ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

PROJETO DE UM VEÍCULO HÍBRIDO URBANO

Raphael Halfeld Vasconcellos Nº USP: 5947332

Professor Orientador: Ronaldo Salvagni

São Paulo, Novembro de 2011

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

PROJETO DE UM VEÍCULO HÍBRIDO URBANO

Raphael Halfeld Vasconcellos Nº USP: 5947332

Professor Orientador: Ronaldo Salvagni

Entrega final da terceira etapa do trabalho de formatura referente à disciplina PME-2600 do curso de Engenharia Mecânica da EPUSP.

Tema: Projeto de um veículo híbrido para uso urbano. Irá ser escolhida a melhor configuração de motores que atenda às necessidades de um morador de uma grande cidade.

São Paulo, Novembro de 2011

FICHA CATALOGRÁFICA

Vasconcellos, Raphael Halfeld
Projeto de um veículo híbrido para uso urbano / R.H. Vasconcellos. -- São Paulo, 2011.
p. 106

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

1. Veículos automotores 2. Poluição ambiental (Redução) 3. Indústria automobilística (Aspectos ambientais) 4. Gás carbônico (Redução) 5. Inovações tecnológicas I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II. t.

Agradecimentos:

Agradeço a minha namorada e amiga Mariana Gimenez por todo o apoio e dedicação nestes 6 anos juntos.

Índice

1. Resumo do Projeto 11
2. Introdução 13
3. Iniciativas que visam a redução do consumo 14
3.1 Sistema Start/Stop: 14
3.2 Aerodinâmica: 14
3.3 Transmissão: 14
3.4 Pneus: 15
3.5 Motor: 15
3.6 Plásticos: 16
3.7 Metalurgia: 16
4. Sistemas de propulsão 17
4.1 Veículos elétricos: 17
5. Veículos híbridos 18
5.1 Introdução 18
5.2 Classificação 21
5.3 Principais componentes de um veículo híbrido 22
6. Híbrido com configuração em Paralelo 25
6.1 Acoplamento de torque 26
6.2 Acoplamento de velocidade 31
6.3 Acoplamento de torque e de velocidade 32
6.4 Esquema lógico 34
7. Híbrido com configuração em Série 35
8. Híbrido com configuração Mista 37
9. Requisitos de projeto 38
9.1 Ciclos de condução 38
9.2 Estado de carga da bateria 42
9.3 Estimativa de massa e área frontal 42
9.4 Requisitos finais 42
10. Princípios básicos dos veículos 45
10.1 Esforço trativo e velocidade 45
10.2 Características dos motores 45
10.3 Características da transmissão 46
10.4 Velocidade máxima de um veículo 47

10.5 Economia de combustível 48
11. Projeto de um veículo híbrido em série 49
11.1 Projeto dos principais componentes 49
11.1.1 Projeto do Motor Elétrico (Trativo) 49
11.1.2 Projeto do Motor a Combustão 52
11.1.3 Projeto da Bateria 56
12. Projeto de um Veículo Híbrido Paralelo 57
12.1 Projeto dos principais componentes 57
12.1.1 Projeto do motor a combustão interna 57
12.1.2 Projeto do motor elétrico 61
12.1.3 Projeto da bateria 63
13. Seleção da Configuração do Powertrain 64
14. Motor a Combustão interna 72
15. Motores Elétricos 73
15.1 Motores de Corrente Contínua com escovas 73
15.2 Motores de Indução (IM) 75
15.3 Motores de Corrente Contínua sem escovas 77
15.4 Motores de Relutância Variável 78
16. Unidade de Armazenamento de Energia 83
16.1 Baterias de Chumbo-ácido 84
16.2 Baterias de níquel 85
16.3 Baterias de Lítio-íon 86
16.4 Comparativo de Baterias 86
16.5 Ultracapacitores 91
17. Frenagem regenerativa 93
18. Conclusões 103
19. Referências Bibliográficas 105

Índice de Ilustrações

Figura 1. Cronograma do Trabalho 11
Figura 2. Continuação do Cronograma do Trabalho 12
Figura 3. Perda de energia em um carro convencional 18
Figura 4. Redução das perdas de energia com o sistema híbrido 19
Figura 5. Total de veículos híbridos vendidos nos EUA, Silva [6] 20
Figura 6. Total de veículos vendidos nos EUA 20
Figura 7. Número de veículos híbridos vendidos nos EUA (divididos por modelo), Silva [6] 20
Figura 8. Engrenagem Planetária 24
Figura 9. Esquema simplificado de uma configuração em paralelo 25
Figura 10. Conceito do acoplamento de torque mecânico 26
Figura 11. Configuração Paralela com dois eixos 27
Figura 12. Esforço trativo para diferentes transmissões para configuração paralela com dois eixos 28
Figura 13. Configuração paralela com dois eixos 29
Figura 14. Configuração paralela com um único eixo e com a transmissão posicionada depois do motor elétrico 30
Figura 15. Configuração paralela com um único eixo e com a transmissão posicionada entre os dois motores 30
Figura 16.Configuração paralela com dois eixos separados 31
Figura 17. Conceito do acoplamento mecânico de velocidades 31
Figura 18. Configuração paralela com acoplamento de velocidade (engrenagem planetária) 32
Figura 19. Configuração paralela com acoplamento de velocidade (motor elétrico) 32
Figura 20. Configuração paralela com acoplamento de torque e velocidade (engrenagem planetária) 33
Figura 21. Configuração paralela com acoplamento de torque e velocidade (motor elétrico) 34
Figura 22. Esquema lógico de um híbrido em paralelo 34
Figura 23. Esquema simplificado de uma configuração em série 35

Figura 24. Esquema lógico de um híbrido em série 36
Figura 25. Esquema simplificado de uma configuração mista 37
Figura 26. Atributos ideais de acordo com a comunidade americana para um veículo, extraído do livro de Miller [7] 38
Figura 27. Ciclos de condução da EPA 39
Figura 28. Ciclo padrão de condução 40
Figura 29. Distância percorrida diariamente no Japão 41
Figura 30. Objetivos de desempenho a serem alcançados por veículos híbridos de acordo com Miller [7] 41
Figura 31. Pico de energia pela massa do veículo (Retirado de Miller [7] 43
Figura 32. Curva típica de um motor a combustão interna 46
Figura 33. Curva característica de um motor elétrico 46
Figura 34. Curva característica de torque de um motor a combustão interna .. 47
Figura 35. Esforços trativos de um veículo com motor a combustão interna de quatro marchas e de um motor elétrico de apenas uma marcha 47
Figura 36. Curva de esforço trativo de um motor elétrico 51
Figura 37. Curva do motor elétrico usado para exemplificação dos cálculos ... 52
Figura 38. Curvas de potência do MCI 54
Figura 39. Ciclos Urbanos 55
Figura 40. Curvas de potência do MCI 59
Figura 41. Curva do esforço trativo do motor elétrico usado para exemplificação dos cálculos 62
Figura 42. Configuração de um veículo híbrido em série 64
Figura 43. Configurações em paralelo com acoplador de torque 65
Figura 44.Configurações em paralelo com acoplador de velocidade 66
Figura 45.Configurações em paralelo com acoplador de torque e de velocidade 66
Figura 46. Configuração de Powertrain escolhida 70
Figura 47. Ciclo Otto padrão 72
Figura 48. Princípio de funcionamento de um motor de corrente contínua 74
Figura 49. Corte de uma seção do Motor de Indução 76
Figura 50. Corte de uma seção transversal de um motor de Corrente Contínua sem Escovas 78
Figura 51. Corte da seção de um Motor de Relutância Variável 79

Figura 52. Características de baterias para o uso automotivo, retirada de [9] . 87
Figura 53.Características de baterias para o uso automotivo (EV e HEV), retirado de [12] 88
Figura 54. Especificações técnicas de ultracapacitores 92
Figura 55. Curva de distribuição ideal de forças de frenagem 95
Figura 56. Forças de frenagem vs. velocidade do veículo em um ciclo FTP 75: (a) rodas frontais e (b) rodas traseiras 96
Figura 57.Potência de frenagem vs. velocidade do veículo em um ciclo FTP 75: (a) rodas frontais e (b) rodas traseiras 96
Figura 58.Energia de frenagem vs. velocidade do veículo em um ciclo FTP 75: (a) rodas frontais e (b) rodas traseiras 96
Figura 59. Forças de frenagem nas rodas dianteiras e traseiras para os freios em série - ótima sensibilidade 98
Figura 60. Forças de frenagem nas rodas dianteiras e traseiras para os freios em série - ótima recuperação de energia 99
Figura 61. Forças de frenagem nas rodas dianteiras e traseiras para os freios em paralelo 101
Figura 62. Variação das forças de frenagem com a desaceleração 101

1. Resumo do Projeto

O seguinte trabalho tem como objetivo o projeto de um veículo híbrido para uso urbano. O projeto se baseará nas necessidades de uma típica família brasileira, assim, as especificações técnicas que o veículo deverá obedecer, tais como aceleração, velocidade máxima, consumo de combustível entre outras serão formuladas com base nas necessidades desta.

Neste projeto, inicialmente pretende-se estudar os motivos pelos quais atualmente estudam-se maneiras de se solucionar o problema da emissão de CO_2 assim como as soluções encontras até o momento. Após essa etapa introdutória, será estudado mais profundamente o veículo híbrido, seu princípio de funcionamento, principais componentes, possíveis configurações tentando obter-se como resposta todos os fatores básicos para o projeto de um automóvel híbrido assim como a interação entre as suas partes.

Feita a etapa de estudo, serão estabelecidas as especificações técnicas às quais se pretende chegar tais como aceleração, velocidade máxima, peso, consumo de combustível entre outras. Com as especificações técnicas estabelecidas serão escolhidas as soluções que serão adotadas no projeto através de matrizes de solução. Com todas as definições estabelecidas, inicia-se o projeto a fim de se obter a melhor relação possível entre motor elétrico e motor à combustão interna que consiga atender a todas as especificações.

Ao final deste trabalho espera-se que tenha sido projetado um veículo híbrido para uso urbano de uma típica família brasileira a fim de se reduzir as emissões de poluentes e ao mesmo tempo mantendo-se a excelência e agilidade de um carro moderno.

	2010		
	Outubro	Novembro	Dezembro
ESTUDO DA NECESSIDADE			
SOLUÇÕES ESTUDADAS ATUALMENTE			
VEÍCULOS HÍBRIDOS			
ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA			
SOLUÇÕES			
ESCOLHA DE UMA SOLUÇÃO			
PROJETO			
RELATÓRIO FINAL			

Figura 1. Cronograma do Trabalho

2011										
Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro

Figura 2. Continuação do Cronograma do Trabalho

2. Introdução

O efeito estufa é um fenômeno natural que é responsável por manter a superfície terrestre aquecida. Sem ele a Terra seria muito fria, em torno de 19^{o}C negativos, e por conseqüência não haveria vida no planeta. Gases formam uma espécie de cobertor em volta do planeta, retendo a energia transmitida pelo Sol na atmosfera.

Este fenômeno, ao mesmo tempo em que é vital à vida terrestre, torna-se um problema ambiental a media em que o mesmo é acentuado, aumentando as temperaturas terrestres, devido ao excesso de emissão de gases do efeito estufa devido às ações humanas através da queima de combustíveis fósseis, por exemplo.

O frágil equilíbrio ambiental foi rompido com a revolução industrial, como mostram dados científicos evidenciando que a temperatura média do planeta aumentou 0,74^{o}C entre 1996 e 2005 [9]. Algumas pesquisas científicas projetam que para o ano de 2100 a temperatura média aumentará de 1,8^{o}C para 4^{o}C, as áreas de seca irão se expandir, o nível do mar crescerá de 20 a 60 cm, ocorrerá degelo dos pólos, diversas espécies de animais serão extintas entre outras inúmeras conseqüências [9].

O dióxido de carbono é um dos gases que mais contribui para a intensificação do efeito estufa permanecendo na atmosfera por cerca de 100 anos. A sua concentração na atmosfera aumentou devido principalmente à queima de combustíveis fósseis em termelétricas, indústrias, automóveis e também pela devastação e queima das florestas.

O planeta, devido ao aquecimento global e a forte dependência da energia proveniente dos combustíveis fósseis, está mobilizado em busca de alternativas eficazes ao atual padrão de consumo e gasto energético. Corresponsável na produção do efeito estufa, a indústria automobilística se debruça na procura de soluções capazes de reduzir o consumo de combustível e, conseqüentemente, a emissão de poluentes. A corrida na busca por redução do consumo de combustível é praticamente uma corrida de revezamento, na qual cada área ou sistema do veículo trabalha em conjunto por um só objetivo: eficiência. Certos hábitos de condução auxiliam muito nessa corrida de preservação do meio ambiente, mas a contribuição tecnológica é a grande responsável pelos grandes avanços em direção de um planeta mais saudável.

A seguir serão abordadas algumas das iniciativas que vem sendo adotadas pela indústria automobilística.

3. Iniciativas que visam a redução do consumo

Algumas das iniciativas que mais vem sendo estudadas referem-se ao sistema de propulsão do veículo, como por exemplo, os veículos elétricos e híbridos que serão abordadas mais adiante. Outras tecnologias referem-se à tecnologias mais simples e de subsistemas menores e menos complexos e são discutidas a seguir:

3.1 Sistema Start/Stop:

É um novo sistema desenvolvido pela Bosch com foco na utilização em veículos nas grandes cidades, nas quais o congestionamento é um fator diário e habitual. Com o intuito de diminuir o consumo de combustível e elaborado exclusivamente para atuar no trânsito o sistema é composto por diversos sensores localizados no pedal de freio, na embreagem e no ponto morto do câmbio que enviam sinais para a unidade de comando interrompendo o funcionamento do motor ou dando partida automaticamente todas as vezes que o veículo encontra-se parado, por exemplo, em frente a um semáforo. O diretor de engenharia da divisão de motores conta que nos testes a economia gira em torno de 14% e 15% como explicita Costa [4]. Isso significa que se um veículo faz 12 km/l na cidade, passará a rodar 14 km/l.

