

# PROJETO DE UM VEÍCULO AUTOMOTIVO URBANO DE 2 LUGARES COM PROPULSÃO ELÉTRICA

**Gustavo Henrique Saab Araujo**

gustavo.saab@gmail.com

***Resumo.** O objetivo desse trabalho é explorar uma das alternativas de propulsão automotiva de baixa emissão: a propulsão elétrica. Será desenvolvido um modelo de veículo elétrico, a partir da seleção de suas configurações, na busca do melhor atendimento aos requisitos, tais como: autonomia, aceleração, velocidade, carga máxima. Dessa forma, serão escolhidos: a bateria, o tipo de motor e a configuração do trem de força (powertrain). O projeto englobará também a avaliação das forças resistivas atuando sobre o veículo, de condições de frenagem regenerativa. Assim, o objetivo geral do trabalho é projetar um veículo de passeio urbano de dois lugares com propulsão elétrica, através da determinação de seus componentes principais, dentro de uma configuração estabelecida após pesquisa e decisão.*

**Palavras chave:** Veículos elétricos, Dinâmica Veicular, Veículo Compacto

## 1. Introdução

Com o aumento da temperatura global e as consequências aparentes do efeito estufa, a sociedade e as indústrias têm buscado alternativas sustentáveis e cada vez menos poluentes para os processos de produção e para os produtos em si.

As empresas automotivas não ficam fora dessa tendência. Os estudos sobre sistemas de propulsão alternativos, com emissões baixas ou nulas, são cada vez mais desenvolvidos e muitas soluções já foram encontradas e estão sendo produzidas. As alternativas existentes que mais se destacam atualmente são os carros híbridos e os elétricos.

Os VE são veículos de emissão zero, com baixa quantidade de ruído e alto grau de aproveitamento. Além disso, não necessitam de outros subsistemas, como refrigeração, exaustão, ignição, entre outros existentes nos veículos movidos por um MCI, motivo pelo qual os veículos elétricos são bastante eficientes. Em países como o Brasil, no qual grande parte da geração de energia elétrica é proveniente de usinas hidrelétricas, os veículos elétricos se tornam ainda menos poluentes, uma vez que o processo de geração é também de baixo impacto ambiental.

O desenvolvimento de carros compactos, com apenas dois lugares já é antigo e existem vários modelos disponíveis no mercado. Além de diminuir a extensão do congestionamento e o desperdício do espaço, facilita outro problema dos motoristas, o estacionamento.

### 1.1. Objetivos e Metodologia

Esse trabalho se propõe a estudar as várias configurações de veículos elétricos, avaliando as existentes formas de propulsão, as baterias disponíveis, os métodos de reabastecimento e outras características. Tendo essas informações, será feita a seleção dos melhores componentes que atendam às especificações de projeto, como autonomia, potência, aceleração, velocidade máxima.

Através de pesquisa das soluções atuais, a estrutura de um veículo de dois lugares será escolhida para receber o sistema de propulsão, com a definição de suas dimensões e peso.

O projeto consistirá na elaboração dos modelos para a propulsão com as características selecionadas, com análise de seu desempenho e otimização de suas características, seguindo o conceito de espiral do projeto, uma vez que as análises e os resultados podem fornecer informações que sugiram alterações na idéia inicial.

Serão utilizados os conceitos de Metodologia do Projeto, definindo inicialmente os requisitos de projeto e gerando, dessa forma, soluções que os atendam. Utilizando matrizes de decisão, a melhor alternativa será solucionada e completamente detalhada, seguindo os passos de estudos de viabilidade e projeto básico.

## 2. Veículos Elétricos

Os veículos elétricos têm seu acionamento feito por motores elétricos (ME), podendo acionar diretamente as rodas. A energia utilizada é armazenada em um conjunto de baterias ou ultracapacitores, podendo ser carregada através da rede elétrica ou de outra fonte externa ao veículo.

### 2.1. Principais Componentes

Os principais componentes de um veículo elétrico, que o diferenciam de um automóvel convencional são: sistemas de armazenamento de energia e motor elétrico.

#### 2.2.1. Sistemas de armazenamento de energia

É um dos sistemas mais importantes do VE, uma vez que é o responsável por armazenar e fornecer a energia necessária para que o motor funcione corretamente. Ao mesmo tempo, é a maior limitação dos projetos de veículos elétricos, por seu peso e custo demasiadamente elevados e por oferecer autonomias baixas, em geral. Os possíveis

componentes desse sistema são: baterias eletroquímicas, ultracapacitores ou supercapacitores, flywheel de alta rotação (discos de inércia) e células combustíveis. Esta última não será discutida no escopo desse trabalho.

As baterias eletroquímicas são comumente conhecidas apenas por baterias. Existem diversos tipos delas no mercado, mas as mais utilizadas atualmente são as de chumbo ácido, de níquel cádmio, de níquel metal híbrida, de cloreto de sódio níquel, de lítio íon, de lítio polímero e a de zinco ar. A Tabela (1) mostra uma comparação entre esses tipos de bateria existentes.

Tabela1. Comparação entre baterias

Tipo da Bateria	Densidade de Energia(Wh/kg)	Densidade de Potência (W/kg)	Duração (anos)	Eficiência Energética (%)	Custo (EUR/kWh)
Chumbo-ácido	30-35	200-300	2-3	>80	100-150
Níquel-Cádmio	45-50	80-175	3-10	75	< 600
Níquel-metal Híbrida	60-70	200-300	10	70	300-350
Cloreto de Sódio-Níquel	90-100	160	5-10	80	< 300
Lítio-ion	90-140	300-600	<5	>95	300-600
Lítio-polímero	110-130	300	-	80	300
Zinco-ar	100-220	100	-	60	60

### 2.2.2. Motores Elétricos

Em termos de desempenho motores elétricos têm uma série de benefícios ao longo motorizações tradicionais.

