

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

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

Gustavo Henrique Saab Araujo

SÃO PAULO
2011

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

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

Trabalho de Formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Graduação em Engenharia

Gustavo Henrique Saab Araujo

Orientador: Ronaldo de Breyne Salvagni

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica

SÃO PAULO
2011

FICHA CATALOGRÁFICA

Araujo, Gustavo Henrique Saab

**Projeto de um veículo automotivo urbano de 2 lugares com
propulsão elétrica / G.H.S. Araujo. – São Paulo, 2011.
48 p.**

**Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.**

**1.Veículos especiais 2.Projeto automotivo 3.Dinâmica vei-
cular 4.Motores elétricos I.Universidade de São Paulo. Escola
Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.**

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, a Deus, na pessoa do Senhor Jesus Cristo, que me deu a vida e o ânimo pra continuar em frente todos os dias. A Ele toda a glória!

Aos meus pais e minha irmã, pelo suporte, apoio e amor ao longo de todos os meus anos, especialmente durante esses últimos aqui na Poli. Sem vocês, eu não teria conseguido nem chegar aqui.

Aos amigos Sylvio, Carioca, Piero, Renan, Bruninho, Ivan e Felipe e às amigas Fê Pacheco e Paulinha. Obrigado pela força e pela amizade. Vocês fizeram parte desse tempo.

Ao Raphael e ao Guth, pelo apoio no início desse projeto. Só nós sabemos a correria que foi.

Finalmente, a todos os colegas durante esses anos na Poli. Seria praticamente impossível esse tempo sem vocês aqui.

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.

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.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS

LISTA DE FIGURAS

1. INTRODUÇÃO	10
1.1. Contexto	10
1.2. Objetivos e Metodologia	11
2. VEÍCULOS ELÉTRICOS	12
2.1. História	12
2.2. Principais componentes	14
2.2.1. Sistema de Armazenamento de Energia:	14
2.2.2. Motor Elétrico	16
2.2.3. Inversores	18
2.3. Configurações de Powertrain	19
2.4. Veículos Elétricos Existentes	21
3. ESTUDO DE VIABILIDADE	24
3.1. Requisitos de Projeto	24
3.1.1. Carga e Capacidade	24
3.1.2. Dimensões	24
3.1.3. Velocidade Máxima	25
3.1.4. Aceleração	25
3.1.5. Autonomia	25
3.1.6. Normas e Leis	25
3.1.7. Mercado e Preços	26
3.2. Síntese de Soluções	27
4. PROJETO BÁSICO	30
4.1. Seleção da melhor alternativa	30
4.1.1. Seleção do motor	30
4.1.2. Seleção da Bateria	31
4.1.3. Definição dos Critérios da Matriz	33
4.1.4. Escolha da solução	33
4.2. Detalhamento da Solução	34

4.2.1.	Potência	34
4.2.2.	Torque	36
4.2.3.	Frenagem	39
4.2.4.	Bateria	44
5.	CONCLUSÃO	47
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.2-1: Comparação entre baterias	14
Tabela 4.1-1: Critérios para os motores	31
Tabela 4.1-2: Escolha do motor	31
Tabela 4.1-3: Critérios para as baterias	32
Tabela 4.1-4: Escolha da bateria	32
Tabela 4.1-5: Critérios para a matriz	33
Tabela 4.1-6: Matriz de Alternativas	34

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ford Detroit Electric, hoje no museu Henry Ford	13
Figura 2 - Carregador Rápido Ecototality	15
Figura 3 - Características típicas de um motor elétrico	16
Figura 4 - Motor 'Wheel hub' - Siemens VDO.....	17
Figura 5 - Configurações possíveis: Powertrain VE	20
Figura 6 - Tesla Roadster	22
Figura 7 - Mitsubishi i Miev	23
Figura 8 - Nissan Leaf.....	23
Figura 9 - Curva Torque / Potência.....	38
Figura 10 - Força Trativa e Forças Resistivas x Velocidade	39
Figura 11 - Forças atuando na frenagem	40
Figura 12 - Distribuição ideal das Forças de Frenagem.....	42
Figura 13 - Distribuição Real das Forças de Frenagem	43
Figura 14 - Forças na Frenagem Regenerativa.....	44

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contexto

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. Além do fator ambiental, com relação às emissões, os combustíveis fósseis são fontes não renováveis e, por isso, estão fadados a acabar em algum momento, ainda que distante. Por esse motivo, 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 veículos híbridos (VH) combinam duas ou mais fontes de potência, sendo uma delas, frequentemente um motor de combustão interna (MCI). Dessa forma, ainda existe emissão de poluentes resultantes da combustão, mesmo que em menor quantidade, se comparado aos veículos convencionais. Essa situação não ocorre com os veículos elétricos (VE).

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.

Outra questão relevante, em especial para as grandes cidades, é a questão do trânsito. Metrôpoles como São Paulo, Rio de Janeiro, Belo Horizonte, no Brasil, além de Nova Iorque, Cidade do México e outras sofrem com a quantidade de carros nas ruas, principalmente no horário de pico. Muitos desses veículos são ocupados apenas por uma pessoa, sendo desnecessário que sejam de grande porte e/ou com muitos lugares.

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.

1.2. 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.

São veículos silenciosos e não produzem emissões, além de possuírem uma partida suave e vibrarem pouco. Muitos dos veículos mais novos não necessitam de embreagens e caixa de transmissão, uma vez que a velocidade do motor é controlada diretamente pela potência requerida através do acelerador/potenciômetro. A eficiência dos VE's pode superar os 70% em muitos casos.

Basicamente, um VE necessita de uma bateria, um motor, um controlador que ajuste o fluxo de eletricidade para regular a velocidade e um sistema que transmita o movimento para os eixos de tração. Existe também a alternativa da utilização de motores elétricos individuais em duas ou quatro rodas, possibilitando rendimentos de mais de 90% da energia produzida.

2.1. História

Apesar do grande desenvolvimento dos veículos elétricos nos últimos anos, a realidade é que a tecnologia básica envolvida tem pouco de nova. Os VE's existem desde antes dos movidos por MCI's, criados por volta de 1832 e tendo seu grande momento nos anos de 1910.