Na Europa o sistema já está presente em mais de 1 milhão de carros e até 2014 deve equipar 85% da frota. No Brasil, espera-se que o dispositivo esteja no mercado em até dois anos.

3.2 Aerodinâmica:

O objetivo principal nessa área é realizar um desenho que proporcione a menor resistência possível ao ar. Aliado a este fator o veículo deve possuir um atrativo estético se diferenciando dos demais, ou seja, deve ser encontrado um equilíbrio entre as especificações técnicas e a segmentação do modelo.

Tal trabalho é realizado em túneis de vento, estabelecendo-se nele a melhor equação em relação à categoria e ao segmento de atuação do automóvel. Espera-se do projeto um consumo adequado ao que se propõe o modelo.

3.3 Transmissão:

A transmissão está altamente ligada ao consumo de combustível, quanto mais resistência ela oferecer maior será o consumo. Os estudos nessa área estão ligados a este fato, eles tentam minimizar o atrito relacionado à transmissão. Tal diminuição pode ocorrer através de rolamentos mais eficientes, projeto de denteamento e engrenagens mais bem dimensionadas assim como o estudo de óleos mais eficazes na lubrificação do conjunto.

De acordo com Costa [4], atualmente os estudos estão focados nos câmbios automatizados que, independente da condição de uso, o motor deve trabalhar perto do ideal. Esse tipo de transmissão proporciona padrão na condução e impede certos erros tais como o excesso no regime de giro. De acordo com a ZF, a redução no consumo pode chegar até 10%.

3.4 Pneus:

Os pneus juntamente com a aerodinâmica e o motor são um dos maiores responsáveis pelo consumo. A calibração adequada de acordo com as especificações do fabricante garante tanto a economia de combustível quando a vida útil do pneu. O principal objetivo neste campo é reduzir a resistência ao rolamento do pneu, permitindo assim que para uma mesma força aplicada o rolamento seja maior. O que permite tal melhora principalmente é o estudo do composto usado na fabricação, mas a redução de massa e as novas tecnologias de fabricação também têm grande influência.

A Bridgestone utilizou recentemente o uso da nanotecnologia na fabricação de pneus através da manipulação da microestrutura da borracha. Tal tecnologia permite encontrar o material mais adequado ao tipo de uso que se deseja.

O único problema de se diminuir a resistência ao rolamento é que se diminui a eficiência da frenagem, exigindo assim freios mais eficientes.

3.5 Motor:

O motor é um dos mais importantes sistemas responsáveis pelo consumo. As soluções envolvidas nesse campo andam de acordo com o segmento do veículo e o combustível utilizado. Atualmente existe uma tendência que todos estão seguindo, a de *downsizing,* ou seja, procura-se reduzir as cilindradas dos motores, tendo-se um menor bloco que oferecendo mais por menos. Para isso, são essenciais o uso de materiais mais nobres, a superalimentação e a eletrônica.

Uma das novas tecnologias atuais é a MultiAir da FTP (Fiat Powertrain) que é baseada em um sistema eletro-hidráulico de acionamento de válvulas como mostra Costa [5]. A tecnologia permite controle dinâmico e direto do ar admitido pelo motor, sendo possível gerenciar a combustão cilindro a cilindro e ciclo a ciclo. A iniciativa melhora em até 15% o consumo e em até 40% as emissões.

As pesquisas têm avançado também em direção aos motores diesel, ainda considerado o mais eficiente e econômico propulsor. Os estudos seguem na direção de aperfeiçoar as câmeras de combustão, a injeção de combustível e sistemas de pós-tratamento.

3.6 Plásticos:

As pesquisas nesse setor vêm ganhando força na medida em que polímeros estão sendo descobertos para a substituição dos metais em diversas partes de um veículo. Um exemplo é os estudos no desenvolvimento de uma roda à base de um polímero, oferecendo uma redução de 7 kg para 4,5 kg além de proporcionar um maior desempenho no que diz respeito às deformações (de acordo com [4]).

3.7 Metalurgia:

Um dos principais meios de se diminuir o consumo de combustível é a diminuição de peso do veículo, e quando se trata do material do carro ganha muita força o alumínio e os plásticos. Para combater esse cenário a indústria do aço está investindo pesado, tanto que foi criado um consórcio de 16 siderúrgicas de 12 países para se combater o alumínio. Desse consórcio algumas melhorias surgiram tais como a melhoria estrutural com menos massa (menores dobramento, torção, ruído, vibração e aspereza) e a maior segurança.

Tiveram grande êxito as chapas de fechamento de aço ultraleve determinando a volta do aço como material de carrocerias. Também se chegou a construir uma porta 45% mais leve e com resistência a mossas. Obtiveram espaço também no sistema de suspensão onde era campo do alumínio com os aços ultraleves de suspensão.

4. Sistemas de propulsão

4.1 Veículos elétricos:

Esses veículos são movidos apenas por motores elétricos e sua energia é proveniente apenas de uma bateria. Tal modelo de carro possui diversas vantagens, entre elas a de não emitir poluentes e por não ser abastecido por nenhum tipo de combustível líquido. Porém, a energia elétrica que é utilizada para mover tais veículos é gerada em estações que por sua vez emitem poluentes.

Motores elétricos possuem alta eficiência e oferecem a possibilidade de ocorrer regeneração de energia como por exemplo através dos freios. Outra vantagem é que tais modelos são bem silenciosos em baixas velocidades.

Por outro lado, tais modelos de veículos possuem desvantagens tais como o longo tempo necessário para se recarregar a bateria, a não ser que no reabastecimento, ao invés de carregar o carro, seja trocada a bateria. Outra desvantagem seria o custo de implantar postos de recarga da bateria já que não existe nada similar atualmente.

5. Veículos híbridos

5.1 Introdução

Veículos híbridos são definidos como uma classe de sistema de propulsão que emprega pelo menos dois tipos diferentes de processo de conversão de energia e dois diferentes tipos de armazenamento de energia. Com algumas exceções, o conceito geralmente emprega como conversão de energia o motor a combustão interna e o motor elétrico e o armazenamento de energia é dado em forma de combustíveis líquidos e baterias.

Os veículos híbridos, pela sua própria construção e pela interação entre os seus componentes apresentam as seguintes características:

- é eletricamente assistido;
- baixo consumo de combustível;
- baixas emissões de poluentes;
- baixa emissão de ruídos;
- maior conforto operacional;
- permitir o uso do freio regenerativo;
- ter a dimensão do seu motor a combustão diminuída;
- otimização da potência utilizada dos motores ao se aproveitar o melhor de cada motor (elétrico e de combustão interna);
- em certas ocasiões não apresenta emissão de ruído e de poluentes.

A figura a seguir mostra como as perdas de energia em um carro convencional podem ser diminuídas com a implantação de um sistema hibrido.

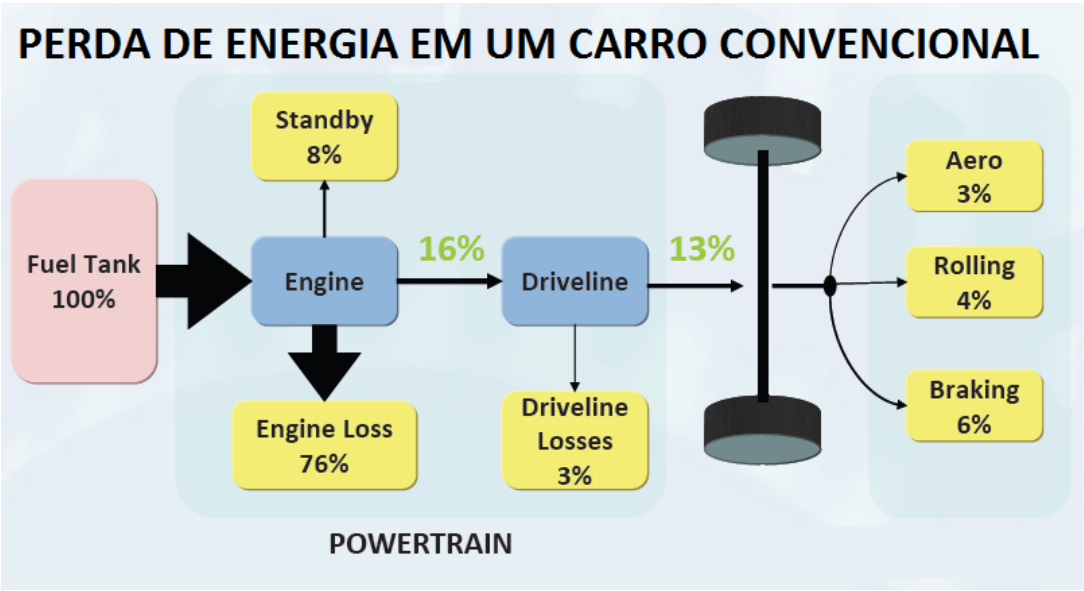


Figura 3. Perda de energia em um carro convencional

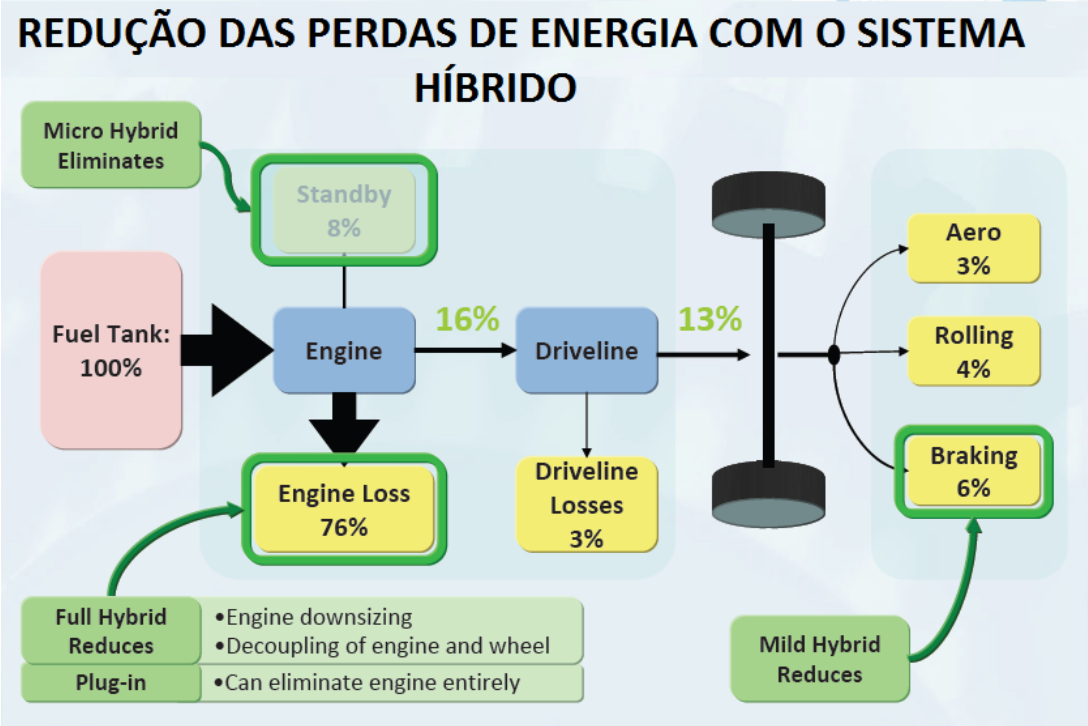


Figura 4. Redução das perdas de energia com o sistema híbrido, retirado de [6]

O grande problema relacionado aos veículos híbridos está em conseguir encontrar um espaço adicional para os componentes extras que um veículo deste tipo requer, principalmente em carros que possuem uma configuração normal, ou seja, projetados para o motor à combustão interna apenas. O aumento do custo em comparação com os veículos convencionais freia de certa forma a entrada dos híbridos no mercado. Mas apesar da tecnologia hibrida ainda ser cara, o número de vendas de veículos desse setor vem aumentando a cada ano principalmente na Europa e EUA graças ao pensamento “verde” e a conscientização das pessoas. A figura a seguir, retirada de Silva [6] mostra o número de veículos híbridos vendidos por mês nos últimos anos nos Estados Unidos.

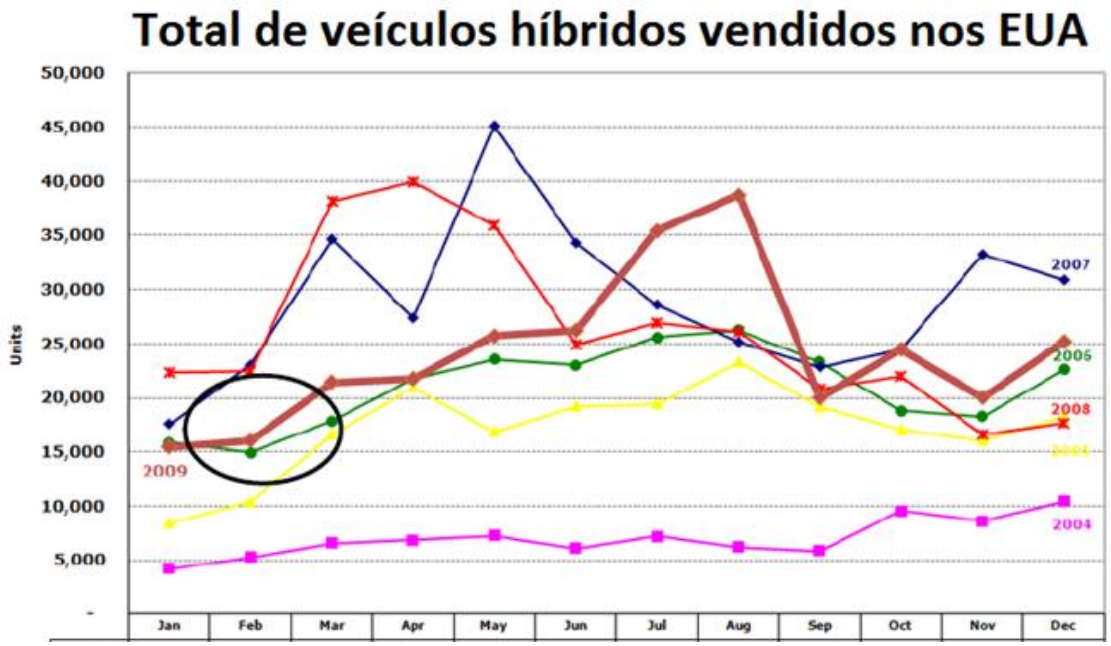


Figura 5. Total de veículos híbridos vendidos nos EUA, Silva [6]

O gráfico a seguir, de Silva [6], mostra a quantidade de cada modelo de veículos híbridos vendidos nos EUA nos últimos anos.