Os motores elétricos são silenciosos, trabalham com grande eficiência energética e têm grandes atrativos para utilização em veículos, pois possuem características de torque e velocidade adequadas para essa finalidade. O torque máximo está disponível em baixas rotações e em altas velocidades o torque ainda é adequado numa faixa de potência praticamente constante, como mostrado na Fig. (1):

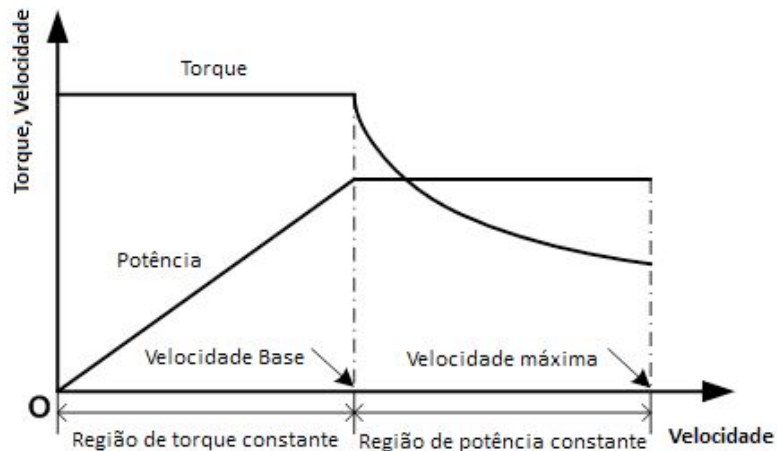


Figura 1. Características típicas de um motor elétrico.

Existem dois tipos básicos de motores, que se subdividem: os de corrente contínua (DC) e os de corrente alternada (AC).

Os motores DC podem ser escovados de excitação em série, de excitação 'shunt', de excitação composta ou de ímã permanente sem escovas. As diferentes formas de excitação dos motores escovados diferem no circuito existente dentro deles, mas o funcionamento e as características são muito semelhantes. Dessa forma, podem ser separados em: escovados e ímã permanente sem escovas (Brushless).

Os motores AC têm ainda mais derivações: primariamente são divididos em síncronos e assíncronos (ou de indução). Existem, dentro dessas categorias, outras divisões. Os mais utilizados para aplicação automotiva, e que serão considerados nesse projeto são os motores de indução e os de relutância variável.

Além desses tipos de motores, há também os 'In wheel' que são diretamente ligados às rodas. Mais especificamente, dentro delas. Algumas fabricantes já têm esse tipo de motores, como a Siemens VDO, a Mitsubishi, a Honda, a Goodyear.

Existem vantagens e desvantagens na utilização desse tipo de motores nos veículos elétricos, removendo uma boa quantidade de dispositivos mecânicos presentes nas configurações convencionais.

### 2.3. Configurações de Powertrain

Inicialmente, os veículos elétricos modernos surgiram da transformação dos veículos convencionais, substituindo o MCI por um elétrico e o tanque de combustível por baterias e mantendo os demais componentes. Entretanto, havia um problema de peso excessivo, baixa flexibilidade e perda de desempenho. Por esse motivo, foram desenvolvidos novos e diferentes arranjos para o conjunto motriz dos carros elétricos, como mostrado na Fig. (2):

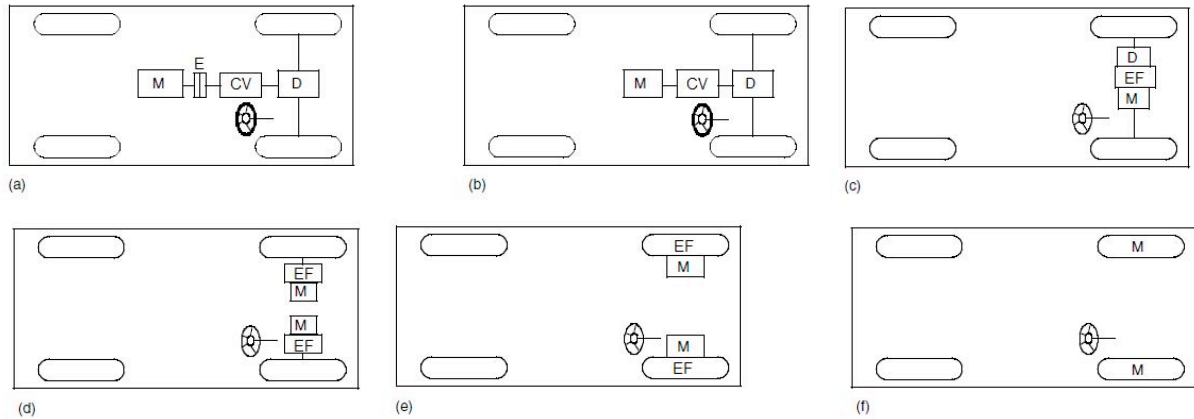


Figura 2. Configurações possíveis: Powertrain VE

- (a) A configuração (a) mostra a primeira alternativa, na qual a propulsão elétrica substitui o motor a combustão de um veículo convencional
- (b) Utilizando um motor com torque constante em uma grande faixa de velocidades, a caixa de marchas pode ser substituída por uma redução fixa e eliminar também a necessidade por uma engrenagem.
- (c) Semelhante à alternativa (b) existe a possibilidade de juntar motor, redução fixa e diferencial em uma montagem única, com ambas as pontas de eixo ligadas às rodas, tornando o sistema mais simplificado e compacto.
- (d) Substitui-se o diferencial mecânico por dois motores de tração, um para cada roda e operando em velocidades diferentes quando o veículo faz uma curva.
- (e) Simplificando ainda mais o sistema de propulsão, podem ser usados os motores ‘in-wheel’, acoplados a uma engrenagem planetária, para reduzir a velocidade do motor e aumentar seu torque.
- (f) Ainda é possível abandonar qualquer engrenagem entre motor e roda motriz, ligando-o diretamente a ela.

