MASSA TOTAL (kg):	1.795
POTÊNCIA (kW):	ND
TENSÃO (volts):	144
PREÇO ESTIMADO (US\$):	ND


MODELO: Dakota	FABRICANTE: Dodge
	
AUTONOMIA (km):	64
VELOCIDADE MÁXIMA (km/h):	105
MASSA TOTAL (kg):	2.585
POTÊNCIA (kW):	ND
TENSÃO (volts):	288
PREÇO ESTIMADO (US\$):	ND


Caminhões e ônibus

Caminhões e ônibus puramente elétricos não são muito comuns. Normalmente encontram-se modelos híbridos elétricos em operação em diversos países. O Brasil é destaque neste segmento com o Eletrabus, um ônibus urbano híbrido elétrico. A Navistar-International também tem o seu projeto de caminhão médio híbrido elétrico como veremos adiante:

MODELO:	FABRICANTE: Solectria
	
AUTONOMIA (km):	80
VELOCIDADE MÁXIMA (km/h):	88
MASSA TOTAL (kg):	ND
POTÊNCIA (kW):	200
TENSÃO (volts):	ND
PREÇO ESTIMADO (US\$):	ND

MODELO:	FABRICANTE: Solectria
	
AUTONOMIA (km):	64
VELOCIDADE MÁXIMA (km/h):	96
MASSA TOTAL (kg):	3.864
POTÊNCIA (kW):	125
TENSÃO (volts):	312
PREÇO ESTIMADO (US\$):	43.000,00

MODELO: Padron	FABRICANTE: Eletrabus
	
AUTONOMIA (km):	ND
VELOCIDADE MÁXIMA (km/h):	60
MASSA TOTAL (kg):	ND
POTÊNCIA (kW):	120
TENSÃO (volts):	ND
PREÇO ESTIMADO (US\$):	ND

MODELO: Might-E truck	FABRICANTE: Canadian EV
	
AUTONOMIA (km):	80
VELOCIDADE MÁXIMA (km/h):	64
MASSA TOTAL (kg):	1588
POTÊNCIA (kW):	21
TENSÃO (volts):	96
PREÇO ESTIMADO (US\$):	ND

ANEXO B - Formulário para aquisição dos dados

ANEXO C - Passos para conversão de um veículo equipado com motor de combustão interna para tração elétrica

Muitos usuários têm optado por converter seu veículo ao invés de comprar um veículo elétrico novo. O motivo disto é o alto custo dos veículos elétricos de produção seriada. Alguns o fazem pelo simples prazer de realizar uma tarefa que requer conhecimentos de mecânica e eletricidade.

A vantagem básica da conversão é o custo. Em geral, o custo final de uma conversão é de US\$ 5.000 sem contar o custo do veículo base, dependendo da configuração escolhida. A compra de um veículo elétrico novo representa em muitos casos um gasto de cerca de US\$ 20.000,00. A desvantagem está no longo tempo necessário para finalização do veículo, assim como, no produto final que é um veículo que não foi concebido para ser elétrico em sua origem. Isto faz com que a eficiência da conversão seja menor do que aquela encontrada em veículos elétricos seriados.

A maioria dos veículos elétricos que circulam hoje nas ruas e estradas de países como os EUA são veículos originariamente equipados com motores de combustão interna que foram convertidos para tração elétrica.

Uma conversão típica usa um controlador de corrente contínua e um motor de corrente contínua. Cada indivíduo escolhe a tensão que o sistema de tração irá operar – normalmente situado entre 36, 48 ou até 192 volts. Esta decisão é importante pois define quantas baterias o veículo deverá carregar e qual o tipo de controlador e motor o veículo irá usar.

Os motores e controladores mais comuns usados nas conversões domésticas são aqueles encontrados na indústria de empilhadeiras e carros de golfe elétricos.

Em relação às baterias disponíveis para a conversão, existem algumas possibilidades de escolha. A maioria das conversões utilizam baterias do tipo chumbo-ácido e estas apresentam as seguintes opções:

- Baterias marinhas tipo deep-cycle
- Baterias usadas em carros de golfe
- Baterias seladas de alta performance

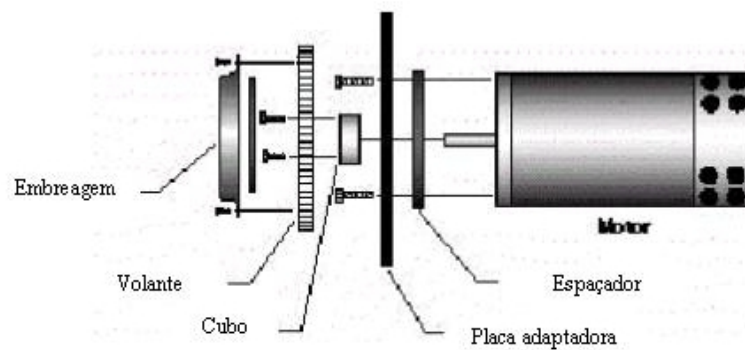
O tipo de eletrólito destas baterias pode ser líquidos, em forma de gel ou do tipo AGM (absorbed glass mat) onde o eletrólito está difundido no interior de um material absorvente. As baterias de eletrólito líquido são as que possuem menor custo mas em contrapartida, são as que apresentam menor energia acumulada e maiores riscos de vazamento em caso de colisão.