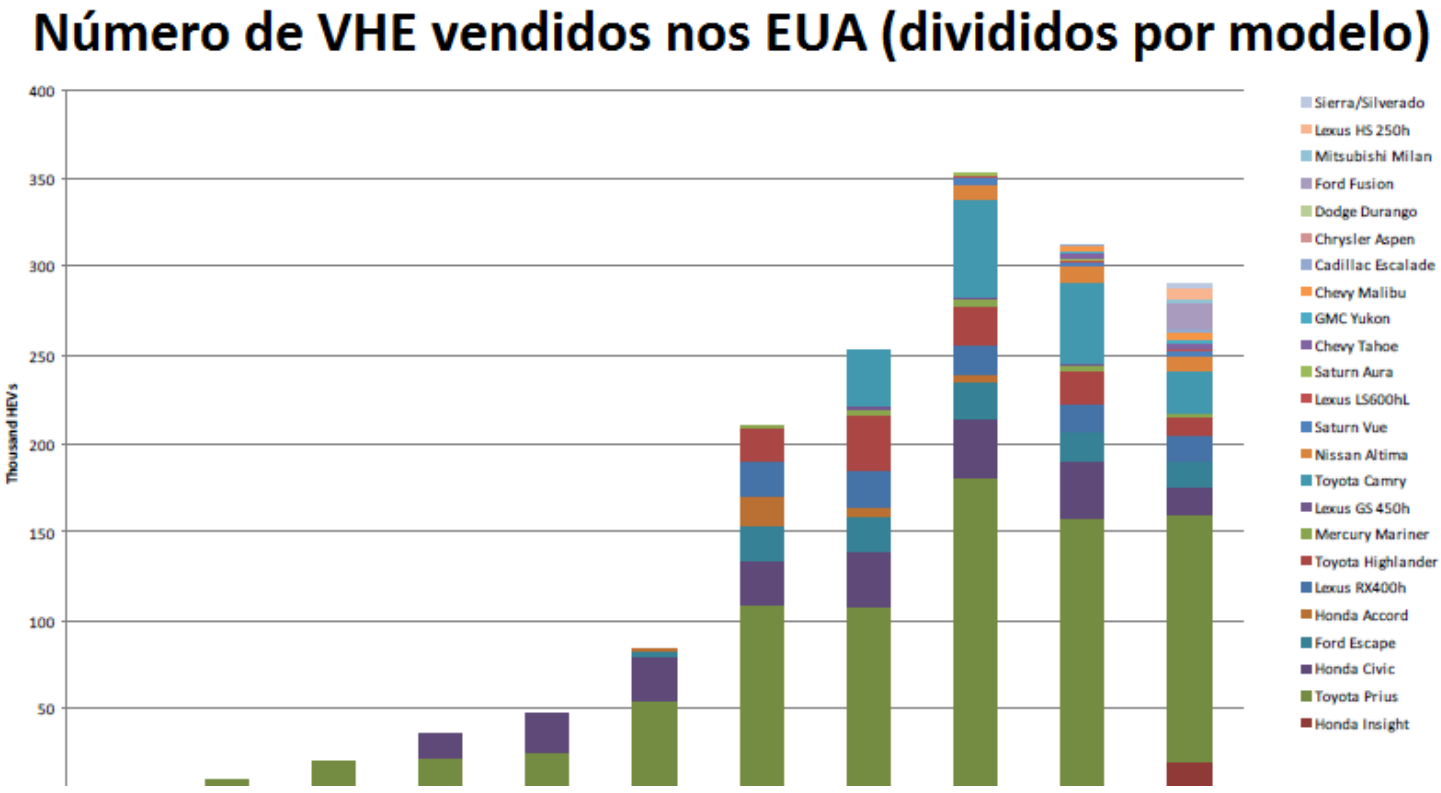


Figura 7. Número de veículos híbridos vendidos nos EUA (divididos por modelo), Silva [6]

Os veículos híbridos se diferenciam dos elétricos em três aspectos importantes:

- Os veículos híbridos podem se adaptar facilmente à estrutura atual;
- A estrutura para realizar o seu reabastecimento já está pronta e está presente em todas as partes;
- O seu desempenho não depende apenas da bateria, permitindo que se projete veículos de alta performance.

Por essas razões os veículos elétricos são vistos como veículos secundários enquanto os híbridos podem ser utilizados como primários, pois eles atendem totalmente a demanda humana atual.

5.2 Classificação

Há diversas maneiras de se obter uma configuração híbrida, desde a escolha da bateria usada, assim como o seu tamanho, até o nível de envolvimento do motor a combustão interna, ou seja, o papel deste motor para o carro. Assim, podemos classificar os veículos pelo seu nível de hibridização como mostra a figura a seguir:

	Micro Híbrido	Meio Híbrido	Híbrido Completo	Híbrido "Plugging"
Automaticamente liga/desliga o motor a combustão conforme o veículo anda/para	X	X	X	X
Usa freio regenerativo e opera acima de 60 V		X	X	X
Usa um motor elétrico para auxiliar o motor a combustão		X	X	X
Em alguns momentos pode ser tracionado apenas com o motor elétrico			X	X
Recarrega a bateria através de uma rede				X

Tabela 1. Classificação dos veículos híbridos

Para exemplificar a tabela acima, o Citroen C3 pode ser classificado como um veículo Micro Híbrido, o Honda Insight como um Meio Híbrido, o Toyota Prius um Híbrido Completo e o Chevy Volt e o Toyota Prius II como Híbrido "*Plugging*".

O veículo híbrido "*Plugging*" é aquele que permite carregar a bateria através de uma tomada, assim, para carregar a bateria ele não dependeria

apenas do motor a combustão. Esta é uma idéia nova e que esta sendo bastante estudada e visada. Em 2010 a SAE estabeleceu as normas que as tomadas devem seguir para que o sistema seja unificado. A idéia é ter essas tomadas em toda a cidade, assim, o consumidor poderia recarregar o seu carro em casa ou no estacionamento, por exemplo. Em uma rede convencional de 120 V um carro seria carregado em cerca de 8 horas e se fosse ligado a uma rede de 240 V demoraria cerca de 3 horas para realizar a mesma tarefa.

O sistema "*Plugging*" permite o que está sendo chamado de "*Vehicle to Grid*", ou seja, se o veículo híbrido estiver com energia extra ele pode disponibilizar essa energia para a rede, assim, o consumidor pode, ao chegar em casa, abastecê-la com a sua energia disponível no carro ligando seu microondas, sua TV entre outros. Com isso está sendo criado também o "*Smart Grid*", um gerenciador de fluxo de energia permitindo um consumidor qualquer vender ou comprar energia de qualquer outro consumidor ligado à rede. A *Intel*, já vem desenvolvendo sistemas operacionais que gerenciam todo esse fluxo de energia, tendo como visão a cidade do futuro onde todos os cidadãos estarão interligados. É uma idéia muito boa, que permitirá o melhor aproveitamento de energia, porém será uma tecnologia que será viabilizada somente em alguns longos anos nos países mais desenvolvidos, demorando ainda muito tempo para conseguir se tropicalizar.

5.3 Principais componentes de um veículo híbrido

Independente da configuração adotada, os veículos híbridos sempre apresentarão alguns componentes que são de extrema importância para o seu funcionamento.

- Motor a combustão interna: Para um veículo híbrido, tal motor tem a vantagem de ter seu tamanho reduzido por não ser o único responsável por toda a carga do carro. Nesse tipo de veículo, tal motor também tem a responsabilidade de recarregar a bateria, assim, em algumas ocasiões ele pode estar tracionando o carro e ao mesmo tempo recarregando a bateria;
- Motor/Gerador elétrico: Na maioria dos veículos híbridos, o motor elétrico também funciona como gerador. Geralmente tem-se dois motores elétricos no carro, um que tem como funções tracionar o carro e recuperar energia em momentos de frenagem e outro que tem como funções ligar o motor a combustão e transformar a energia do motor a combustão em energia elétrica. O primeiro motor possui uma maior potência por tracionar o carro, muitas vezes sozinho, assim seu tamanho é um pouco maior que o segundo de menor potência;

- Bateria: A bateria é de fundamental importância em veículos híbridos. Sua carga determinará diversos outros componentes assim como a autonomia do carro. Em veículos comuns as baterias são de 12V, já em híbridos as baterias possuem valores bem mais altos de tensão. O Prius, da Toyota utilizou uma bateria no seu primeiro modelo de 288V e no segundo uma de 202V.
  Baterias com valores abaixo tensão baixa, por exemplo, 50V não conseguem tracionar o veículo de maneira adequada. Aumentando-se a voltagem, diminui-se a corrente diminuindo também a bitola da fiação elétrica necessária;
- Conversor: Tal dispositivo tem a função de elevar ou abaixar a voltagem usada. O conversor "*Buck*", por exemplo, tem a função de abaixar uma voltagem em corrente contínua, assim como um "*Boost*" tem a função inversa;
- Inversor: Um Inversor tem a função de transformar uma corrente contínua em corrente alternada. Tal dispositivo é de extrema importância, pois nos veículos híbridos os motores elétricos mais usados são de corrente alternada e a bateria é de corrente contínua sendo necessário um inversor entre esses dois dispositivos;
- Retificador: Responsável por transformar corrente alternada em corrente contínua.

Veículos híbridos com a configuração em paralelo possuem um componente de extrema importância, um elemento que como função deve acoplar o motor mecânico ao motor elétrico para que assim os dois possam tracionar as rodas ao mesmo tempo ou em momentos distintos. O Toyota Prius utilizou para tal uma engrenagem planetária e por enquanto esta é a solução utilizada.

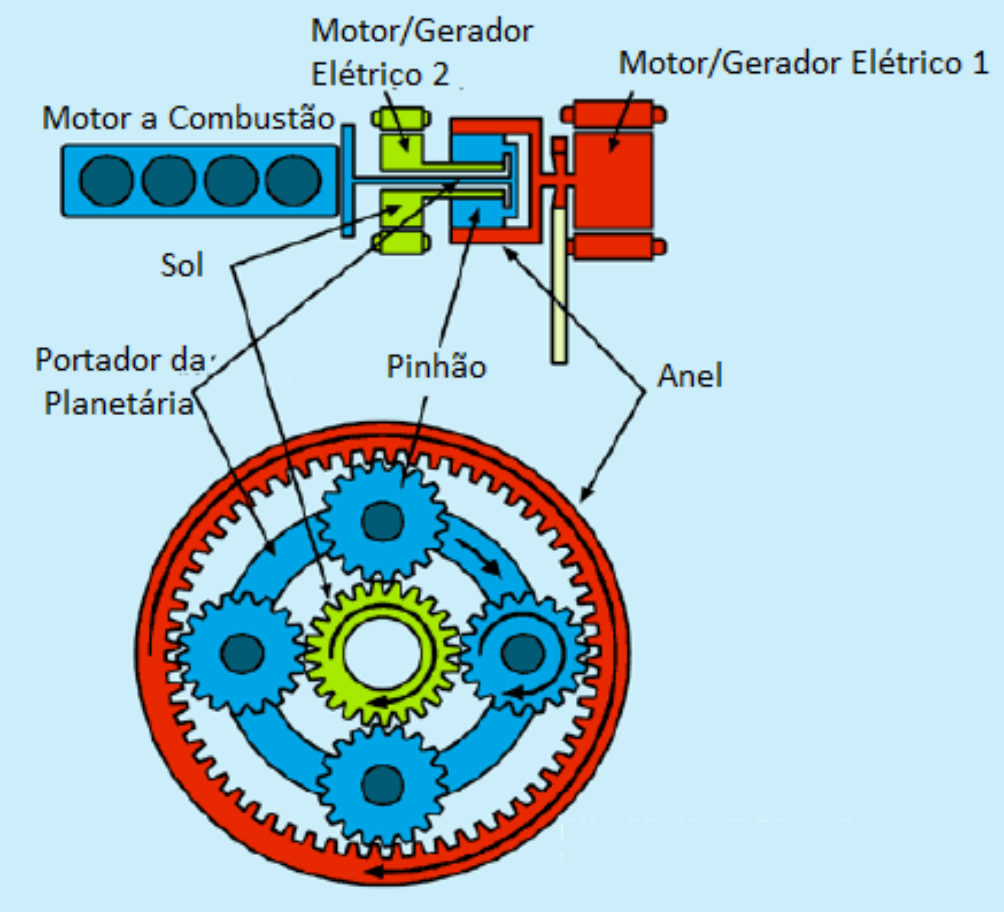


Figura 8. Engrenagem Planetária, retirado de [6]

Tal dispositivo permite três situações distintas: a primeira em que o anel e o sol giram em torno dos seus respectivos eixos, mas o portador da planetária não; a segunda em que o sol está estacionário e o portador da planetária e o anel giram; e a última em que o anel está estacionário e o portador e o sol giram.

6. Híbrido com configuração em Paralelo

Neste tipo de configuração, o motor à combustão interna e o motor elétrico podem ser utilizados simultaneamente como forma de propulsão. Isso significa que o motor à combustão ou o motor elétrico podem ser utilizados sozinhos ou pode ser utilizada uma combinação de ambos.

Usualmente, este tipo de configuração é utilizado em veículos de pequeno porte.