### 3. Estudo de Viabilidade

Com o contexto dos veículos elétricos definido e explicado, percebe-se que realmente as soluções caminham para veículos com propulsões desse tipo. Existe uma necessidade da construção de VE’s, por questões ambientais principalmente, cada vez com autonomies maiores e maiores potências.

Para que se faça o projeto, é necessário primeiro definir os requisitos que devem ser atendidos pelo veículo. Neste caso, o trabalho se propõe a projetar um veículo de passeio urbano, com dois lugares e um pequeno porta-malas (até 180L) e propulsão elétrica, para rodar no Brasil.

Partindo desse ponto, definem-se os requisitos do projeto.

#### 3.1. Requisitos de Projeto

##### 3.1.1. Carga e Capacidade

A definição de carga e capacidade desejada para o veículo foi feita baseada em veículos compactos já existentes no mercado, como o Smart Fortwo. É desejável que o carro possa transportar uma carga em torno de 250kg, entre pessoas e bagagem. O peso do veículo dependerá do motor, da estrutura em geral e da bateria, basicamente. O ideal é alcançar um veículo com peso em vazio de aproximadamente 900kgf.

##### 3.1.2. Dimensões

Como veículo compacto, com capacidade para dois ocupantes, as dimensões máximas do veículo não deverão exceder 2800mm de comprimento por 1600mm de largura, por 1600mm de altura.

### 3.1.3. Velocidade Máxima

Como o projeto é para um veículo para rodar dentro da cidade, a velocidade máxima não precisa exceder os 120km/h (33,33 m/s). Essa é uma velocidade para um possível deslocamento maior em vias rodoviárias, por exemplo, uma ida ao aeroporto de Cumbica, em Guarulhos/SP que fica distante do centro e tem o acesso pelas Rodovias Presidente Dutra e Ayrton Senna.

### 3.1.4. Aceleração

O valor da aceleração, a princípio será definido também por comparação aos veículos de mesmo segmento, mais uma vez, como o Smart Fortwo. Será desejável que o carro consiga uma aceleração por volta de 2,5 m/s<sup>2</sup>, alcançando 100 km/h (27,7 m/s) em aproximadamente 11s.

### 3.1.5. Autonomia

A autonomia dos veículos elétricos é o maior limitante atualmente. Para um veículo de passeio, de uso urbano, não há necessidade de que ele percorra uma distância muito grande antes do fim da bateria. Em um dia, não é provável que se percorra mais que 80 km numa grande cidade, considerando que o uso não será comercial. Por ser um veículo compacto e com baixa potência requerida, é possível alcançar uma grande autonomia com facilidade. Como requisito, o valor definido será de 120 km, permitindo maior mobilidade em caso de necessidades e sendo competitivo quando comparado aos outros veículos desse segmento.

### 3.1.6. Normas e Leis

Ainda não há uma regulamentação própria para veículos elétricos e híbridos no Brasil, sendo este um dos motivos pelos quais ainda não são comuns no país. Dessa forma, serão tomadas como referência as normas e leis internacionais, uma vez que devem se tornar base para as nacionais. Na Europa, a regulamentação ainda está em andamento, mas os avanços são grandes. Atualmente, a maior parte dos países adota a Regulação 100 da WFHVR (World Forum for Harmonisation of Vehicle Regulations – Fórum Mundial para Harmonização das Regulações para Veículos), sendo essa a tomada como parâmetro nesse projeto.

### 3.1.7. Mercado e Preços

No Brasil, veículos de propulsão alternativa (HEVs e EVs) ainda não demonstram ter grande apelo comercial. O consumidor não se mostra disposto a pagar mais para ter um veículo desse tipo, apenas pelo fator ambiental. Entretanto, seus preços não serão competitivos com os convencionais num primeiro momento, quando comparados aos carros convencionais. Entretanto, seu preço deverá ser próximo ao de outros veículos elétricos, embora não sejam vendidos no Brasil ainda. Comparado ao preço do Nissan Leaf nos EUA, o preço adequado não deverá exceder os 30 mil dólares.

Ainda assim, para esse projeto, o valor do EV não será o principal, embora a solução final deva ter o mínimo de viabilidade econômica.

## 3.2. Síntese de Soluções

Tendo os principais requisitos de projeto definidos, é necessário conceber alternativas dentre as quais sairá o produto final. Nesse primeiro momento, é importante que existam várias soluções, utilizando de criatividade para atingir o resultado desejado.

Basicamente, não há restrições para a utilização de um tipo de motor com um tipo de bateria. Dessa forma, as soluções serão todas baseadas em combinações entre eles. Foram apresentados 7 tipos de baterias e 4 de motores, além dos *'in-wheel'*, resultando em 28 soluções diferentes contando apenas a variação entre eles. Por esse motivo, para a escolha da melhor alternativa, será feita uma pré-triagem, analisando os aspectos técnicos específicos desses componentes separadamente. Posteriormente, soluções serão geradas adicionando outros pontos importantes para a escolha. Essa primeira análise indicará os mais indicados que serão utilizados na matriz de decisão final.