Uma vez decido o tipo de motor, controlador e baterias, a conversão pode ser iniciada seguindo os passos a seguir:

1. Remover o motor, tanque de combustível, sistema de exaustão, embreagem e radiador do veículo que será usado como base.

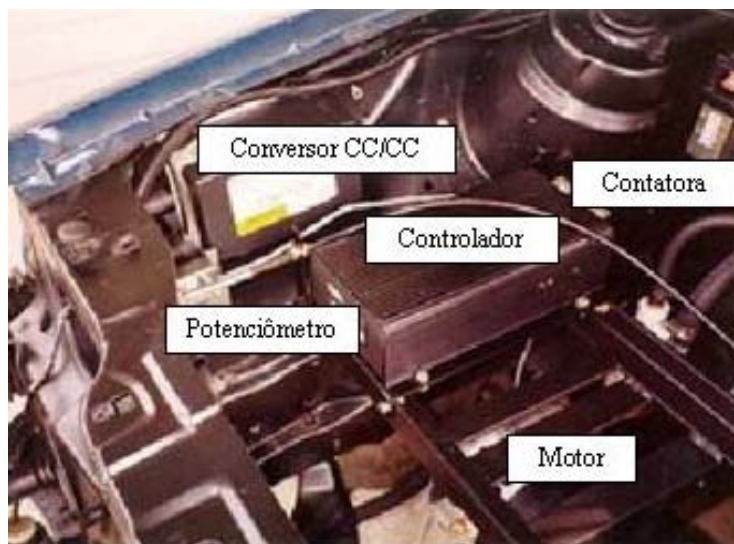


2. Montar a placa adaptadora no motor e em seguida montar o conjunto na transmissão. O motor elétrico geralmente precisa de suportes para fixá-lo à carroceria.



3. Nesta fase normalmente deve-se deixar a transmissão engatada na primeira ou segunda marcha para obter a redução necessária na rotação do motor.

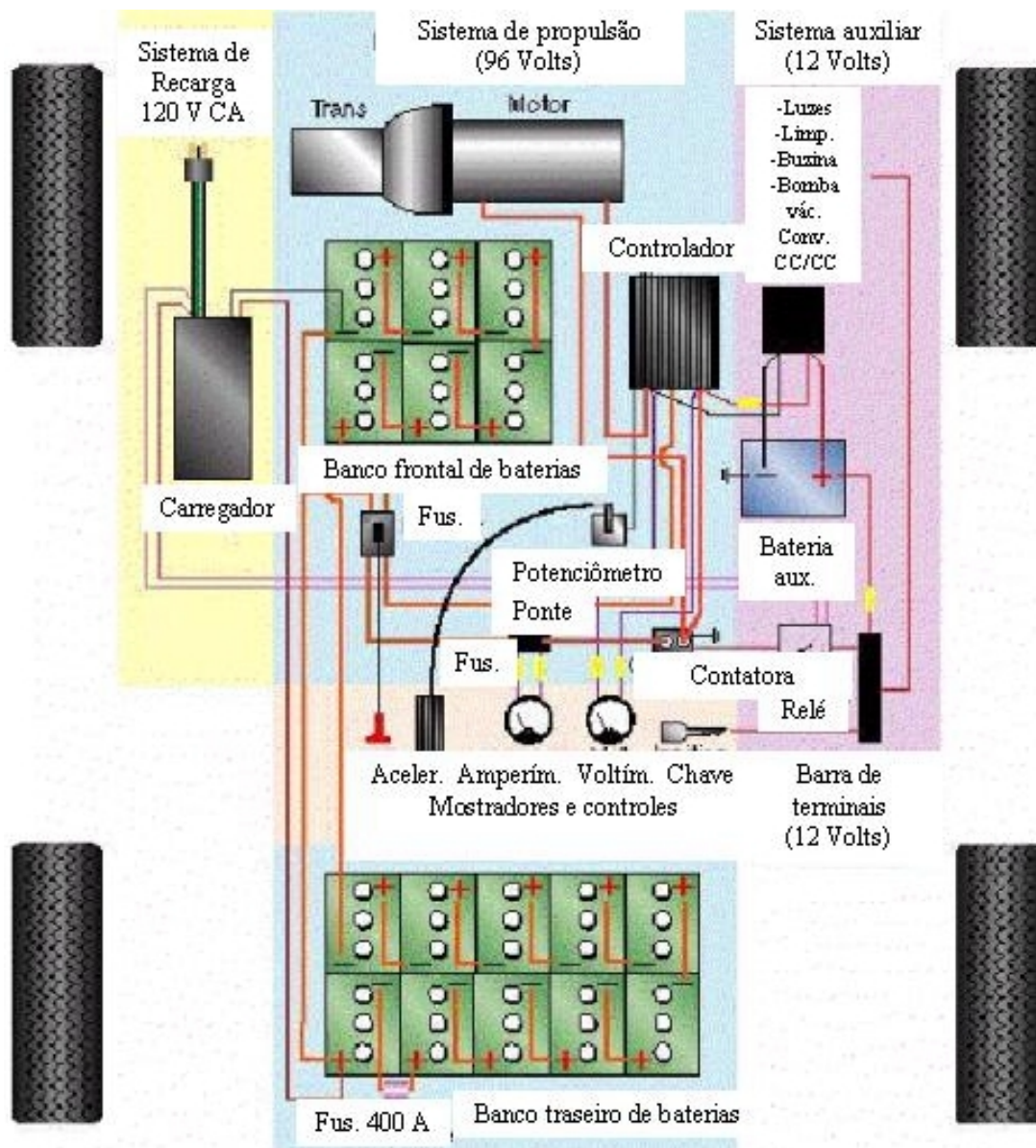
4. Montar o controlador na parte interna da carroceria.