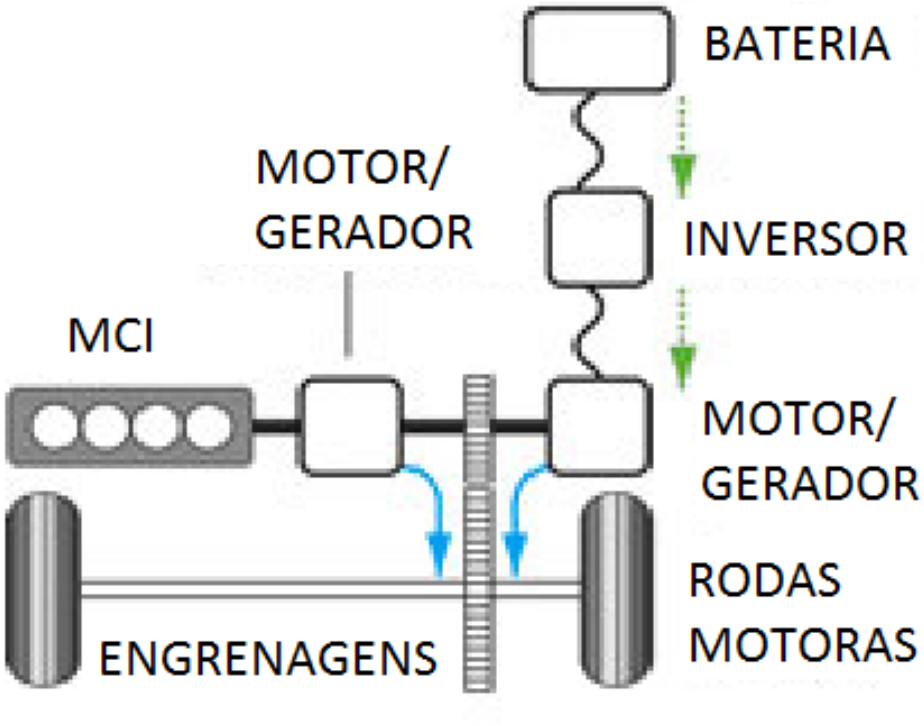


Figura 9. Esquema simplificado de uma configuração em paralelo, retirado de [6]

Nesta configuração, a bateria envia energia para o gerador que aciona o motor a combustão interna, ou seja, a bateria é a responsável por ligar o motor a combustão quando necessário. Em baixas velocidades, com a bateria carregada, a bateria é a responsável por mandar energia para o motor elétrico e este traciona o veículo. Em casos de aceleração, o motor a combustão interna juntamente com o motor elétrico tracionam o veículo. Neste caso a energia do motor elétrico é proveniente da bateria. Em cruzeiro, o motor a combustão move o carro e ao mesmo tempo é capaz de recarregar a bateria.

Nesta configuração o motor a combustão e o motor elétrico estão acoplados mecanicamente. Tal acoplamento pode ser um acoplamento de velocidade ou de torque.

6.1 Acoplamento de torque

O acoplamento de torque soma os torques dos motores ou divide o torque do motor a combustão em dois: em propulsão e em recarga da bateria. A figura a seguir mostra conceitualmente o acoplamento de torque, que pode ser feito por engrenagens, por polias ou até mesmo por um rotor e um estator.

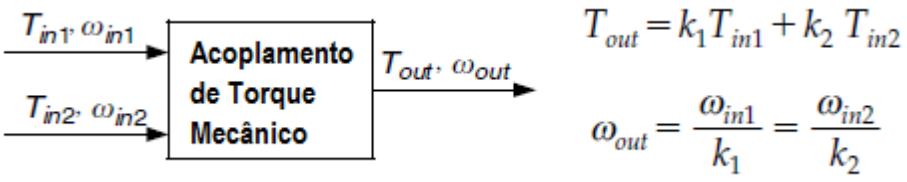


Figura 10. Conceito do acoplamento de torque mecânico

Existem diversas configurações possíveis para veículos híbridos com acoplamento de torque, geralmente elas são classificadas como dois eixos ou um eixo. Em cada categoria, a transmissão pode ser colocada em diversas posições e pode ser projetada com diferentes engrenagens, resultando em diferentes características trativas.

A figura 11 a seguir mostra a configuração de um veículo híbrido paralelo com dois eixos. Neste caso, são usadas duas transmissões, uma é colocada entre o motor a combustão e o acoplamento de torque e a outra é colocada entre o motor elétrico e o acoplamento. Ambas as transmissões podem ser simples ou de múltiplas engrenagens. A transmissão de múltiplas engrenagens produz uma gama maior de perfis de esforços trativos, aumentando assim a eficiência e o desempenho do conjunto. Porém o uso de tais transmissões eleva a complexidade do sistema.

Na figura 12(b), a transmissão 1 é de múltiplas engrenagens e a 2 é simples. No projeto de um veículo híbrido, o esforço trativo desta configuração provavelmente é suficiente para o bom desempenho em ladeiras; maior esforço trativo não é necessário devido a limitação do coeficiente de atrito entre solo e pneu. O uso de uma transmissão simples entre o motor elétrico e o acoplamento utiliza da vantagem dos motores elétricos que possuem alto torque em baixas velocidades. A transmissão de múltiplas engrenagens é usada para superar as desvantagens do motor a combustão aumentando a sua eficiência.

Em contraposição com a configuração anterior, pode-se utilizar uma transmissão simples entre o motor a combustão e o acoplamento e uma transmissão múltipla para o motor elétrico. Esta configuração é considerada inviável já que não usa as vantagens dos dois motores.

Pode-se ainda usar duas transmissões simples (figura 12(d)) resultando em uma configuração e controle simples. O esforço trativo máximo é o limitante desta

configuração, mas quando os principais componentes são bem projetados, consegue-se chegar a um resultado satisfatório.

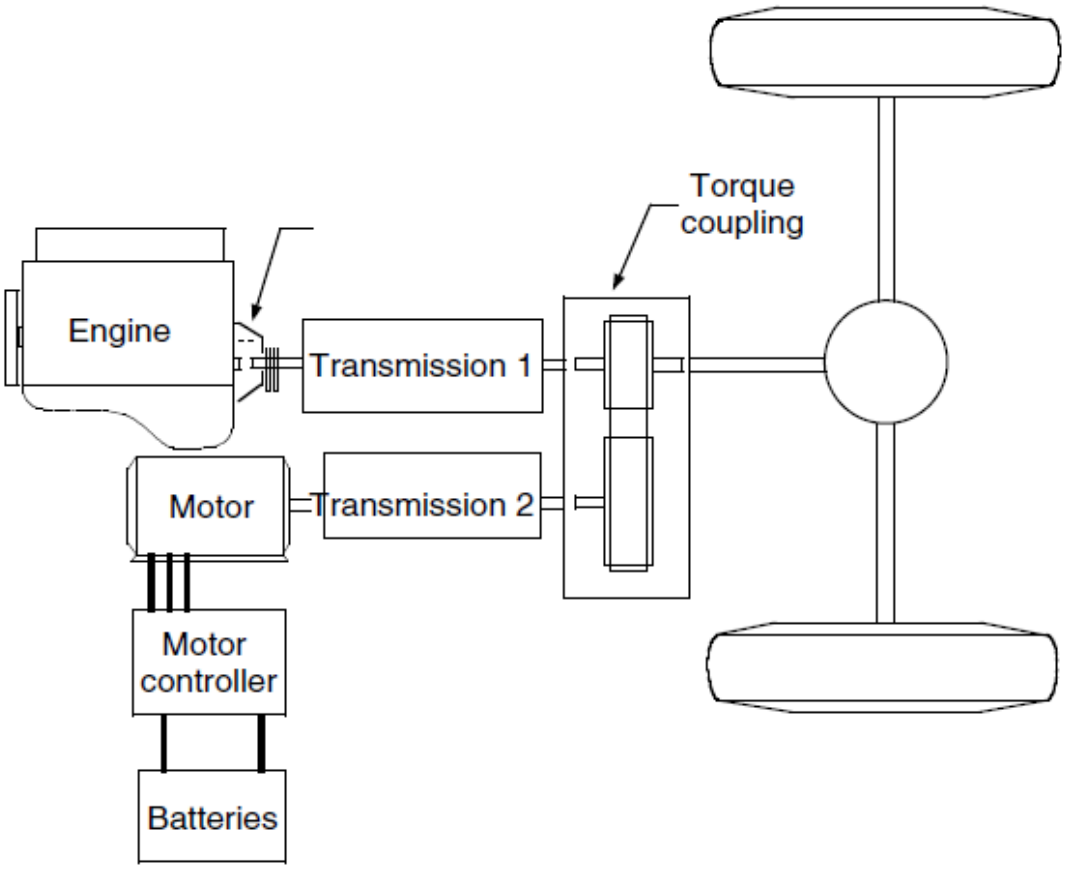


Figura 11. Configuração Paralela com dois eixos, retirado de [9]

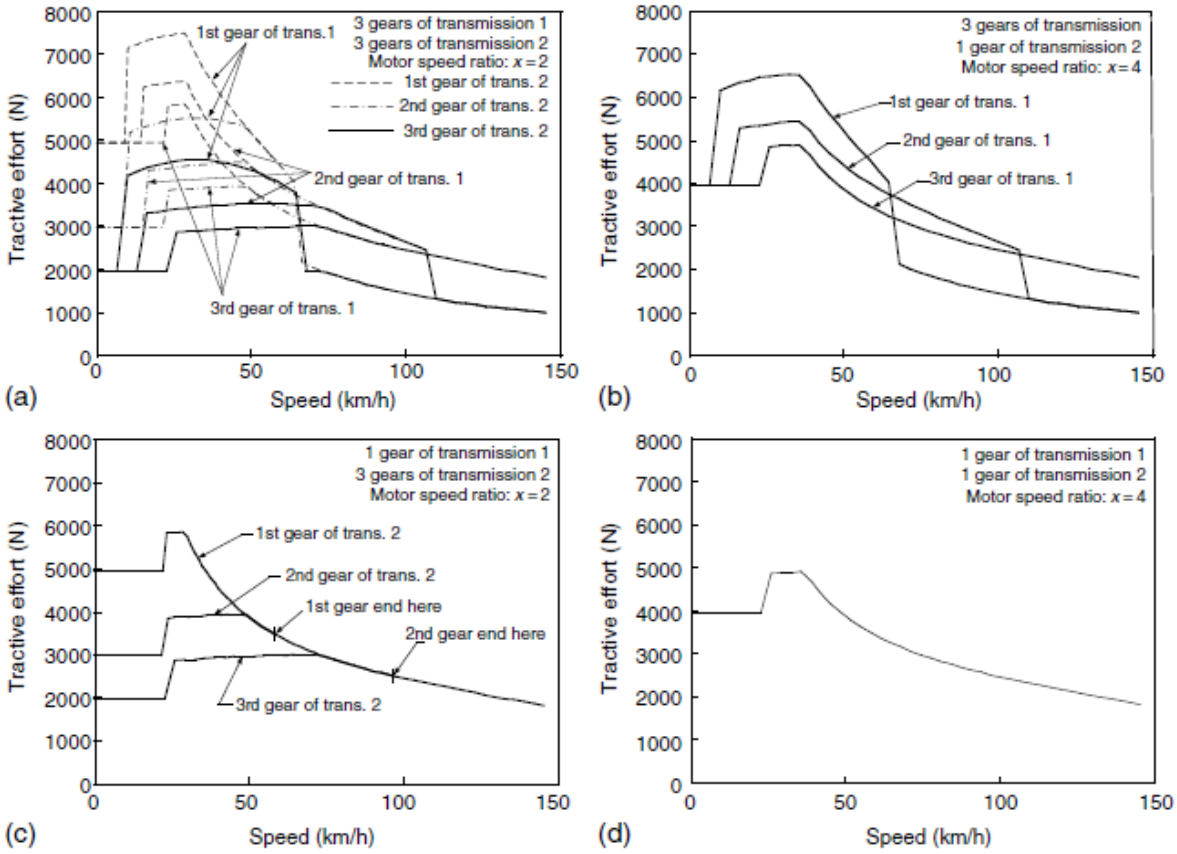


Figura 12. Esforço trativo para diferentes transmissões para configuração paralela com dois eixos, retirado de [9]

Outra configuração para veículos híbridos paralelos com dois eixos é mostrada abaixo, na qual a transmissão está localizada após o acoplamento de torque. A transmissão trabalha na mesma escala para os dois motores. Projetando-se as constantes K1 e K2 do acoplamento de torque permite-se que o motor elétrico tenha faixas de velocidade diferentes da do motor a combustão. Esta configuração é recomendada quando se usa motor elétrico e a combustão relativamente pequenos conjuntamente com uma transmissão de múltiplas engrenagens para que se consiga alcançar o esforço trativo necessário.