Sendo assim, as soluções a serem avaliadas serão:

#### Solução 1:

Motor + Bateria + Configuração A + Tração Dianteira

#### Solução 2:

Motor + Bateria + Configuração B + Tração Dianteira

#### Solução 3:

Motor + Bateria + Configuração C + Tração Dianteira

#### Solução 4:

Motor + Bateria + Configuração D + Tração Dianteira

#### Solução 5:

Motor 'in-wheel' + Bateria + Configuração E + Tração Dianteira

#### Solução 6:

Motor 'in-wheel' + Bateria + Configuração F + Tração Dianteira

#### Solução 7:

Motor 'in-wheel' + Bateria + Configuração E + Tração Traseira

#### Solução 8:

Motor 'in-wheel' + Bateria + Configuração F + Tração Traseira

Essas 8 soluções envolvem os componentes e configurações mais importantes para o desenvolvimento do projeto, influenciando no comportamento, controle, peso e outros requisitos do carro. Por esse motivo, serão comparados através da matriz de decisão.

## 4. Projeto Básico

### 4.1. Seleção da melhor alternativa

Tendo as alternativas definidas, é necessário que seja selecionada a que melhor atenda os requisitos e as necessidades do projeto, sendo então detalhada e levada para os próximos passos.

Essa seleção é feita através de uma análise comparativa das soluções definidas no passo anterior, segundo critérios importantes para que o produto atenda aquilo para o qual deve ser projetado. Utiliza-se então uma matriz de decisão, de forma que a solução que obtiver a melhor nota ponderada pelos pesos dos parâmetros é a que seguirá aos próximos ciclos da espiral de projeto.

#### 4.1.1. Seleção do motor

Para a seleção do motor, os parâmetros analisados são apresentados com seus respectivos pesos na Tab. (2):

Tabela 2. Critérios para os motores

Critérios	Pesos	Pesos normalizados
Eficiência	8	0,25
Custo	6	0,19
Peso	9	0,28
Manutenção	4	0,13
Controle	5	0,16
<b>Total</b>	<b>32</b>	<b>1</b>

Assim, os motores são colocados na matriz e avaliados segundo esses critérios:

Tabela 3. Escolha do motor

Critérios	Alternativas							
	DC Escovado		DC Imã Permanente Brushless		AC Indução		AC Relutância Variável	
	Nota	Nota ponderada	Nota	Nota ponderada	Nota	Nota ponderada	Nota	Nota ponderada
Eficiência	2	0,5	4	1	3	0,75	5	1,25
Custo	5	0,9375	3	0,5625	4	0,75	4	0,75
Peso	2	0,5625	4	1,125	3	0,84375	5	1,40625
Manutenção	2	0,25	3	0,375	5	0,625	3	0,375
Controle	5	0,78125	3	0,46875	3	0,46875	4	0,625
<b>Total</b>		<b>3,03125</b>		<b>3,53125</b>		<b>3,4375</b>		<b>4,40625</b>

Pelos critérios adotados, o motor mais indicado para a seqüência do projeto é o motor de corrente alternada com relutância variável.

#### 4.1.2. Seleção da bateria

O processo de seleção da bateria será o mesmo utilizado para os motores. A única diferença serão os critérios adotados na matriz.

Tabela 4. Critérios para as baterias:

Critérios	Pesos	Pesos normalizados
Dens. Energia	9	0,23
Dens. Potência	8	0,20
Duração	5	0,13
Eficiência Energética	7	0,18
Custo	6	0,15
Toxicidade	5	0,13
<b>Total</b>	<b>40</b>	<b>1</b>

Da mesma forma feita com os motores, tendo os pesos definidos, as possíveis baterias foram colocadas na matriz:  
Tabela 5. Escolha da Bateria:

Critérios	Alternativas							
	Chumbo-ácido		Níquel-Cádmio		Níquel-metal Híbrida		Cloreto de Sódio-Níquel	
	Nota	Nota ponderada	Nota	Nota ponderada	Nota	Nota ponderada	Nota	Nota ponderada
Dens. Energia	1	0,225	2	0,45	3	0,675	4	0,9
Dens. Potência	5	1	3	0,6	5	1	4	0,8
Duração	1	0,125	3	0,375	5	0,625	4	0,5
Eficiência Energética	6	1,05	4	0,7	3	0,525	5	0,875
Custo	6	0,9	2	0,3	4	0,6	5	0,75
Toxicidade	1	0,125	2	0,25	4	0,5	3	0,375
<b>Total</b>		<b>3,425</b>		<b>2,675</b>		<b>3,925</b>		<b>4,2</b>

Critérios	Alternativas					
	Lítio-ion		Lítio-polímero		Zinco-ar	
	Nota	Nota ponderada	Nota	Nota ponderada	Nota	Nota ponderada
Dens. Energia	5	1,125	6	1,35	7	1,575
Dens. Potência	7	1,4	6	1,2	1	0,2
Duração	2	0,25	2	0,25	1	0,125
Eficiência Energética	7	1,225	5	0,875	2	0,35
Custo	3	0,45	4	0,6	7	1,05
Toxicidade	6	0,75	5	0,625	7	0,875
<b>Total</b>		<b>5,2</b>		<b>4,9</b>		<b>4,175</b>

Pela análise feita pela matriz de decisão, a bateria mais indicada para o projeto é a de Lítio-ion.

#### 4.1.3 Definição dos Critérios da Matriz

Para a matriz de decisão do veículo, serão definidos os parâmetros aos quais as alternativas geradas no Estudo de Viabilidade serão submetidas para comparação, assim como foi feito para motores e baterias individualmente.