O primeiro registro de um veículo elétrico construído é de 1832, com Robert Anderson, de Aberdeen na Escócia. Entretanto, as tecnologias para baterias eram extremamente limitadas até por volta do ano de 1859, quando Gaston Platé desenvolveu a primeira bateria de chumbo, primitiva.

Assim, por volta de 1881, o francês Gustave Trouvé construiu um triciclo que chegava a 12 km/h utilizando dois motores modificados da Siemens e a bateria de Platé. Alguns outros triciclos surgiram na Europa na mesma época e em 1886, havia 13 veículos elétricos funcionando como táxis em

Nova Iorque, com autonomia próxima de 75 km. O desenvolvimento foi aumentando e em 1900, foram produzidos 1575 veículos elétricos nos Estados Unidos, contra 1681 a vapor e 936 a gasolina.



Figura 1 - Ford Detroit Electric, hoje no museu Henry Ford

A partir da década de 20, entretanto, com a maior utilização dos motores de combustão interna, os VE's entraram numa fase de declínio, sendo pouco utilizados para veículos urbanos de passeio e sendo substituídos pelos carros que são maioria atualmente.

Contudo, alguns fatores ao longo dos anos foram reafirmando a necessidade da utilização de soluções como o carro elétrico, uma vez que os veículos movidos por MCI's necessitam de combustível, em sua grande maioria dos derivados de petróleo, fazendo com que houvesse dependência de fatores como disponibilidade, preço, por exemplo.

Na década de 40, ocorreu a Segunda Guerra Mundial, na de 50, os problemas americanos com o Irã, na de 60 a Guerra dos 6 dias. Todos esses acontecimentos criaram problemas de fornecimento e causaram grande aumento dos preços dos barris de petróleo.

Além disso, o agravamento dos problemas ambientais, do efeito estufa, fez com que os olhos fossem voltados para alternativas sustentáveis e renováveis e os carros elétricos voltaram à pauta e aos estudos, continuando seu desenvolvimento e grande aplicação até os dias de hoje.

2.2. Principais componentes

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

2.2.1. Sistema 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 2.2-1 mostra uma comparação entre esses tipos de bateria existentes.

Tabela 2.2-1: 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

Um veículo, entretanto, tem momentos de arrancada, subida e outras solicitações de carga e potência rápidas, gerando picos. Para esses

momentos, a bateria não responde na maneira mais eficiente. Por esse motivo, em geral utiliza-se uma associação em paralelo de um ultracapacitor, que tem por função esse fornecimento de potência para aceleração rápida. Eles têm uma potência específica alta, em contraposição a uma energia específica baixa quando comparados às baterias. Os ultracapacitores, além de manterem uma baixa corrente na aceleração, fornecendo potência rapidamente, também auxiliam na recarga da bateria nas frenagens, diminuindo o pico de corrente e auxiliando, inclusive na vida útil.

As baterias, após utilização, perdem carga e precisam ser recarregadas. Os veículos elétricos devem ser equipados por um sistema 'plug-in', no qual há a conexão do carro com a rede elétrica. Entretanto, as taxas de recarga são baixas, tornando o processo de recarga demorado. O carregador consiste, basicamente, em um retificador de tensão, que recebe a tensão alternada da rede e a transforma em tensão contínua para carregar a bateria. Muitos dos carregadores já estão acoplados nos veículos, mas existem também os carregadores rápidos, que são externos e podem carregar até 80% da bateria em poucos minutos.

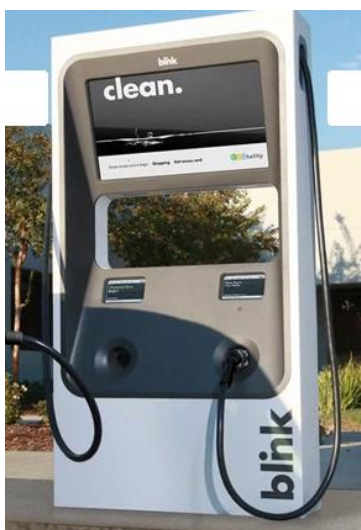


Figura 2 - Carregador Rápido Ecototality

2.2.2. Motor Elétrico

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

Os motores de combustão geralmente não são capazes de fornecer torque suficiente em baixas velocidades. Assim, um motor maior é necessário para a aceleração do zero. O motor maior significa mais peso a bordo do que o necessário para a velocidade de cruzeiro constante. Isso se traduz em uma redução de eficiência. Cerca de 10% da potência do motor é necessária para manter uma velocidade constante de 50 km/h, enquanto os 90% restantes são usados apenas para acelerar ou para velocidades muito altas.

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.

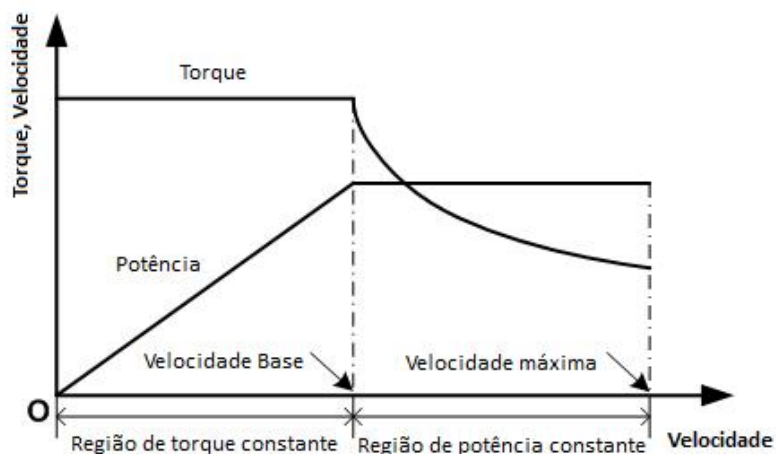


Figura 3 - Características típicas de um motor elétrico

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. A Figura 4 ilustra o sistema da Siemens, que já inclui suspensão ativa (4), esterçamento (5) e freios eletrônicos (3).