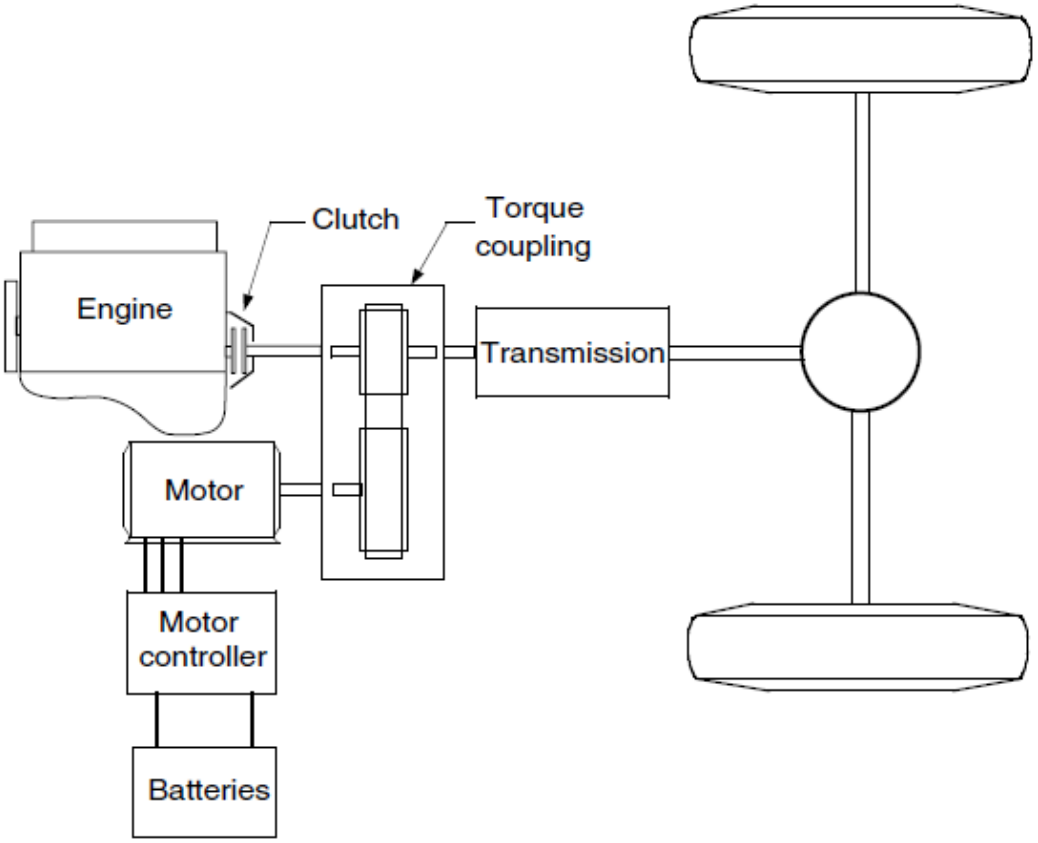


Figura 13. Configuração paralela com dois eixos, retirado de [9]

A arquitetura mais simples do acoplamento de torque na configuração em paralelo é a de um único eixo no qual o rotor do motor elétrico serve como o acoplamento de torque (k1=1 e k2=1). A transmissão pode ser posicionada depois do motor elétrico que é conectado ao motor a combustão por uma embreagem ou entre o motor elétrico e o motor a combustão.

No primeiro caso, o torque de ambos os motores é modificado pela transmissão e os motores devem ter a mesma faixa de velocidades. Esta configuração é geralmente usada quando se tem um motor elétrico pequeno no qual ele exerce as funções de acionar o motor a combustão, de gerador elétrico, de freio regenerativo e auxiliando o motor a combustão na tração mas nunca exercendo o papel principal de motor trativo.

Contudo, para o segundo caso, com a transmissão entre os dois motores (figura 15) a transmissão pode apenas modificar o torque do motor a combustão, enquanto que o motor elétrico é diretamente ligado ás rodas. Esta configuração é usada quando utiliza-se um grande motor elétrico. A transmissão é usada apenas para mudar o ponto de operação do MCI melhorando o desempenho e eficiência do veículo. Deve ser notado que, quando o veículo está parado, a bateria não pode ser carregada e que o motor elétrico sempre participa da tração do veículo.

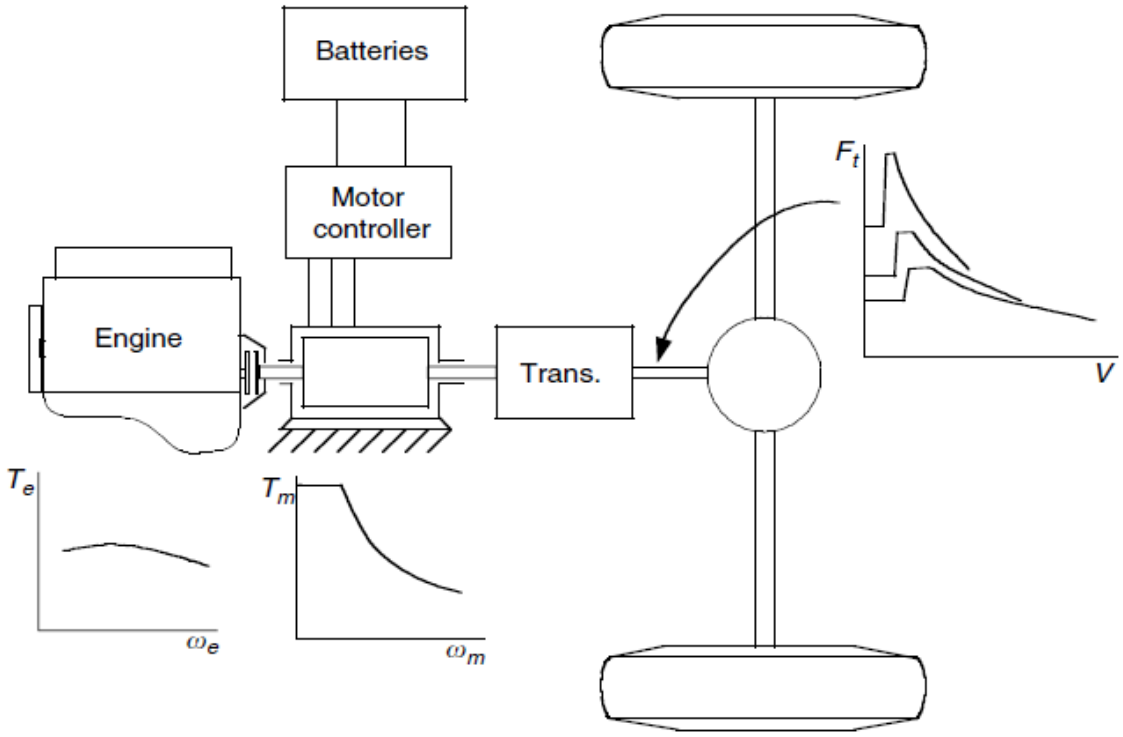


Figura 14. Configuração paralela com um único eixo e com a transmissão posicionada depois do motor elétrico, retirado de [9]

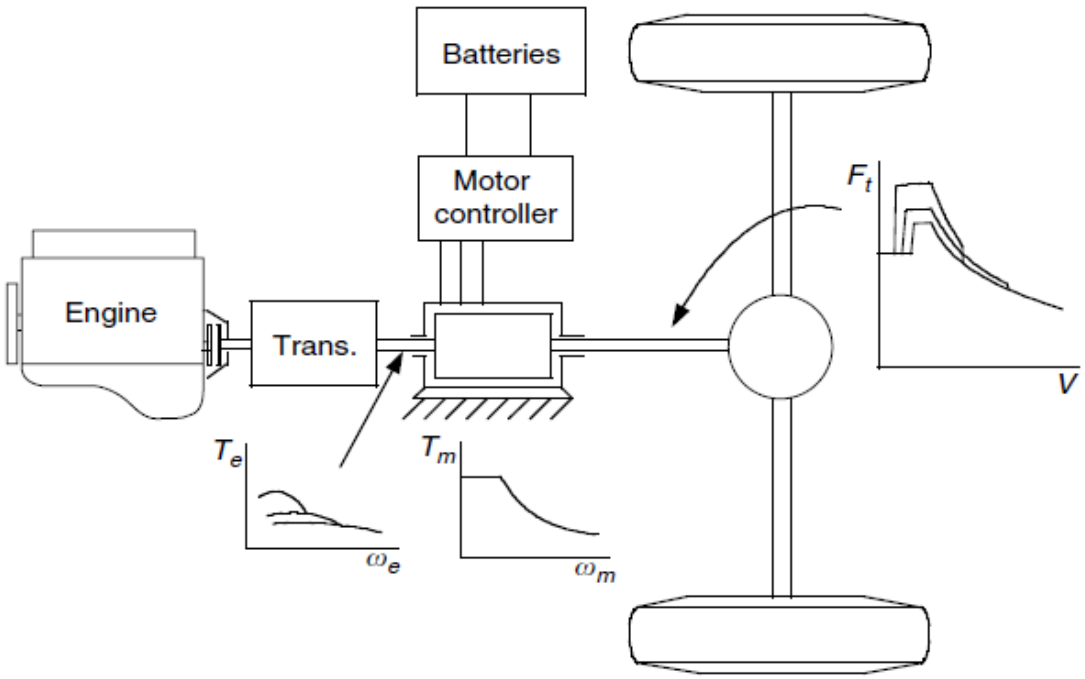


Figura 15. Configuração paralela com um único eixo e com a transmissão posicionada entre os dois motores, retirado de [9]

Outra arquitetura usada para o acoplamento de torque é com eixos separados, no qual um eixo é tracionado pelo MCI e o outro pelo motor elétrico. Os esforços trativos dos motores são somados pelo chassi do veículo e pelo solo. Ambas as transmissões podem ser simples ou de múltiplas engrenagens.

Nesta configuração, mantém-se a arquitetura original de um veículo e adiciona-se o sistema elétrico no outro eixo. Com isso otimiza-se a tração e reduz-se o esforço trativo em um único eixo. No entanto, esta arquitetura ocupará um maior espaço, reduzindo-se o bagageiro ou o espaço reservado para os ocupantes. Este problema pode ser resolvido ao serem utilizados dois motores elétricos menores nas duas rodas. Deve ser notado ainda, que com esta configuração o motor a combustão não é capaz de recarregar a bateria.

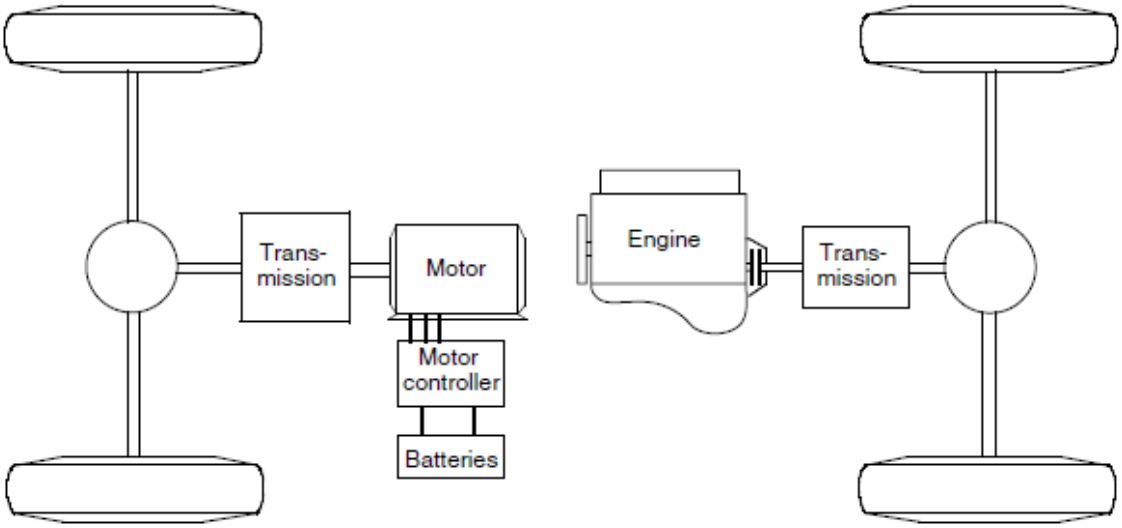


Figura 16.Configuração paralela com dois eixos separados, retirado de [9]

6.2 Acoplamento de velocidade

Os dois motores podem ser acoplados ao se acoplar a suas velocidades como mostrado abaixo:

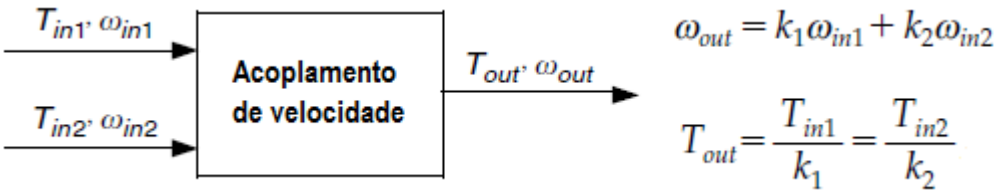


Figura 17. Conceito do acoplamento mecânico de velocidades

Existem basicamente dois mecanismos de acoplamento de velocidades: uma é a engrenagem planetária e o outro é um motor elétrico. No caso do motor elétrico, o estator, que é fixado a uma carcaça estacionária, é utilizado como uma porta de entrada de energia. As outras duas portas são o rotor e o entreferro através do qual a energia elétrica é convertida em energia mecânica. A velocidade do motor é a velocidade relativa do rotor com o estator. Neste caso, k1=k2=1.