Serão utilizados 7 critérios: Peso, Controle, Custo, Manutenção (Facilidade), Manobrabilidade (Handling), Complexidade de Montagem e Conforto.

Os pesos para cada um deles é mostrado na tabela 4.1-5:

Tabela 5: Critérios para matriz

Critérios	Pesos	Pesos normalizados
Peso	9	0,19
Controle	7	0,15
Custo	4	0,09
Manutenção	6	0,13
Manobrabilidade	8	0,17
Complexidade	5	0,11
Conforto	8	0,17
<b>Total</b>	<b>47</b>	<b>1</b>

Com os parâmetros tendo suas notas, basta avaliar as soluções dentro da matriz de decisão para obter a alternativa a ser desenvolvida.

#### 4.1.4 Escolha da solução

Para a escolha da solução, as alternativas serão avaliadas comparativamente de acordo com os critérios e pesos definidos na seção anterior.

Da mesma forma utilizada na seleção de motor e baterias, as notas foram colocadas na planilha, trazendo o seguinte resultado:

Tabela 6: Matriz de alternativas

Critérios	Alternativas							
	Solução 1		Solução 2		Solução 3		Solução 4	
	Nota	Nota ponderada	Nota	Nota ponderada	Nota	Nota ponderada	Nota	Nota ponderada
Peso	3	0,574468085	4	0,765957447	6	1,14893617	5	0,957446809
Controle	7	1,042553191	8	1,191489362	8	1,191489362	5	0,744680851
Custo	5	0,425531915	6	0,510638298	7	0,595744681	4	0,340425532
Manutenção	5	0,638297872	6	0,765957447	6	0,765957447	5	0,638297872
Manobrabilidade	5	0,85106383	5	0,85106383	5	0,85106383	6	1,021276596
Complexidade	3	0,319148936	4	0,425531915	5	0,531914894	6	0,638297872
Conforto	3	0,510638298	4	0,680851064	5	0,85106383	5	0,85106383
<b>Total</b>		<b>4,361702128</b>		<b>5,191489362</b>		<b>5,936170213</b>		<b>5,191489362</b>

Critérios	Alternativas							
	Solução 5		Solução 6		Solução 7		Solução 8	
	Nota	Nota ponderada	Nota	Nota ponderada	Nota	Nota ponderada	Nota	Nota ponderada
Peso	8	1,531914894	9	1,723404255	8	1,531914894	9	1,723404255
Controle	5	0,744680851	5	0,744680851	5	0,744680851	5	0,744680851
Custo	3	0,255319149	2	0,170212766	3	0,255319149	2	0,170212766
Manutenção	7	0,893617021	8	1,021276596	7	0,893617021	8	1,021276596
Manobrabilidade	6	1,021276596	6	1,021276596	8	1,361702128	8	1,361702128
Complexidade	7	0,744680851	8	0,85106383	7	0,744680851	8	0,85106383
Conforto	7	1,191489362	7	1,191489362	7	1,191489362	7	1,191489362
Total		6,382978723		6,723404255		6,723404255		7,063829787

O projeto a ser desenvolvido então, será o da solução 8: Motor in-wheel, bateria de íon-lítio, na configuração F, com tração traseira.

## 4.2. Detalhamento da Solução

### 4.2.1. Potência

Inicialmente, a potência necessária para movimentar o veículo será calculada, de acordo com as definições de projeto dadas na seção 3.1. É possível que os valores sejam corrigidos à medida que mais componentes são definidos.

Tendo a carga do veículo e sua velocidade máxima desejada, é possível calcular a potência máxima necessária para movê-lo.

$$P_{\text{máx}} = F_{\text{tot}} \times V_{\text{máx}} \quad (4.1)$$

Com  $P_{\text{máx}}$  sendo a potência máxima,  $F_{\text{tot}}$  a força total agindo no veículo na velocidade máxima,  $V_{\text{máx}}$ . Além disso:

$$F_{\text{tot}} = F_{R0} + F_{Ac} + F_G \quad (4.2)$$

$F_{R0}$  é a resistência ao rolamento,  $F_{Ac}$  é a força de arrasto aerodinâmico e  $F_G$  é a projeção da força gravitacional paralelamente ao solo, em caso de rampa.

Cálculo de  $F_{R0}$ :

Tem-se que  $F_{R0} = f \cdot m \cdot g$ , onde  $f$  é o coeficiente de resistência ao rolamento e depende da velocidade do veículo. Para  $V_{\text{máx}} = 120$  km/h,  $f$  vale aproximadamente 0,015.

Cálculo de  $F_{Ac}$ :

A força de arrasto aerodinâmico é calculada pela fórmula:

$$F_{Ac} = c_d \cdot A \cdot \rho \cdot \frac{V^2}{2} \quad (4.3)$$

Onde:

$c_d$  = coeficiente de arrasto aerodinâmico (varia entre 0,25 e 0,4 para veículos de passeio)

$A$  = área frontal do veículo

$\rho$  = densidade do ar (adotada como valendo 1,252 kg/m<sup>3</sup>)

$V$  = velocidade do ar

Cálculo de  $F_G$ :

$$F_G = m \cdot g \cdot \text{sen} \alpha \quad (4.4)$$

Para baixas inclinações, o seno do ângulo é muito baixo e para inclinações muito elevadas não haverá necessidade de utilizar toda a potência do motor, mas sim o torque. Por esse motivo,  $F_G$  será desconsiderada para esse cálculo da potência.

Dessa forma:

$$P_{\text{máx}} = (F_{R0} + F_{Ac}) \cdot V_{\text{máx}} = (169,05 + 712) \cdot 33,33 = 29,4 \text{ kW} = 40 \text{ CV}$$

Portanto, será necessário que os motores que forneçam, conjuntamente, pelo menos 29,4 kW de potência.