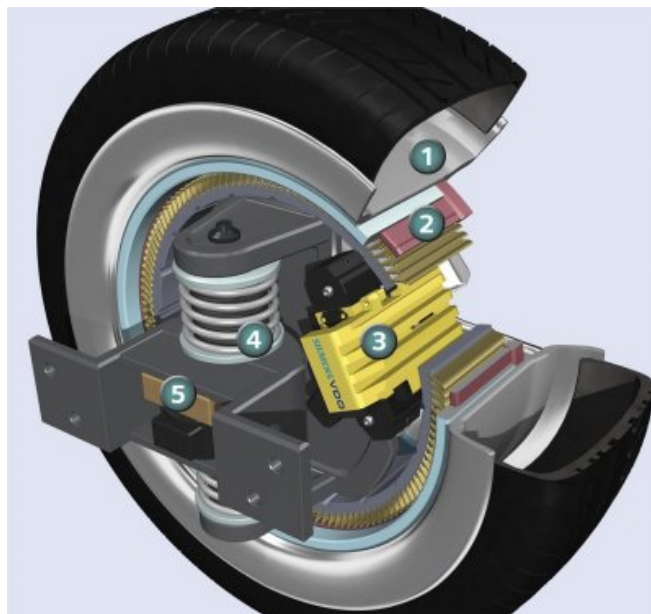


Figura 4 - Motor 'Wheel hub' - Siemens VDO

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

Como pontos positivos, podem ser destacados:

- Proporciona controle individual de cada uma das rodas, podendo melhorar a manobrabilidade e o desempenho;
- Elimina a necessidade de diferencial e de eixo motor;
- Possibilita melhor remanejamento do design do carro, privilegiando espaço para o condutor e passageiros;

Por outro lado, os motores *'in-wheel'* adicionam massa às rodas (massa não suspensa), prejudicando o conforto e o desempenho em estrada. Esse problema já tem sido diminuído por tecnologias, como faz a Bridgestone com seus motores, utilizados para absorver as vibrações, como amortecedores.

2.2.3. Inversores

Os inversores, nos VE, têm a função de suprir o motor com a energia vinda da bateria, nas condições ideais para seu funcionamento, modulando o fornecimento de acordo com os desejos do motorista. Além disso, são os responsáveis por variar a tensão entre os diversos barramentos existentes no sistema elétrico do veículo. Fazem a interligação entre motor, bateria, sistemas elétricos adicionais, regeneração de energia na frenagem.

Outra função é a conversão de corrente contínua em corrente alternada, dependendo do sistema. Em casos de motores AC, a corrente fornecida pela bateria é contínua e o inversor a transforma em corrente alternada, aumentando ou abaixando a tensão, conforme a necessidade.

Existem, basicamente, 4 tipos de inversores:

- Retificador – Transforma corrente alternada em corrente contínua. É utilizado nos sistemas de carregamento da rede e no caminho motor – bateria.
- Inversor – Transforma corrente contínua em corrente alternada. É intermediário no caminho bateria – motor.
- Conversor / Chopper – Transforma corrente contínua em corrente contínua. É utilizado para aumentar ou baixar a tensão nos barramentos do sistema elétrico. Quando utilizado como elevador de tensão, é conhecido como ‘boost’. Quando abaixador, ‘buck’.
- Cicloconversor – Transforma corrente alternada em corrente alternada, como um transformador.

Na realidade, o inversor e o retificador são o mesmo equipamento. A única diferença é o sentido da transformação.

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 figura 2.5:

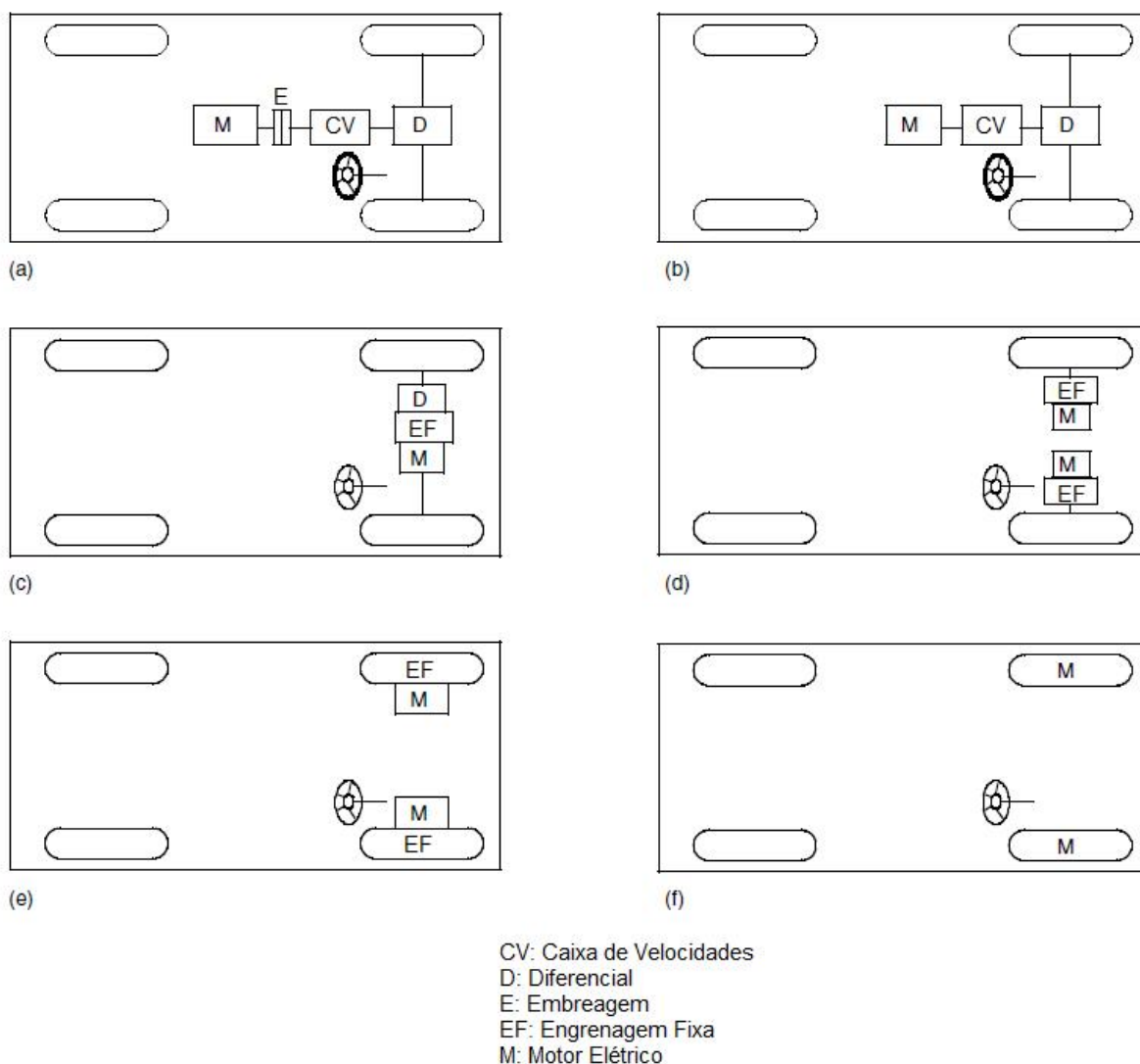


Figura 5 - Configurações possíveis: Powertrain VE

- (a) A configuração (a) mostra a primeira alternativa, na qual a propulsão elétrica substitui o motor a combustão de um veículo convencional. É formada por um motor elétrico, embreagem, uma caixa de troca de velocidades e um diferencial. É possível utilizar uma transmissão automática, removendo embreagem e caixa de velocidades manual.
- (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. Além de diminuir o tamanho e o peso da transmissão mecânica, essa

configuração simplifica a dirigibilidade, pois não há necessidade da troca de marchas.

- (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. Dessa forma, o controle de velocidade do motor será o da roda e, conseqüentemente, o da velocidade do veículo. Por outro lado, esse arranjo exige um grande torque do motor para acelerar e colocar o carro em movimento.

Além disso, embora a Figura 5 ilustre uma situação com a tração nas rodas dianteiras, é perfeitamente possível utilizar qualquer uma dessas configurações para tração traseira.

2.4. Veículos Elétricos Existentes

Principalmente desde 1997, quando a Toyota lançou o híbrido Prius, as montadoras apressaram seu desenvolvimento de veículos nesse segmento. Ainda hoje, a maior parte deles é híbrida – muitos derivados da hibridização de veículos já existentes no mercado, como o Honda CR-Z, o Honda Insight, o Ford Escape, o Ford Fusion, o Honda Civic, o Chevrolet Volt (considerado pela General Motors como um veículo elétrico de autonomia estendida, por não ter o MCI utilizado para tração das rodas). Entretanto, existem também muitos veículos puramente elétricos, tais como o Nissan Leaf, eleito em

2010 o carro do ano na Europa, o Mitsubishi i MiEV, o Th!nk City, o Smart Fortwo EV, Tesla Roadster EV, o Renault Zoe, o Renault Twizy e muitos outros projetos que estão em fase final de implantação, sem contar os conceitos.

Além dos veículos, para a maior utilização desse tipo de tecnologia é necessária uma infra-estrutura de reabastecimentos, troca de baterias e manutenção ainda em desenvolvimento em grande parte dos países. Mesmo na Europa, onde os projetos nessa área já estão em fases avançadas, com muitos veículos rodando, a infra-estrutura ainda não está completa.

No Brasil, atualmente não há possibilidade da utilização dessa classe de carros de modo bastante abrangente, pois não há investimentos nessa área, nem incentivos governamentais ou legislação própria. Para os próximos anos são esperados maiores avanços nesse aspecto, uma vez que as montadoras têm voltado seus olhos para o mercado brasileiro. A Nissan, por exemplo, tem feito parcerias com a prefeitura da cidade de São Paulo, para fornecer Leaf's para a frota municipal e investir em infra-estrutura para a recarga dos veículos.



Figura 6 - Tesla Roadster



Figura 7 - Mitsubishi i Miev



Figura 8 - Nissan Leaf

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 autonomias 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/s², 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. O valor de autonomia será considerado para uma velocidade média de 60km/h.

3.1.6. Normas e Leis

Um veículo, para rodar na cidade, deve atender a diversas leis, com relação a ruídos, segurança, emissões, interferência eletromagnética, entre outras, além de normas técnicas como as da ABNT ou SAE, que não tem função legal em primeira instância, mas que condicionam um bom processo de fabricação e funcionamento de sistemas, subsistemas e componentes do

veículo. No Brasil, o órgão regulador é o CONTRAN (Conselho Nacional de Trânsito). São mais de 300 resoluções, mas nem todas serão citadas aqui, uma vez que o escopo do projeto não engloba o detalhamento de alguns subsistemas regulados por essas resoluções. Por exemplo, a resolução nº 367 se refere à necessidade de todos os veículos, a partir de 1º de Janeiro de 2013 para projetos novos, serem equipados com Air-Bags frontais para o motorista e para o passageiro. Para efeito do desenvolvimento deste projeto, os sistemas que não forem especificamente projetados serão assumidos como obedecendo à legislação vigente. No caso, o veículo alvo deste projeto será equipado com air-bags frontais, ainda que não seja dada atenção a esse componente ao longo do trabalho. O veículo se enquadrará em todas as resoluções aplicáveis pela legislação brasileira, por meio do Contran.

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.

Além disso, outro fator gerador de soluções é o tipo de tração (traseira ou dianteira), dessa forma, é conveniente que fiquem claras as diferenças entre elas, de modo que a comparação seja bem fundamentada.