As duas figuras a seguir mostram dois exemplos de configurações paralelas com acoplamento de velocidades:

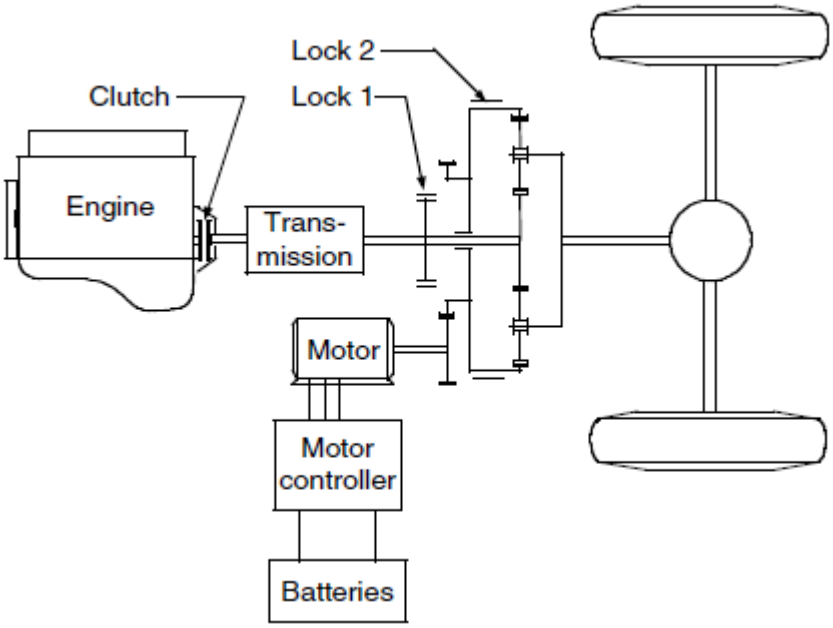


Figura 18. Configuração paralela com acoplamento de velocidade (engrenagem planetária) , retirado de [9]

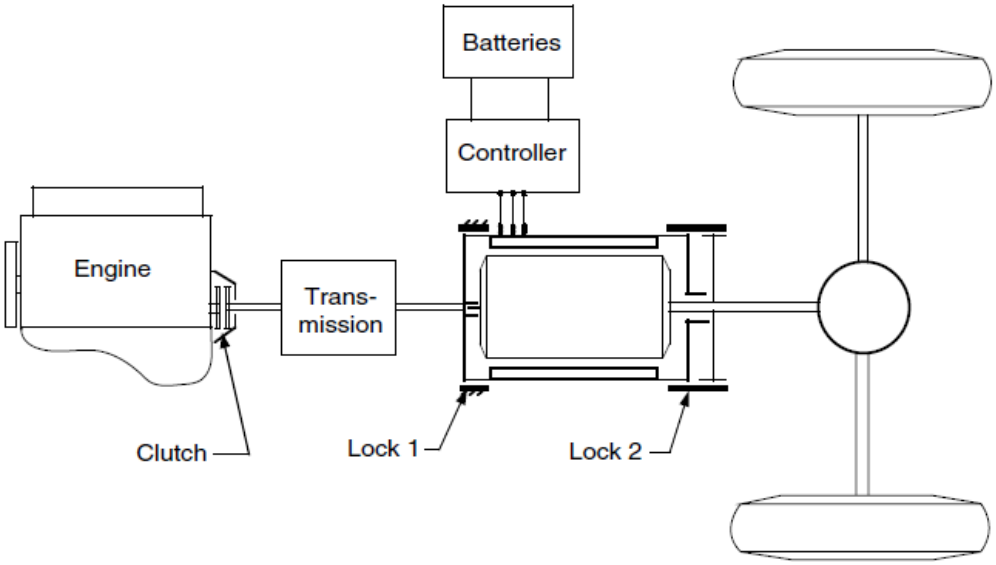


Figura 19. Configuração paralela com acoplamento de velocidade (motor elétrico) , retirado de [9]

A vantagem de se utilizar um acoplamento de velocidade é que a velocidade de cada motor é escolhida livremente aumentando a eficiência do conjunto.

6.3 Acoplamento de torque e de velocidade

Pode-se ainda combinar os acoplamentos, utilizando-se na arquitetura os dois acoplamentos, pode-se escolher alternativamente um ou outro. A figura a seguir exemplifica isto, quando o acoplamento de torque é selecionado a trava 2 trava o anel

da planetária enquanto que as embreagens 1 e 2 são acionadas e a 3 desengatada. Assim, adicionam-se os torques dos dois motores e suas velocidades possuem uma relação fixa. Quando o acoplamento de velocidades é selecionado, a embreagem 1 é engatada, as embreagens 2 e 3 são desengatadas e as travas 1 e 2 liberam a engrenagem solar e o anel. A velocidade dos planetas da engrenagem planetária é a combinação de velocidades dos motores enquanto seus torques possuem uma relação fixa.

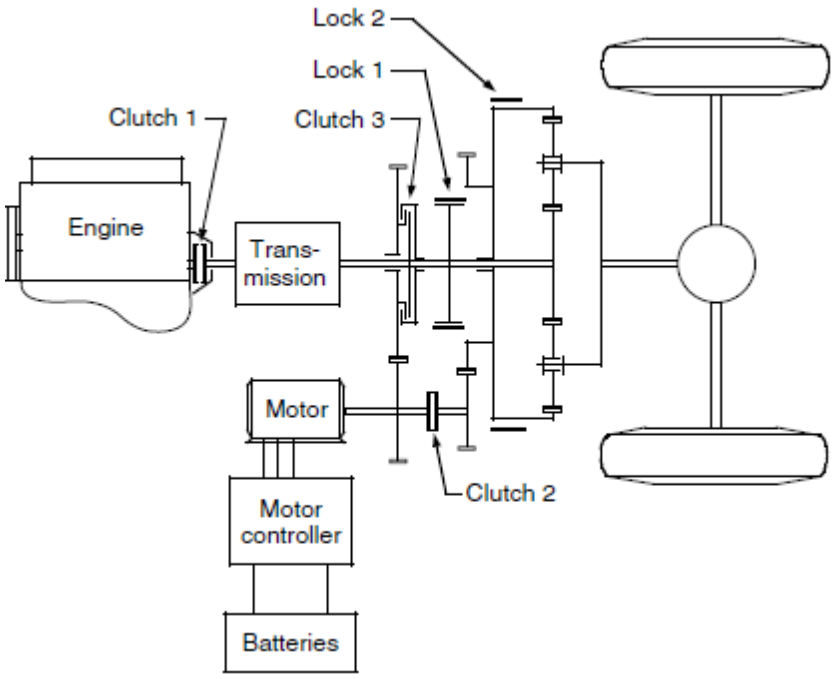


Figura 20. Configuração paralela com acoplamento de torque e velocidade (engrenagem planetária) , retirado de [9]

A engrenagem planetária pode ser substituída por um motor elétrico. Ao se engatar a embreagem 1 e desengatar a 2 o acoplamento de torque é acionado. O inverso aciona o acoplamento de velocidade.

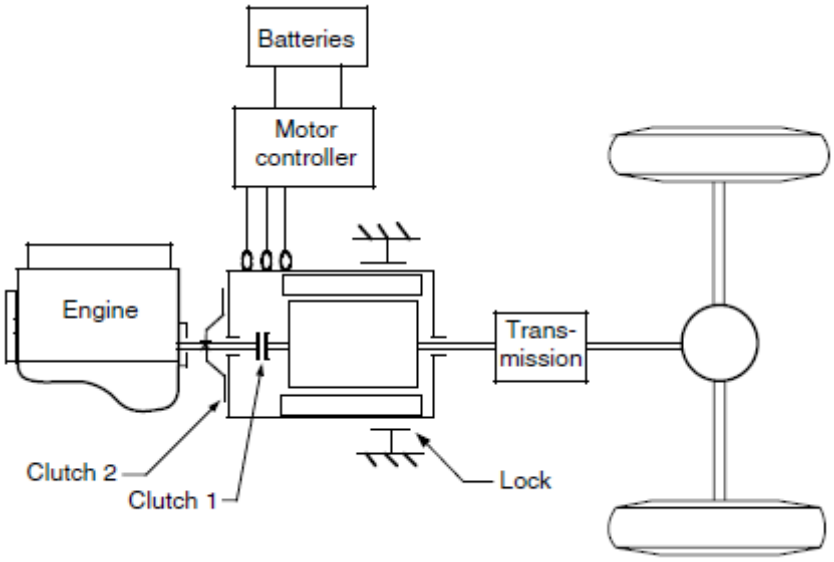


Figura 21. Configuração paralela com acoplamento de torque e velocidade (motor elétrico) , retirado de [9]

6.4 Esquema lógico

A seguir é mostrado um esquema lógico de um veículo híbrido em paralelo.

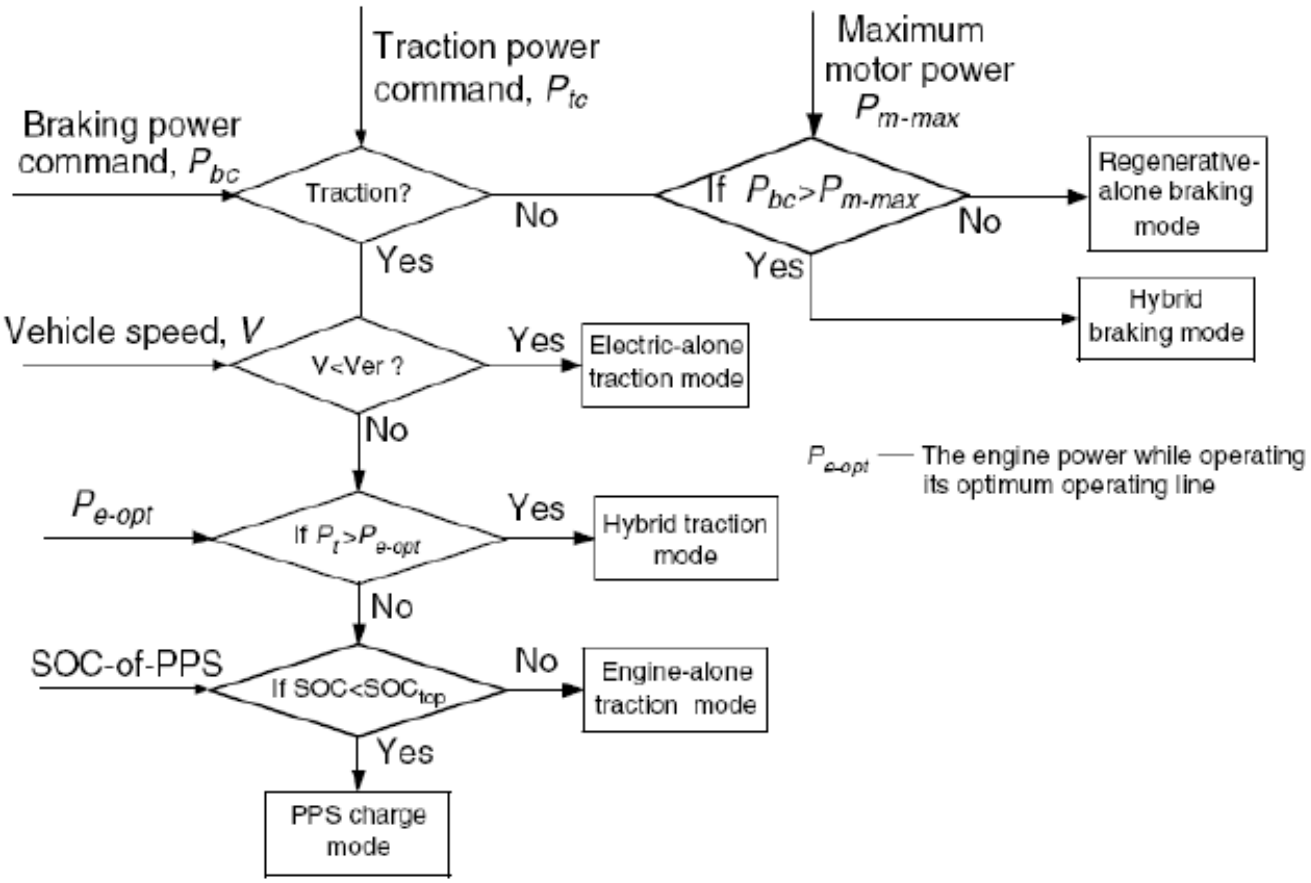


Figura 22. Esquema lógico de um híbrido em paralelo, retirado de [9]

7. Híbrido com configuração em Série

Nesta configuração a propulsão é realizada somente pelo motor elétrico, sendo a energia elétrica fornecida pelo motor a combustão interna e por um gerador. A bateria, usada como um amortecedor de energia, permite uma completa dissociação do motor à combustão da tração realizada. Dessa forma, o motor à combustão pode operar independentemente das demandas de tração podendo ter sua eficiência otimizada e emissões reduzidas.

O motor elétrico é o responsável por tracionar o veículo e como a curva de torque de um motor desse tipo possui um maior torque a baixas rotações, esta configuração é usada em veículos de grande porte. A seguir é mostrado um esquema simplificado de uma configuração em série.

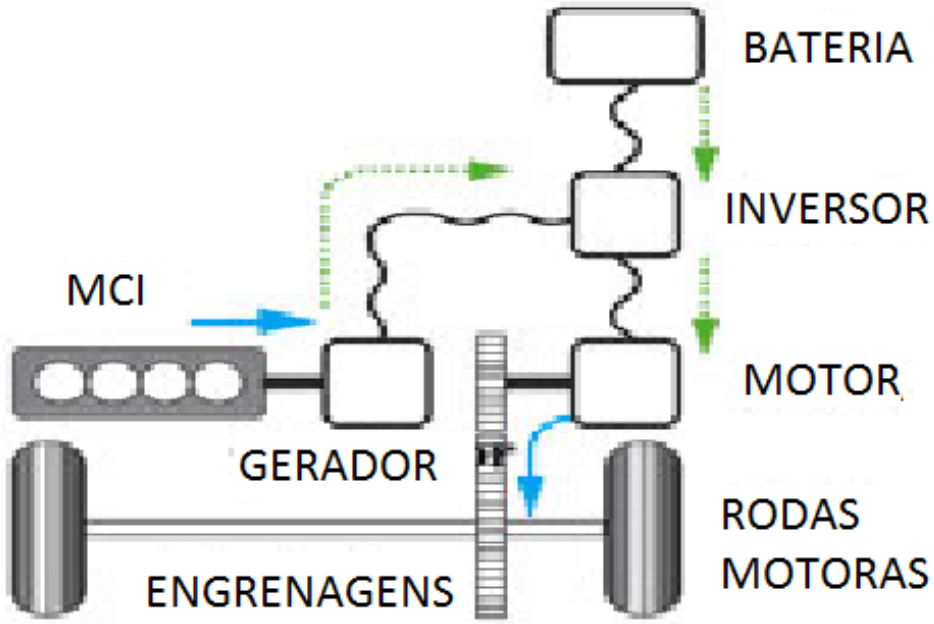


Figura 23. Esquema simplificado de uma configuração em série, retirado de [6]

Supondo que a bateria esteja totalmente carregada, quando o veículo está em baixas velocidades, a bateria fornece energia para o motor elétrico tracionar o veículo. Em situações de aceleração, em que a potência necessária é alta, o motor a combustão fornece energia ao gerador e juntamente com a energia da bateria eles acionam o motor elétrico. Quando o veículo está em cruzeiro, o motor a combustão é o responsável por fornecer a energia necessária para o motor de tração e ao mesmo tempo ele fornece energia para carregar a bateria. Na frenagem, o motor elétrico de tração, que também é gerador, transforma a rotação das rodas em energia para carregar a bateria. É importante observar que a regeneração de energia não ocorre

apenas na frenagem, ela ocorre a partir do momento em que o motorista tira o pé do acelerador.

Na figura a seguir é mostrado um esquema lógico de como funciona um veículo híbrido em série.