### 4.2.2. Torque

O torque máximo necessário pode ser calculado através da equação:

$$(M + M_T) \cdot a_x = \frac{T_{\text{máx}} \cdot N_{tf} \cdot \eta_{tf}}{r} - F_{R0} - F_{Ac} - F_G \quad (4.5)$$

Onde  $M_r$  é a massa equivalente dos componentes rotativos da transmissão (não existente na solução escolhida),  $N_{tf}$  é a relação final de transmissão,  $\eta_{tf}$  seu rendimento e  $r$  o raio da roda.

Para os motores 'in-wheel', que serão utilizados nesse projeto, pode-se considerar relação de transmissão e rendimentos unitários, uma vez que o torque é passado direto do motor para a roda.

O raio do conjunto roda/pneu será de 286,75 mm – roda aro 15 com pneu de perfil 175/55 – e a aceleração  $a_x$ , para esse cálculo de torque máximo, será 2,5 m/s<sup>2</sup>, conforme requisitos de projeto (aceleração máxima).

Assim, rearranjando a equação para o cálculo de  $T_{\text{máx}}$ , tem-se:

$$T_{\text{máx}} = (M \cdot a_x + F_{\text{tot}}) \cdot r \quad (4.6)$$

Para esse cálculo do torque máximo, será considerada apenas a força de resistência ao rolamento, uma vez que para baixas velocidades a força de arrasto aerodinâmico pode ser desprezada e, em uma pista plana, a força gravitacional é nula. Assim, o torque máximo necessário para desenvolver essa aceleração vale  $T_{\text{máx}} = 683$  Nm. Ou seja, cada um dos motores 'in-wheel' deve desenvolver pelo menos 341,5 Nm.

Dessa forma, define-se que cada motor deve ter potência máxima de 15kW e torque máximo de 350Nm. Pelas características dos motores elétricos, apresentadas na Figura 1, é possível obter a curva de torque e potência esperada para os motores, apresentada pela Figura 3. O ponto em que o torque deixa de ser constante e em que a potência máxima é atingida e se torna invariante, conhecido como Velocidade de Base, neste caso, se dá a 425 rotações por minuto, ou aproximadamente 46 km/h, para o raio da roda escolhido.

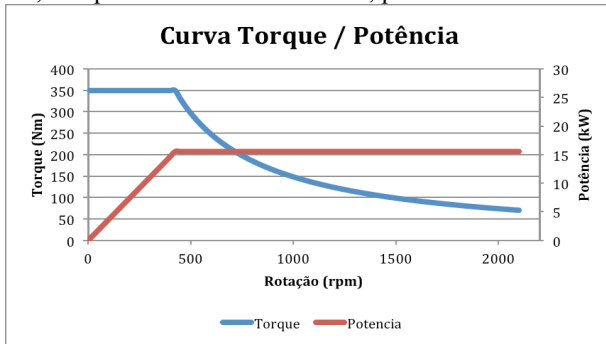


Figura 3. Curva Torque / Potência

É possível também obter as curvas de forças resistivas pela velocidade, incluindo a variação de inclinação das ruas, comparando à força trativa dada pelos dois motores, como mostra a Figura 4. Dela, vê-se que a máxima inclinação vencida pelo veículo é ligeiramente superior a 11°. Por esse método, mais especificamente, tira-se que essa inclinação máxima é de 11,64°. A cidade de São Paulo, por exemplo, tem rampas de maiores inclinações. Dessa forma, esse tipo de caminho deve ser evitado pelos motoristas desse veículo.

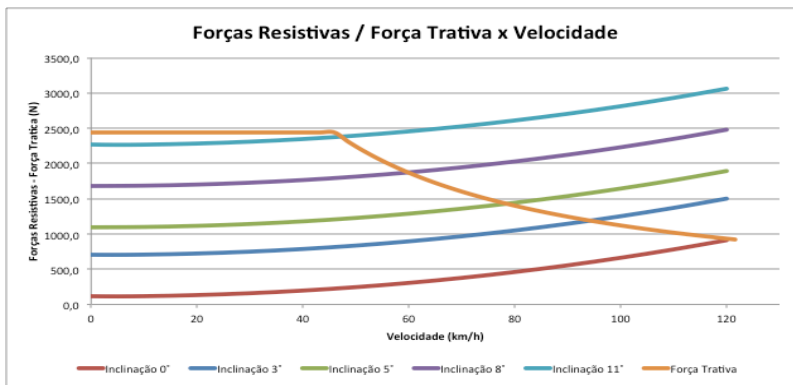


Figura 4 - Força Trativa e Forças Resistivas x Velocidade

#### 4.2.3. Frenagem

Pelas especificações apresentadas na seção 3.1, o veículo não deve exceder 2800 mm de comprimento por 1600 mm de largura por 1600 mm de altura. As medidas adotadas para o projeto serão as máximas em largura e altura e o comprimento será 2700 mm, com o entre-eixos (L) igual a 1900 mm.

Como não há motor dianteiro, mas sim motores nas rodas traseiras, e é possível e recomendável alocar as baterias próximas ao solo e mais para a parte posterior do veículo, pode-se obter um centro de gravidade (C.G.) baixo e mais próximo do eixo traseiro. Assim, a altura considerada do C.G. será  $h = 700$  mm e  $L_a = 1050$  mm é a distância para o eixo dianteiro.