A tração dianteira privilegia o espaço interno, uma vez que todo o conjunto mecânico fica restrito à dianteira do automóvel. Dessa forma, as distâncias são mantidas pequenas, fazendo com que haja pouca perda de energia com os eixos e seu peso. Além disso, há a possibilidade da redução na altura do capô, ajudando na melhoria da aerodinâmica do veículo. Em termos de estabilidade, a configuração com tração dianteira, em geral, produz um comportamento subesterçante em curvas, que é mais facilmente corrigido por um motorista não profissional.

Por outro lado, a tração dianteira faz com que o veículo tenha uma distribuição desigual de peso, já que todo o powertrain se localiza na dianteira. Esses componentes são os de maior massa nos veículos em geral. Desse modo, a estabilidade fica mais limitada. Somado a esse efeito, também ocorre que o fato das rodas dianteiras transmitirem torque limita o seu esterçamento, ou seja, para se fazer uma circunferência em manobras, é necessário um raio de curvatura maior.

A tração traseira também tem suas vantagens e desvantagens. Por exemplo, é necessário um conjunto de transmissão maior que leve o torque até a traseira do veículo, aumentando seu peso. Além disso, nesse caminho, a quantidade de perdas devido à inércia é mais elevada, aumentando o consumo de combustível do carro.

Há também a necessidade da instalação de um eixo cardã e de um 'túnel' que o leve até a traseira do veículo, diminuindo assim o espaço interno, juntamente com o fato de que o motor deve ser instalado longitudinalmente, o que também atrapalha nesse quesito. Ainda, os carros com tração traseira tendem a ter um comportamento sobresterçante (sair de traseira), o que traz certa dificuldade de correção nas curvas, pois é necessário esterçar o veículo na direção contrária à curva e acelerar mais, algo anti-intuitivo em uma situação dessas.

Em contrapartida, ter as rodas traseiras tracionando o veículo melhoram a distribuição de peso, favorecendo a estabilidade e o conforto. Em situações de subida, com carro carregado, esse fator aumenta a aderência das rodas motrizes. Isso também ocorre em situações de aceleração, de modo que é possível transmitir maior potência, melhorando arrancadas.

Dessa forma, tendo claro que a proposta do projeto é um veículo compacto, para uso urbano, fica descartada a opção de tração traseira para as configurações de A a D, estando apenas disponíveis para as configurações com motor in-wheel.

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

Segundo Kaminsky (2000), o projeto básico contempla os primeiros ciclos da espiral de projeto, com o objetivo de estabelecer uma concepção geral para o produto, servindo de base para o projeto executivo mais a frente.

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 àquilo para o qual deve ser projetado. Utiliza-se então uma matriz de decisão, na qual os parâmetros são avaliados por pesos de importância e é dada uma nota para cada alternativa dentro daquele critério. A solução que obtiver a melhor nota ponderada pelos pesos dos parâmetros é a que seguirá aos próximos ciclos da espiral de projeto.

Como foi dito na seção 3.2, antes da avaliação das soluções geradas para o veículo completo, os motores e as baterias serão analisados separadamente, a fim de diminuir a quantidade das alternativas.

4.1.1. Seleção do motor

Para a seleção do motor, os parâmetros analisados serão: eficiência, controle, custo, peso e custo de manutenção. Notas altas significarão melhor eficiência, maior facilidade de controle e menor custo e peso. São critérios bastante objetivos e facilmente avaliados nos motores.

Os pesos dados a cada um deles são mostrados na Tabela 4.1-1:

Tabela 4.1-1: 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
Total	32	1

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

Tabela 4.1-2: 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
Total		3,03125		3,53125		3,4375		4,40625

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. Neste caso, eles serão: densidade de energia, densidade de potência, duração, eficiência energética, custo e toxicidade. Os pesos são apresentados na Tabela 4.1-3.

Tabela 4.1-3: 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
Total	40	1

Da mesma forma feita com os motores, tendo os pesos definidos, as possíveis baterias foram colocadas na matriz:

Tabela 4.1-4: 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
Total		3,425		2,675		3,925		4,2

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
Total		5,2		4,9		4,175

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 4.1-5: 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
Total	47	1

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 4.1-6: 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
Total		4,361702128		5,191489362		5,936170213		5,191489362

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

Tendo a alternativa escolhida, ela passa a ser mais tecnicamente detalhada, de modo que os componentes selecionados atendam diretamente os requisitos do projeto.

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.

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

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

$$F_{\text{tot}} = F_{\text{Ro}} + F_{\text{Ae}} + F_{\text{G}} \quad (4.2)$$

F_{Ro} é a resistência ao rolamento, F_{Ae} 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_{Ro} :

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

Desse modo:

$$F_{\text{Ro}} = f.m.g = 0,015 * 1150 * 9,8 = 169,05 \text{ N}$$

Cálculo de F_{Ae} :

A força de arrasto aerodinâmico é calculada pela fórmula:

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

Onde:

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

A = área frontal do veículo

ρ = densidade do ar (adotada como valendo 1,252 kg/m³)

V = velocidade do ar

Logo:

$$F_{Ae} = c_d A \cdot \rho \cdot \frac{V^2}{2} = 0,4 * (1,6 * 1,6) * 1,252 * \frac{(33,33)^2}{2} = 712 \text{ N}$$

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:

$$P_{\text{máx}} = (F_{Ro} + F_{Ae}) * V_{\text{máx}} = (169,05 + 712) * 33,33 = 29,4 \text{ kW} = 40 \text{ CV}$$

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:

$$(M + M_r) * a_x = \frac{T_{\text{max}} N_{tf} \eta_{tf}}{r} - F_{Ro} - F_{Ae} - F_G \quad (4.5)$$

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, η_{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 $2,5 \text{ m/s}^2$, conforme requisitos de projeto (aceleração máxima).

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

$$T_{\max} = (M * a_x + F_{\text{tot}}) * r = (1150 * 2,5 + 169,05) * 0,28675 = 683 \text{ Nm} \quad (4.6)$$

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 $T_{\max} = 683 \text{ Nm}$. 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 3, é possível obter a curva de torque e potência esperada para os motores, apresentada pela Figura 9. 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.