5. Definir a posição para acomodar as baterias e construir o suporte para fixá-las de maneira segura. Instalar as baterias no suporte.



6. Fazer a ligação elétrica das baterias ao controlador e deste ao motor usando cabos de solda de bitola #00.



7. Direção hidráulica e ar condicionado são geralmente deixados de lado em benefício da autonomia já que estes sistemas consomem uma grande quantidade de energia das baterias quando em funcionamento.

8. Pode-se instalar um sistema de aquecimento de água ou diretamente do ar através de resistências elétricas para o conforto nos dias frios, porém, é aconselhável abrir mão deste tipo de sistema em benefício da autonomia.

9. Instalar uma bomba de vácuo para a operação dos freios.

10. Instalar o carregador se este for especificado de estar embarcado.

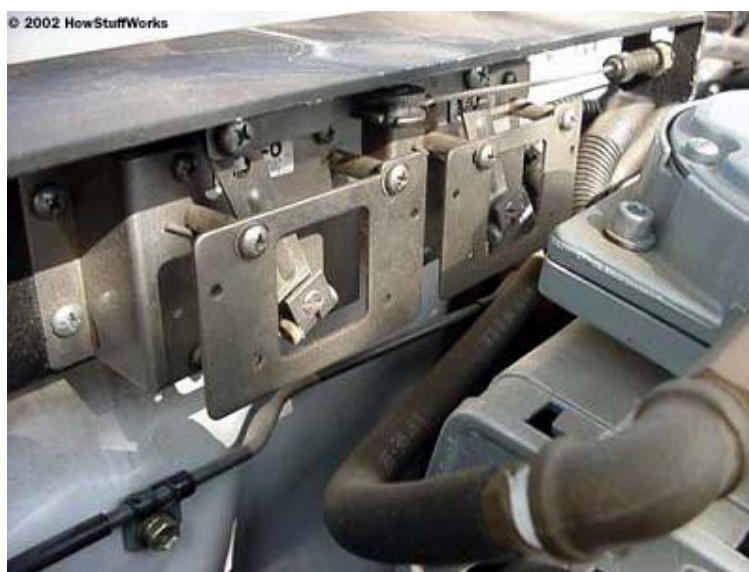


11. Instalar um conversor CC-CC para alimentar os sistemas auxiliares e de iluminação ou instalar uma bateria auxiliar separada para este fim. Neste caso a bateria auxiliar deve ser carregada independentemente das baterias do sistema de tração.

12. Instalar algum tipo de medidor de tensão a fim de servir de indicador do estado da carga das baterias. Este instrumento irá substituir o mostrador de nível de combustível do veículo.



13. Instalar o potenciômetro que será conectado ao controlador a fim de indicar a posição do pedal do acelerador e, desta maneira, alterar a energia entregue pelas baterias para o motor.



14. Se o sistema motor-controlador não dispuser de marcha reversa então para operar o veículo em ré deve-se usar a transmissão do veículo base.

15. Instalar a contatora principal que irá conectar e desconectar as baterias do controlador. Neste caso é necessário um relé com capacidade suficiente para centenas de Amperes e que suporte 36 à 196 volts sem gerar um arco elétrico o que poderia danificar o mesmo.

16. Alterar a instalação da chave de ignição para que ela possa alimentar o circuito secundário da contatora principal (ou relé principal) e também os sistemas auxiliares.



O custo de uma conversão típica pode variar de U\$ 5.000 à U\$ 10.000 dependendo do modelo e da especificação do veículo. O custo em partes se divide da seguinte maneira:

- Baterias - U\$1.000 à U\$2.000
- Motor - U\$1.000 à U\$2.000
- Controlador - U\$1.000 à U\$2.000
- Placa adaptadora - U\$500 à U\$1.000
- Outros (bombas de vácuo, fiação, interruptores, etc.) - U\$500 à U\$1.000