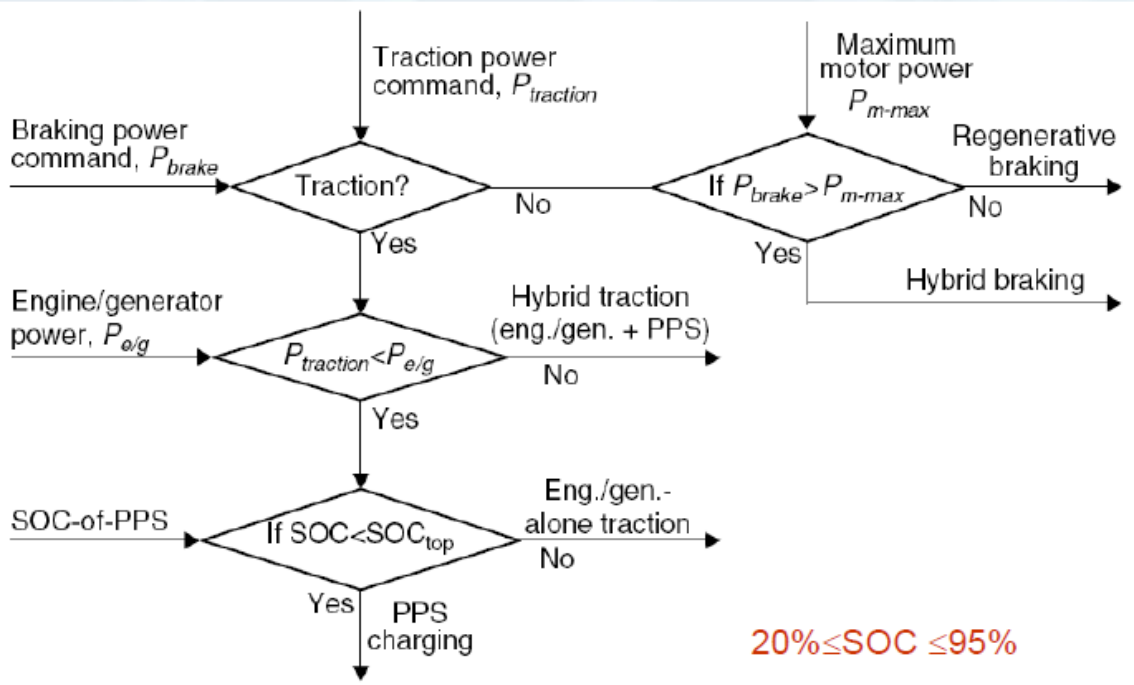


Figura 24. Esquema lógico de um híbrido em série, retirado de [9]

Sendo que SOC (*State of Charge*) é o estado de carga da bateria e PPS (*Peak Power Source*) é o pico de potência que a fonte pode fornecer.

8. Híbrido com configuração Mista

As desvantagens básicas dos sistema em paralelo e do sistema em série levou ao desenvolvimento dos sistemas mistos. Equipado com motores a combustão, máquinas elétricas, componentes de transmissão mecânica, embreagens e freios eles podem assumir diversas formas diferentes. Uma típica configuração presente nesta classe é o uso de um híbrido em série com acoplamento direto do motor à combustão às rodas motrizes.

Tal configuração é caracterizada por apresentar as seguintes vantagens: o motor à combustão deve mover as rodas diretamente enquanto opera sob condições ideais; estágios de transmissão não são necessários. Entre as desvantagens está a alta complexidade do sistema com a correspondente complexidade do controle e alto custo.

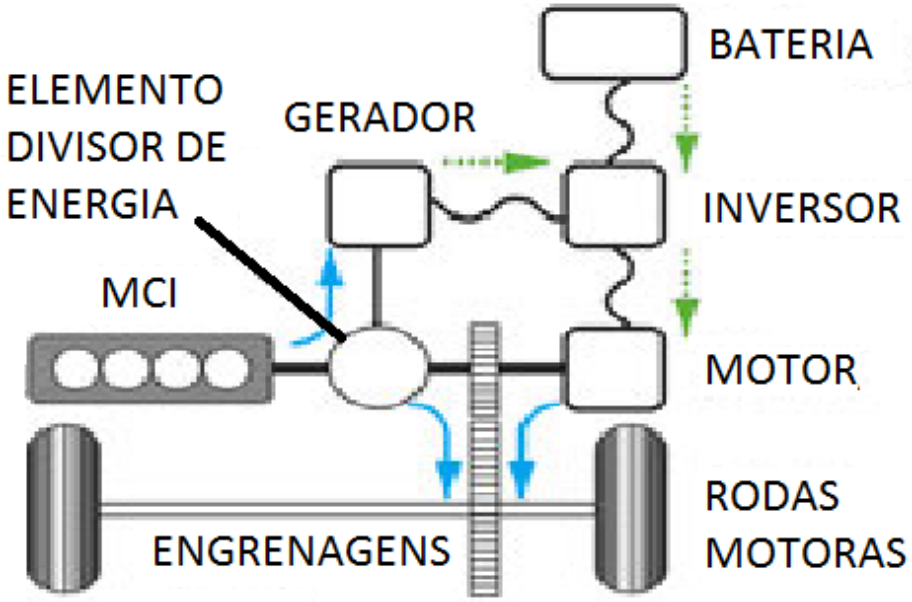


Figura 25. Esquema simplificado de uma configuração mista

9. Requisitos de projeto

O trabalho em questão tem como objetivo escolher a melhor configuração de motores para o projeto de um veículo híbrido para o uso urbano. O carro deve atender as necessidades de um cidadão de uma grande metrópole, ou seja, uma cidade bastante urbanizada e que tenha uma condição de tráfego intensa.

O veículo projetado deve ser um veículo híbrido de passeio com capacidade para duas pessoas e que seja capaz de percorrer diariamente o percurso da casa de seu ocupante até o seu trabalho e o seu trajeto de volta (do trabalho até sua casa).

Quando um consumidor compra um veículo, os atributos que ele mais leva em consideração além de custo e durabilidade são o desempenho e a economia. Desempenho está geralmente relacionado ao tempo de aceleração, velocidade final e tempo de frenagem. A economia refere-se ao consumo de combustível e à emissão de gases poluentes. Assim, o projeto deste trabalho se baseará principalmente nestes atributos.

9.1 Ciclos de condução

É interessante ressaltar neste ponto o que a Comunidade Americana para A Nova Geração de Veículos (US Partneship for a New Generation Vehicle) acredita, através de pesquisas, ser um veículo ideal para a população dos EUA. Para a comunidade, um veículo ideal para o povo americano deve ser para 5 passageiros, pesando menos que 1000 Kg e deve ter uma aceleração de 0 a 60 mph em menos de 12s (2,24 m/s²) como mostra o livro de Miller [7].

Vehicle attribute	Parameter
Acceleration	0 to 60 mph in <12 s
Number of passengers	Up to 6 total occupants
Operating life	$>100\,000$ miles
Range	380 miles on combined cycle
Emissions	Meet or exceed EPA Tier II
Luggage capacity	16.8 ft^3, 91 kg
Recyclability	Up to 80%
Safety	Meets federal motor vehicle safety standards
Utility, comfort, ride and handling	Equivalent to conventional vehicle
Purchase price and operating costs	Equivalent to conventional vehicle, adjusted to present economics

Figura 26. Atributos ideais de acordo com a comunidade americana para um veículo, extraído do livro de Miller [7]

Esta tabela serve como referência para o projeto. Os atributos aqui em questão que devem ser observados para serem tomados como parâmetros são a aceleração e o peso do veículo.

Nos EUA a Agência de Proteção Ambiental (EPA - Environmental Protection Agency) realiza diversos testes para que se consiga estimar as condições de tráfego nas grandes cidades do país. A seguir serão mostrados alguns resultados de testes obtidos pela EPA para que assim se possa estimar os principais parâmetros de projeto.

Details of the EPA City and Highway Driving Cycles Used to Estimate Fuel Economy for 2008 and Subsequent Years

	Old Tests	New Tests			
City	**Highway**	**High Speed**	**Air-Conditioning**	**Cold Temperature**	**Detailed Comparison**
	Test Schedule				
Driving Schedule Attributes	**City**	**Highway**	**High Speed**	**A/C**	**Cold Temperature**
Trip type	Low speeds in stop-and-go urban traffic	Free-flow traffic at highway speeds	Higher speeds; harder acceleration and braking	A/C use under hot ambient conditions	City test w/colder outside temperature
Top speed (mph)	56	60	80	54.8	56
Average speed (mph)	20	48	48	22	20
Maximum acceleration (mph/s)	3.3	3.2	8.46	5.1	3.3
Simulated distance (mi)	11	10	8	3.6	11
Time (min)	31	12.5	10	9.9	31
Stops	23	None	4	5	23
Idling time	18% of time	None	7% of time	19% of time	18% of time
Engine Start-up[a]	Cold	Warm	Warm	Warm	Cold
Lab temperature (°F)		68–86		95	20
Vehicle air-conditioning	Off	Off	Off	On	Off

Notes: The city column is identified as FTP in Table 12.5. Also, the highway column is identified as HFET in Table 12.5.
[a] Vehicle's engine does not reach maximum fuel efficiency until it is warm.

Figura 27. Ciclos de condução da EPA

Da tabela acima, o teste que mais interessa para o projeto em questão é o primeiro, realizado em uma grande cidade com condições de tráfego intenso e de paradas e acelerações. Deste teste obtêm-se diversos valores interessantes como velocidade máxima (90.1 km/h), velocidade média (32,2 km/h) e máxima aceleração (1.47 m/s²).

A seguir é mostrado um ciclo padrão de condução dos EUA, Ásia e Europa retirado de Miller [7].

Region	Cycle	Time idling (%)	Max. speed (kph)	Average speed (kph)	Maximum accl. (m/s^2)
Asia-Pacific	10–15 mode	32.4	70	22.7	0.79
Europe	NEDC	27.3	120	32.2	1.04
NA-city	EPA-city	19.2	91.3	34	1.60
NA-highway	EPA-hwy	0.7	96.2	77.6	1.43
NA-US06	EPA	7.5	129	77.2	3.24
Industry	Real world	20.6	128.6	51	2.80

Figura 28. Ciclo padrão de condução

A partir da tabela acima se percebe que os veículos não atingem velocidades maiores que 90 km/h nas cidades. Em São Paulo, por exemplo, a maior velocidade permitida é de 90 km/h em algumas avenidas e em outras cidades brasileiras o limite é bem próximo deste valor. Assim, o veículo que está sendo projetado não necessita de uma velocidade final muito maior que esta, mas por uma questão de marketing é necessário ter uma velocidade final compatível com a dos carros da atualidade. Assim, será estipulada como referência de projeto uma velocidade final de 120 km/h para o veículo, atendendo então as necessidades urbanas e sendo competitivo no mercado.

Da tabela também se pode retirar os valores de velocidade máxima, velocidade média e de aceleração média no ciclo urbano: Vmáx=91.3, Vmédia=34 km/h e a=1.60 m/s².

Percebe-se também que os veículos passam muito tempo parados no trânsito, no Japão o veículo fica em média 32,4% do tempo parado e na Europa 27,3%. Isso reforça a importância do sistema Start-Stop que desliga o motor quando o carro para no trânsito, gerando uma grande economia de combustível.

A distância diária percorrida também deve ser tomada como um requisito de projeto. O ideal seria que o veículo híbrido que está sendo projetado conseguisse percorrer a distância diária apenas com a energia existente na bateria sem gastar assim combustível líquido. Analisando o paper de Hayashida [8] nota-se que a distância média percorrida diariamente no Japão é de 50 km, como mostra o gráfico a seguir:

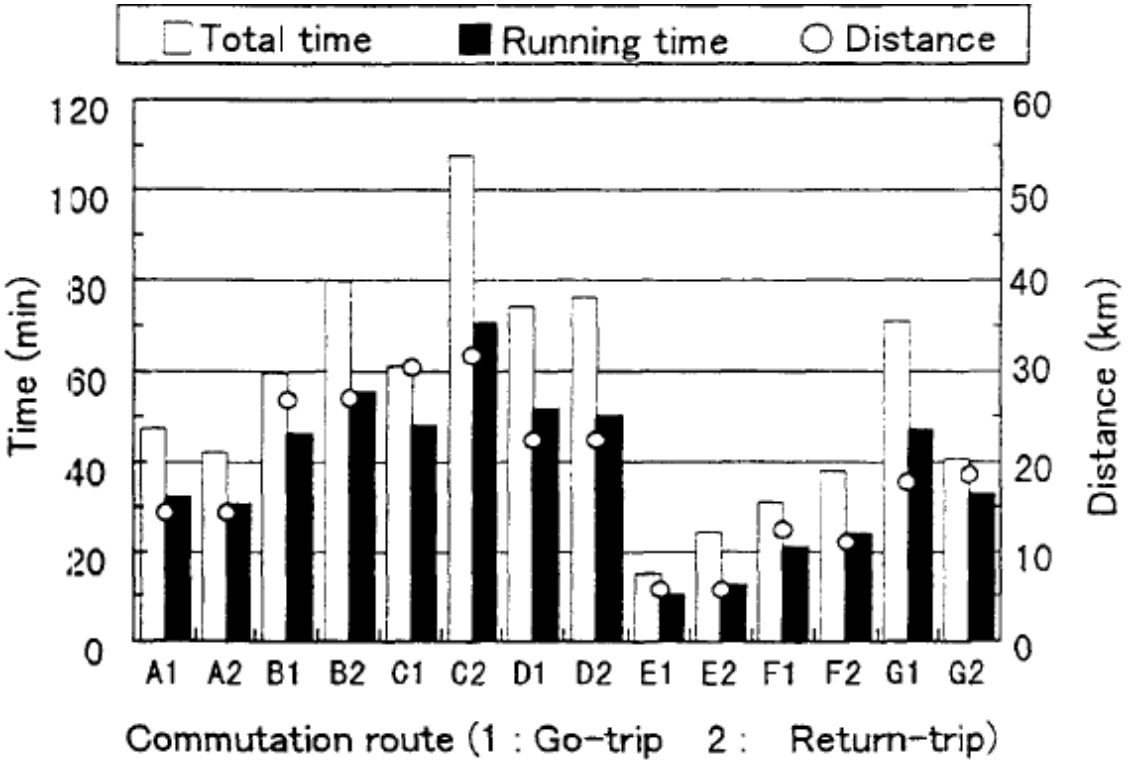


Figura 29. Distância percorrida diariamente no Japão

Com estes dados, espera-se projetar um veículo que consiga percorrer totalmente, ou bem perto disso, a distância diária de 50 km no modo elétrico, sem necessitar do motor a combustão interna.