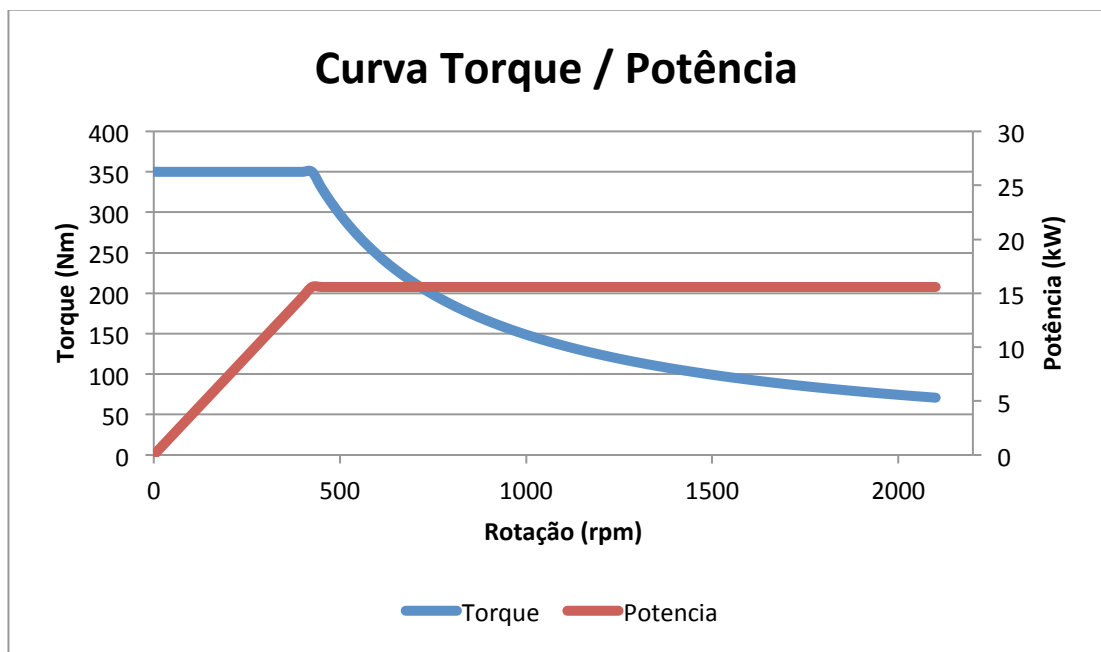


Figura 9 - Curva Torque / Potência

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 10. 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 $11,64^\circ$. 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.

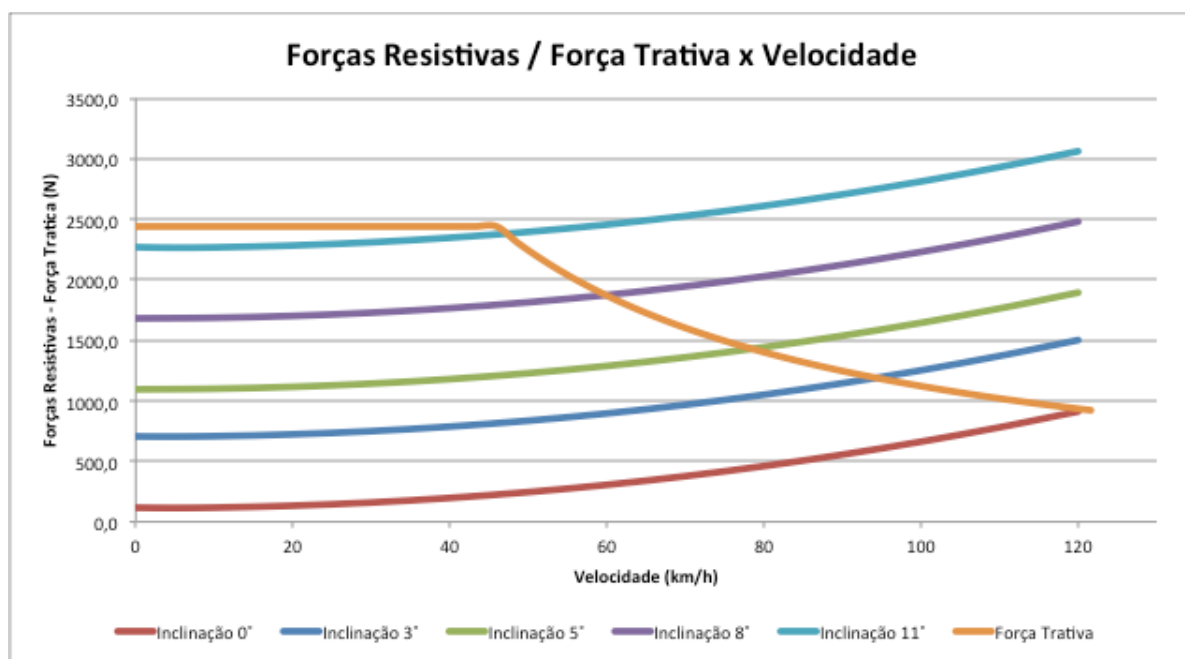


Figura 10 - Força Trativa e Forças Resistivas x Velocidade

4.2.3. Frenagem

Um dos pontos mais importantes para a segurança do veículo é a frenagem. Durante os ciclos urbanos, uma grande quantidade de energia é gasta pelos freios e a vantagem dos veículos movidos por eletricidade é o fato de que é possível reaproveitar parte dessa energia através dos freios regenerativos, recarregando a bateria. Para que eles possam ser projetados, é necessária uma análise do desempenho em frenagem do veículo, desconsiderando inicialmente a condição regenerativa.

Para os cálculos seguintes, será necessário conhecer a distribuição de massa do veículo. Apesar da definição exata e completa de todas as dimensões não fazer parte do escopo desse trabalho, os valores considerados nesse projeto podem ser usados como definitivos ou levemente modificados nos ajustes finos de manufatura e montagem.

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 μ_0 é o coeficiente de atrito entre o pneu e o pavimento e W é a força normal atuando sobre o pneu.