A força máxima de frenagem possível é dada pela equação 4.7, onde  $\mu_0$  é o coeficiente de atrito entre o pneu e o pavimento e  $W$  é a força normal atuando sobre o pneu.

$$F_{\text{braz}} = \mu_0 W \quad (4.7)$$

O veículo é desacelerado tanto na dianteira quanto na traseira e, portanto, agem sobre ele forças de frenagem em cada eixo, causando uma desaceleração  $j$  que pode ser calculada segundo a equação 4.8:

$$j = \frac{F_{bf} + F_{br}}{M} \quad (4.8)$$

Como já foi dito, a frenagem máxima depende da adesão entre pneu e pavimento e é proporcional à força normal atuando no pneu. Entretanto, na frenagem ocorre uma transferência de carga entre o eixo traseiro e o dianteiro, causando uma diferença nessa força para cada um deles, como pode ser visto pelas equações 4.9 e 4.10.

$$W_f = \frac{Mg}{L} \left( L_b + h \frac{j}{g} \right) \quad (4.9)$$

$$W_r = \frac{Mg}{L} \left( L_a - h \frac{j}{g} \right) \quad (4.10)$$



As forças de frenagem devem ser proporcionais a suas respectivas cargas normais. Logo:

$$\frac{F_{bf}}{F_{br}} = \frac{W_f}{W_r} = \frac{L_b + h \frac{j}{g}}{L_a - h \frac{j}{g}} \quad (4.11)$$

Da equação 4.11 é possível obter a curva de distribuição ideal das forças de frenagem entre os eixos dianteiro e traseiro, fazendo  $j/g$  variar entre 0,1 e 0,9. Nesse caso,  $j$  é a máxima desaceleração que se pode obter para um dado coeficiente  $\mu_0$ .

Apesar da curva ideal, no desenvolvimento do sistema de freios, o mais comum é utilizar uma relação linear para as forças de frenagem, através do fator  $\beta$ , expresso pela equação 4.12:

$$\beta = \frac{F_{bf}}{F_b} = \frac{F_{bf}}{F_{bf} + F_{br}} \quad (4.12)$$

Manipulando as equações 4.11 e 4.12 e substituindo  $j/g$  por  $\mu_0$  (conforme equação 4.7 e 4.8), é possível obter a equação 4.13:

$$\beta = \frac{L_b + \mu_0 h}{L} \quad (4.13)$$

Assim, para um dado coeficiente  $\mu_0$ , é possível obter as curvas de distribuição de frenagem reais, como mostra a Figura 5.

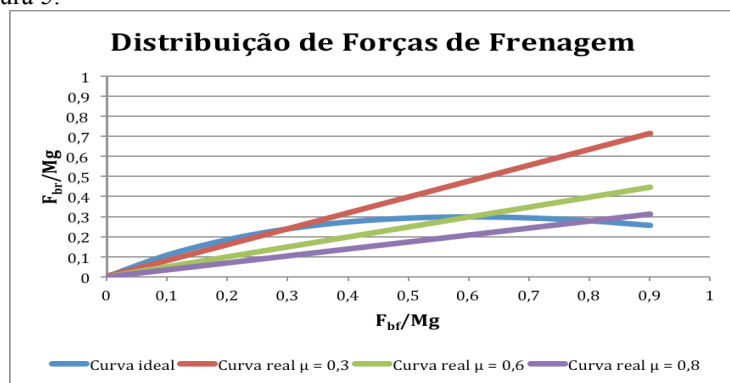


Figura 5 - Distribuição Real das Forças de Frenagem

A frenagem regenerativa adiciona um pouco de complexidade ao sistema de controle dos freios, pois é necessário que se decida como distribuir a força total de frenagem entre a regenerativa e a mecânica, ou convencional, além da divisão entre os eixos.

Para esse projeto, será utilizada a frenagem em série para sensação ótima. O objetivo deste método é minimizar a distância de parada e otimizar a sensação do motorista ao frear, primando pela segurança. Nessa situação, para desacelerações menores que 0,2g, apenas os freios regenerativos (localizados no eixo traseiro, trativo) entram em ação. Ou seja, os motores 'in-wheel' funcionam como freios, através de seu torque, recarregando a bateria. Para desacelerações maiores que 0,2g, as forças nos eixos dianteiro e traseiro seguem distribuição ideal.

Nas rodas traseiras, a força dos freios é dividida em regenerativa e mecânica. Quando a força necessária para a frenagem for menor do que a produzida pelo motor, apenas a regenerativa será aplicada. Quando for maior, o motor aplicará sua força máxima e a força restante será aplicada pelo sistema de freios mecânico.

Na condição de projeto, os motores traseiros conseguem aplicar uma força máxima de 2441N, combinados. A partir daí, os freios mecânicos são acionados.

#### 4.2.4. Bateria

O projeto da bateria considera apenas a energia e potência necessárias para alimentar o sistema propulsor do veículo. Cargas relacionadas aos sistemas de entretenimento e conforto, como ar-condicionado, computador de bordo, rádio ou até mesmo a potência dos faróis não serão considerados nesse cálculo. Para esses componentes, será utilizado um sistema elétrico auxiliar, ligado a uma bateria de 12V com alternador, como já acontece com os veículos convencionais.

Considerando a tabela 2.1-1, para a bateria de lítio-íon, temos que a densidade de potência varia entre 300 a 600 W/kg e a eficiência energética superior a 95%. Considerando a pior condição de densidade e a menor eficiência como 95%, a bateria deverá ter aproximadamente 103 kg de massa.