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

O veículo é desacelerado tanto na dianteira quanto na traseira e, portanto, como mostra a Figura 11, agem sobre ele forças de frenagem em cada eixo, causando uma desaceleração j que pode ser calculada segundo a equação 4.8:

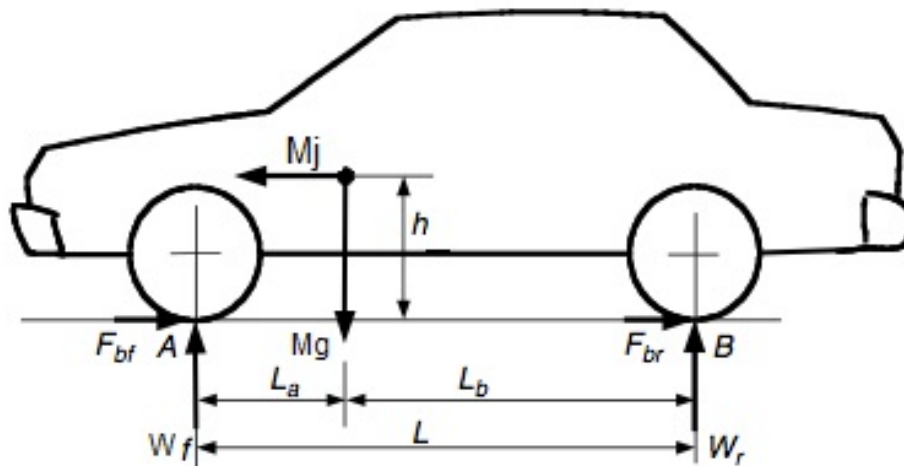


Figura 11 - Forças atuando na frenagem

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

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 μ_0 .

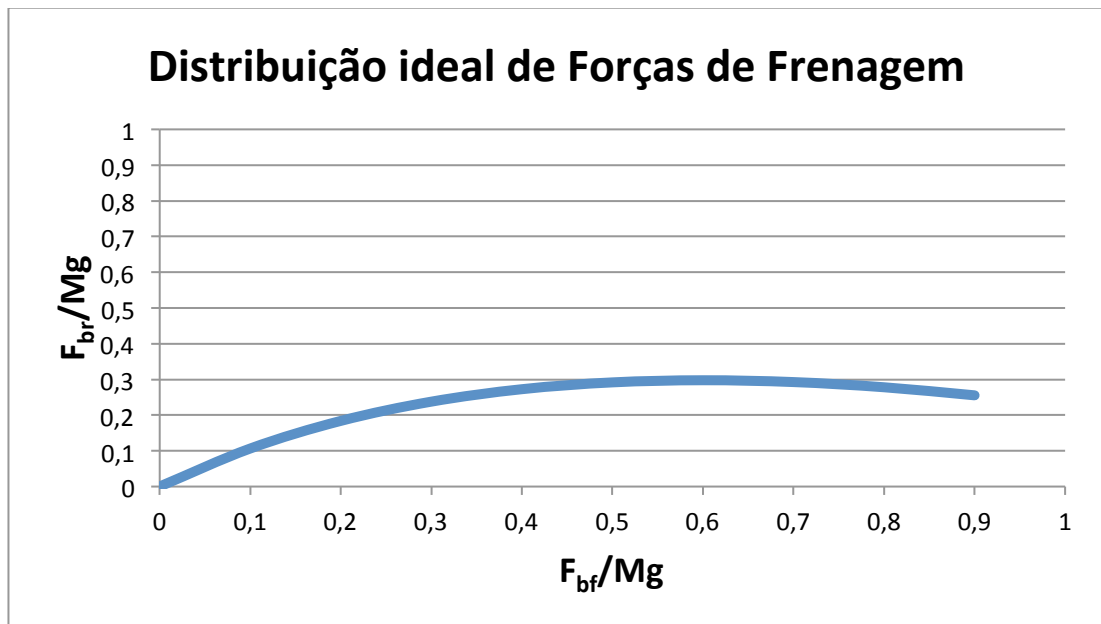


Figura 12 - Distribuição ideal das Forças de Frenagem

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 β , 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 μ_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 μ_0 , é possível obter as curvas de distribuição de frenagem reais, como mostra a Figura 13. No trecho em que a curva β fica abaixo da curva ideal, as rodas dianteiras travam primeiro do que as traseiras, enquanto que no trecho em que ela fica acima, o contrário ocorre. Por motivos de segurança, é melhor que ocorra o travamento das rodas dianteiras primeiro, causando um efeito subesterçante do que o

inverso, pois a situação inversa pode causar uma instabilidade direcional, gerando uma rodagem.

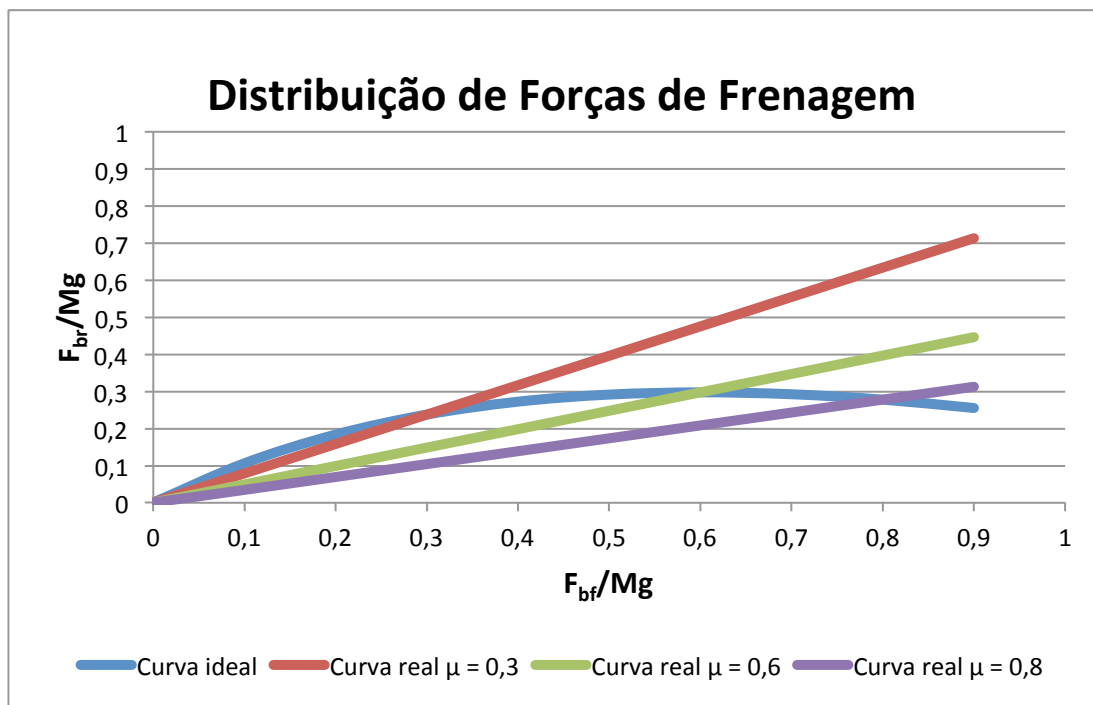


Figura 13 - Distribuição Real das Forças de Frenagem

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. Um exemplo do funcionamento é mostrado na Figura 14:

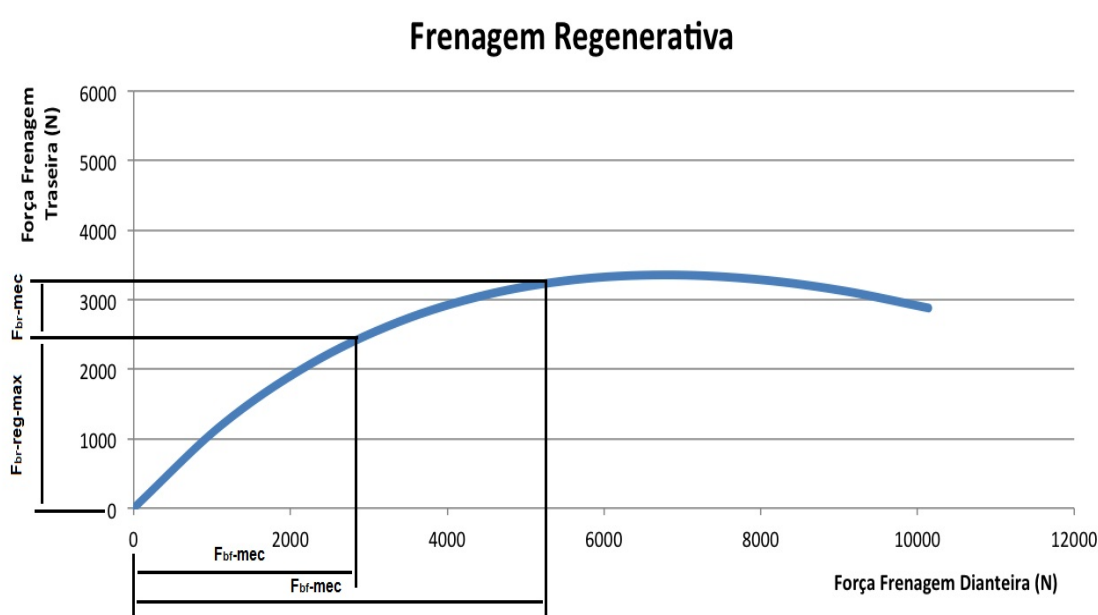


Figura 14 - Forças na Frenagem Regenerativa

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.

A utilização de um sistema auxiliar para o armazenamento de energia, como um ultracapacitor, é recomendável e deve influenciar positivamente no desempenho do veículo em acelerações e em rampas. É bastante comum que se coloque um banco de ultracapacitores em paralelo com a bateria para um fornecimento rápido de potência. Entretanto, o projeto do sistema elétrico não faz parte do escopo desse trabalho.

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. CONCLUSÃO

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.

Após a escolha, através de uma matriz de decisão, passou-se 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. A bateria foi dimensionada apenas considerando os gastos do sistema de propulsão. Outros componentes foram considerados fazendo parte de um sistema elétrico auxiliar.

Assim, entende-se que o projeto do veículo foi cumprido, quando considerado seu sistema de propulsão, principal diferença para os veículos convencionais. Sugere-se para uma continuação desse trabalho, o projeto de outros sistemas do veículo, como ar-condicionado e entretenimento, um maior aprofundamento nos sistemas elétricos e até um desenho de sua carroceria e suspensão.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] BRANT, Bob. **Build your own electric vehicle**. TAB Books. 1994. ISBN 0-8306-4232-3.

[2] OLIVEIRA, Eude Cezar de. **Modelagem e simulação de veículos elétricos híbridos** / E.C. Oliveira. – ed.rev. – São Paulo, 2005.

[3] BASTOS, Samuel Trovati. **Projeto de um veículo elétrico híbrido de passeio** / S.T. Bastos – São Paulo, 2005.

[4] 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.

[5] BRAES, Hans-Hermann; SEIFFERT, Ulrich. **Handbook of Automotive Engineering**. – SAE International

[6] Catálogo Smart Fortwo. Disponível em: <http://price.smart.com.br/pdf/catalogo_SMART.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2010

[7] Plug-in America. Disponível em: <<http://www.pluginamerica.org>>. Acesso em: 20 nov.2010

[8] 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.

[9] News and Information about Electric Vehicles – US Department of Energy. Disponível em: <<http://www.fueleconomy.gov/feg/evnews.shtml>>. Acesso em: 16 mar.2011

[10] KAMINSKI, Paulo Carlos. **Desenvolvendo produtos com planejamento, criatividade e qualidade**. São Paulo: LTC, 2000. 130 p.

[11] EHSANI, Mehrdad. **Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: fundamentals, theory, and design**. Boca Raton: CRC Press, 2004. 424 p.

[12] HUSAIN, Iqbal. **Electric and hybrid vehicles: design fundamentals**. Akron: CRC Press, 2003. 270 p.