Outro requisito que depende da bateria é a autonomia. Foi definido que o veículo deverá alcançar 120 km em apenas uma carga, para uma velocidade média de 60 km/h, ou seja, deve funcionar durante duas horas. Refazendo os cálculos de potência, agora para a nova velocidade, obtém-se  $P = 5.784$  W. A energia gasta durante o período de autonomia do veículo é dada pela simples expressão  $E = P \cdot t$ . Assim,  $E = 2 \cdot 5784 = 11.568$  Wh.

Ainda segundo tabela 2.1-1, a bateria de lítio-íon tem densidade de energia variando entre 90 e 140 W/kg. Ou seja, para 103kg de bateria, tem-se entre 9.270 e 14.420 W de energia disponível, valores que permitem a autonomia

requisitada. Além disso, segundo [11], as baterias de lítio-íon tem densidade volumétrica de energia de 200 Wh/l. Nessas condições, para a energia necessária de 11.568 Wh, a bateria deve ter um volume de 57,84 l.

Outro ponto importante na definição da bateria é a voltagem de operação. Sabe-se que a potência elétrica é o produto da tensão e da corrente do sistema. Para diminuição das perdas nos cabos e por segurança, é melhor trabalhar com correntes mais baixas e, conseqüentemente, tensões mais elevadas. Utilizando um banco de baterias com tensão em 400 V, o veículo trabalhará em sua potência máxima (30 kW) com uma corrente de 75 A.

O tempo de recarga das baterias depende do local onde o veículo é recarregado. As tomadas residenciais convencionais, em geral, suportam até 15 A. Para uma tensão de 110 V, a potência disponível para carregar o veículo é de 1650W. Considerando uma bateria 100% carregada com 12000 Wh, o tempo de recarga seria de aproximadamente 7h15m. Para uma tensão de 220 V, esse tempo se reduz pela metade, para aproximadamente 3h40m.

## 5. Conclusões e comentários

A proposta desse trabalho foi de projetar um veículo elétrico urbano de 2 lugares utilizando um sistema de propulsão elétrico. Depois da análise das alternativas existentes, em termos de configuração de powertrain, tipos de motores e baterias, foi selecionada uma alternativa utilizando motores 'in-wheel' nas rodas traseiras, alimentados por um conjunto de baterias de lítio-íon.

Passou-se, então, ao detalhamento do projeto, avaliando as condições de potência e torque para o motor, energia para a bateria e análise das forças de frenagem, com foco na possibilidade de regeneração de energia, de modo a buscar um aumento da autonomia do veículo, além de ir contra o desperdício de energia útil. Foi possível obter curvas de torque e potência para o motor, comparadas aos diagramas de forças resistivas para o veículo, de modo que os requisitos de velocidade máxima e aceleração foram cumpridos.

Da mesma forma, os requisitos de autonomia, capacidade e dimensões foram obedecidos, através do dimensionamento da bateria e da estrutura básica do veículo.

## 6. Referências

- BRANT, Bob. Build your own electric vehicle. TAB Books. 1994. ISBN 0-8306-4232-3.
- OLIVEIRA, Eude Cezar de. Modelagem e simulação de veículos elétricos híbridos / E.C. Oliveira. – ed.rev. – São Paulo, 2005.
- BASTOS, Samuel Trovati. Projeto de um veículo elétrico híbrido de passeio / S.T. Bastos – São Paulo, 2005.
- BOSCH, Robert. Manual de Tecnologia Automotiva/Robert Bosch; tradução Helga Madjderey, Gunter W. Prokesch, Euryale de Jesus Zerbini, Sueli Pfeferman – São Paulo: Edgard Blücher, 2005.
- BRAES, Hans-Hermann; SEIFFERT, Ulrich. Handbook of Automotive Engineering. – SAE International Catálogo Smart Fortwo. Disponível em: <[http://price.smart.com.br/pdf/catalogo\\_SMART.pdf](http://price.smart.com.br/pdf/catalogo_SMART.pdf)>. Acesso em: 20 nov. 2010
- Plug-in America. Disponível em: <<http://www.pluginamerica.org>>. Acesso em: 20 nov.2010
- XUE, X.D.; CHENG, W.E.; CHEUNG, N.C. Selection of Electric Motor Drives for Electric Vehicles. 2008 - Department of Electrical Engineering, the Hong Kong Polytechnic University.
- News and Information about Electric Vehicles – US Department of Energy. Disponível em: <<http://www.fueleconomy.gov/feg/evnews.shtml>>. Acesso em: 16 mar.2011
- KAMINSKI, Paulo Carlos. Desenvolvendo produtos com planejamento, criatividade e qualidade. São Paulo: LTC, 2000. 130 p.
- EHSANI, Mehrdad. Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: fundamentals, theory, and design. Boca Raton: CRC Press, 2004. 424 p.
- HUSAIN, Iqbal. Electric and hybrid vehicles: design fundamentals. Akron: CRC Press, 2003. 270 p.

## 7. Direitos autorais

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

## PROJECT OF AN URBAN TWO-SEATER PASSENGER VEHICLE WITH ELECTRIC DRIVE

**Gustavo Henrique Saab Araujo**

[gustavo.saab@usp.br](mailto:gustavo.saab@usp.br)

**Abstract.** The aim of this project is to explore one low-emission automobile propulsion alternative: the electric propulsion. A model of electric vehicle will be developed, from its settings selection, looking for the best attendance of requirements, such as autonomy, acceleration, speed, maximum load. Thus, it will be chosen: battery, type of electric motor and powertrain configuration. The project also will include the assessment of resistive forces acting on the vehicle, regenerative braking conditions. So, the aim of this work is to design an urban two-seater passenger vehicle with electric drive, through the determination of its main components within an established configuration after research and decision

**Keywords.** *Electric Vehicles, Vehicle Dynamics, Compact Vehicle*