Miller [7] ainda expõe objetivos de desempenho a serem alcançados por veículos híbridos em seu livro:

Performance target/unit	Target value	Units
0 to 100 mph (161 kph) acceleration time (1)	9.5	s
Passing time 50 mph (80 kph) to 70 mph (112 kph)	5.1	s
Maximum speed	90/145	mph/kph
Grade at 50 mph (80 kph) (2)	7.2	%
Grade at 30 mph (48 kph) (3)	7.2	%
Maximum grade for vehicle launch	33	%
Trailer tow capability	1000	kg

Notes: (1) At 60 SOC on battery
(2) sustained for 15 min
(3) sustained for 30 min

Figura 30. Objetivos de desempenho a serem alcançados por veículos híbridos de acordo com Miller [7]

Por falta de dados locais, serão tomados como base os ciclos de condução de outros países vistos anteriormente, podendo-se então estipular os requisitos de projeto que serão tomados neste trabalho.

A velocidade máxima será de 120 km/h, poderia ser de 90km/h mas por questões de marketing e de atratividade do produto a velocidade será estipulada em 120 km/h. A velocidade média será de 35 km/h já que este foi um valor próximo aos observados nos testes. A aceleração do veículo deve ser de 1.6 m/s². Será assumido também que a distância média percorrida em um grande centro urbano é de 60 km.

Em veículos híbridos, o motor elétrico é o responsável por conduzir o veículo em baixas velocidades devido ao seu alto torque em baixas rotações. Para os veículos híbridos com configuração paralela será assumido que o motor elétrico é o responsável por conduzir o veículo até a velocidade de 35 km/h, após essa velocidade o motor a combustão interna auxiliará o elétrico.

9.2 Estado de carga da bateria

O estado de carga da bateria é mostrado em forma de porcentagem. Ele representa qual a porcentagem de energia disponível na bateria. O estado de carga da bateria é fixado como requisito de projeto, e quando a bateria atingir tal porcentagem ela deve ser carregada, ou seja, a bateria nunca passará desse limite mínimo por questões de segurança e de durabilidade da mesma.

Para o projeto em questão se assumirá um estado de carda da bateria de no mínimo SOC = 30%. De acordo com a seleção do tipo de bateria que será realizado mais adiante, este valor pode ter sua porcentagem diminuída.

9.3 Estimativa de massa e área frontal

O veículo está sendo projetado neste trabalho é de pequeno porte, capacidade de dois ocupantes. O que aumenta o seu tamanho é o espaço necessário para a bateria, assim o veículo aqui sendo projetado deve, em um primeiro momento, se assemelhar ao Mini Cooper. Assim, para os cálculos iniciais, o Mini Cooper será tomado como referência de projeto.

O peso do Mini é de 1000 Kg, sua área frontal é de 2m² e o seu coeficiente de arrasto é de 0,35.

9.4 Requisitos finais

Outros fatores importantes além dos citados anteriormente, mas que não possuem mensuração, são a eficiência, o custo e o peso de seus componentes.

Com todas as observações feitas anteriormente, tem-se então a tabela de requisitos do projeto em questão:

Tabela 2. Requisitos de Projeto

Parâmetro	Valor
Massa	1.000 Kg
Área frontal	2 m²
Coeficiente de arrasto	0,35
Velocidade máxima	120 km/h
Velocidade média	35 km/h
Aceleração	1,60 m/s²
Distância percorrida	50 km
Estado de carga da bateria	30%

9.5 Estimativa dos motores

De acordo com Miller [7] um motor com um desempenho satisfatório deve ter seu pico de potência por volta de 8 kW/100 kg de massa do veículo. Os veículos híbridos conseguem atingir os mesmos padrões de desempenho com o motor a combustão interna somado ao motor elétrico com picos de energia por volta de 6,74 kW/ 100 kg.

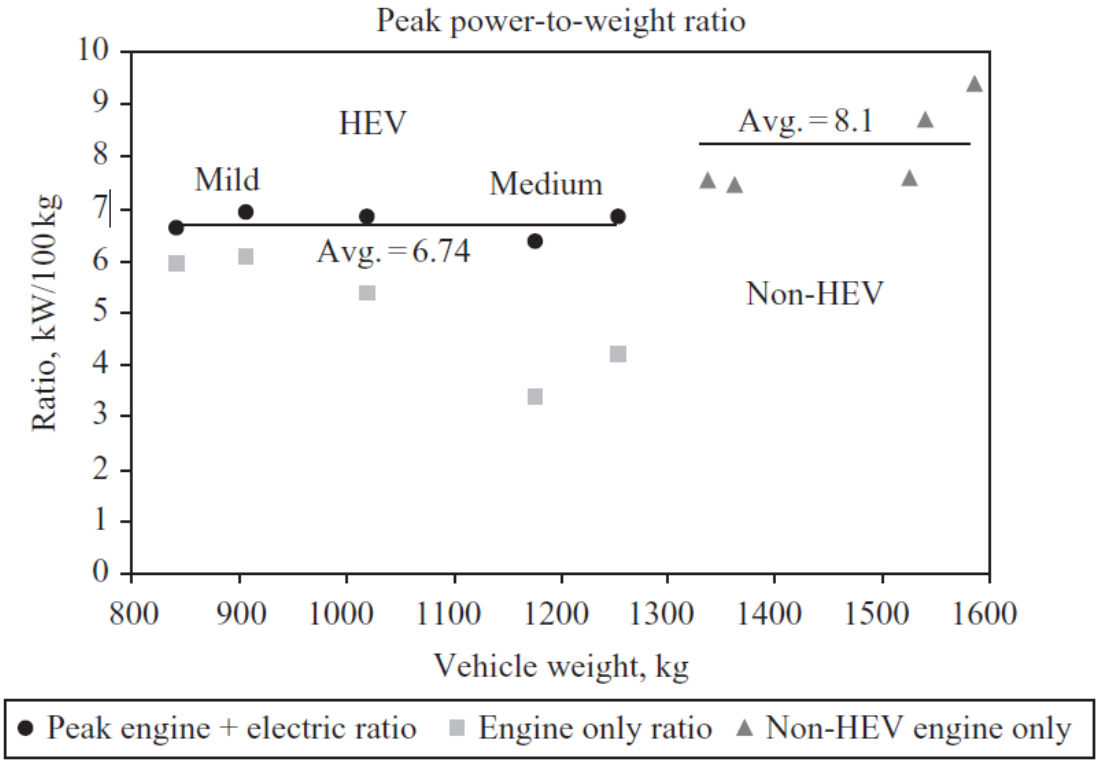


Figura 31. Pico de potência pela massa do veículo (Retirado de Miller [7]

Realizando-se uma estimativa com o Prius, que possui uma massa de 1256 kg e motor a combustão de 52 kW, calcula-se a potência do motor a combustão somado com o motor elétrico:

$$E + P = 6{,}74\ \left(\frac{kW}{100\ kg}\right) x1256 = 84{,}6\ kW$$

De acordo com esta estimativa, o Prius possui uma potência total de 84,6 kW, sendo que o motor a combustão possui 52 kW e o motor elétrico possui 32,6 kW. Hoje em dia os motores a combustão interna apresentam uma eficiência de 50 kW/L, uma redução de 32,6 kW na potência do motor significa uma diminuição de 0,65L no seu tamanho.

10. Princípios básicos dos veículos

10.1 Esforço trativo e velocidade

Um veículo convencional possui, como parte de sua estrutura motora, um motor (elétrico ou a combustão interna), uma engrenagem para transmissões manuais ou um conversor de torque para as automáticas, uma caixa de transmissão, um diferencial, semi-eixos e as rodas movidas. O torque nas rodas é expresso pela equação:

$$T_w = i_g . i_0 . \eta_t . T_p$$

Onde T_p é o torque de saída do motor, η_t é o rendimento do sistema, $i_g = \frac{N_{entrada}}{N_{saída}}$ (N sendo a rotação).

Assim, o esforço trativo aplicado nas rodas é expresso por: $F_t = \frac{T_w}{r_d}$ sendo r_d o raio da roda.

A rotação (RPM) da roda é expressa por: $N_w = \frac{N_p}{i_{g.i_o}}$ sendo N_p a rotação de saída do motor. Assim, a velocidade do veículo é dada por:

$$V = \frac{\pi . N_w . r_d}{30} \text{ (m/s).}$$

10.2 Características dos motores

Os motores comumente usados são os motores elétricos e motores a combustão interna. O motor a combustão interna está longe do desempenho ideal, em baixas rotações ele possui alto torque e baixa potência. Conforme aumenta-se a rotação do motor atinge-se a melhor qualidade da combustão e o máximo torque, com o contínuo aumento da rotação o torque cai devido ao aumento das perdas internas porém a potência aumenta até seu máximo. Geralmente, a máxima rotação permitida de projeto é um pouco antes do ponto de potência máxima.

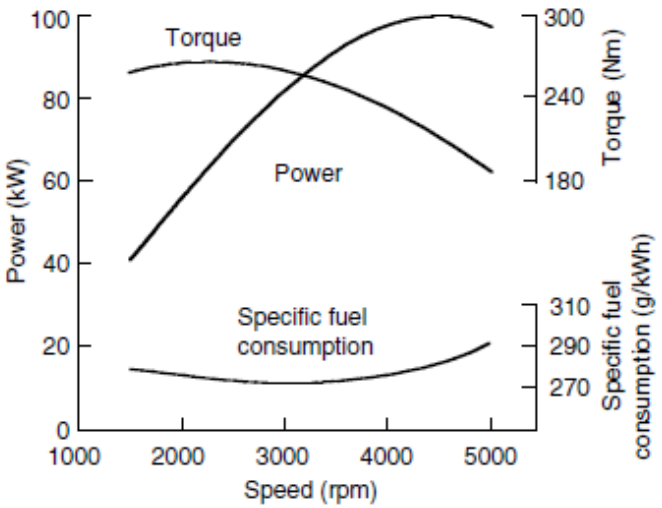


Figura 32. Curva típica de um motor a combustão interna

Em um motor elétrico, a baixas velocidades tem-se um alto torque e a potência vai aumentando gradativamente com a velocidade até o ponto em que a potência se mantém constante independente da velocidade e o torque cai exponencialmente.

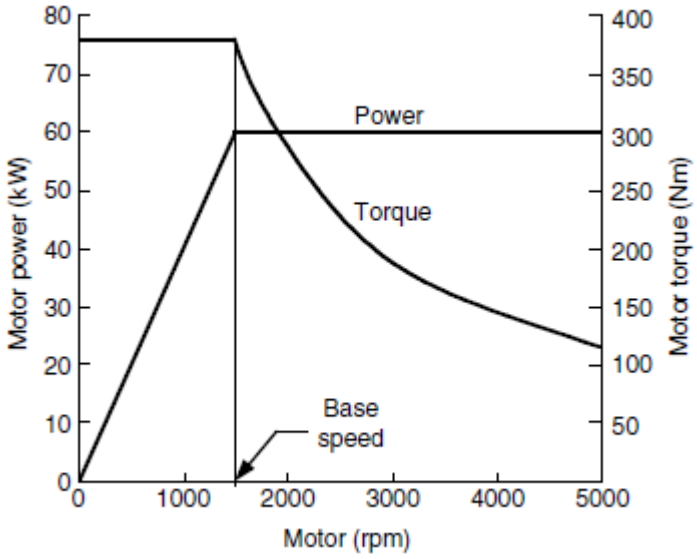


Figura 33. Curva característica de um motor elétrico

10.3 Características da transmissão

Um motor elétrico não precisa de uma transmissão com diversas engrenagens, já um motor a combustão interna precisa ter uma caixa de transmissão ou uma transmissão continuamente variável para multiplicar seu torque a baixas velocidades.

A máxima velocidade de um veículo é o que determina a razão de transmissão da última marcha. Já a razão da primeira marcha é determinada pelo máximo esforço trativo. As razões das marchas entre a maior e a menor devem ser espaçadas de tal

maneira que forneçam uma curva próxima a ideal. Para uma transmissão de quatro marchas, a seguinte relação pode ser estabelecida:

$$\frac{i_{g1}}{i_{g2}} = \frac{i_{g2}}{i_{g3}} = \frac{i_{g3}}{i_{g4}} = K_g$$

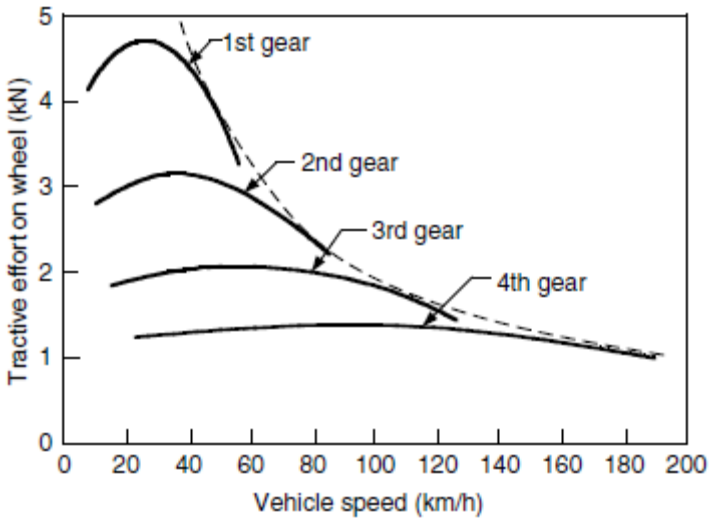


Figura 34. Curva característica de torque de um motor a combustão interna

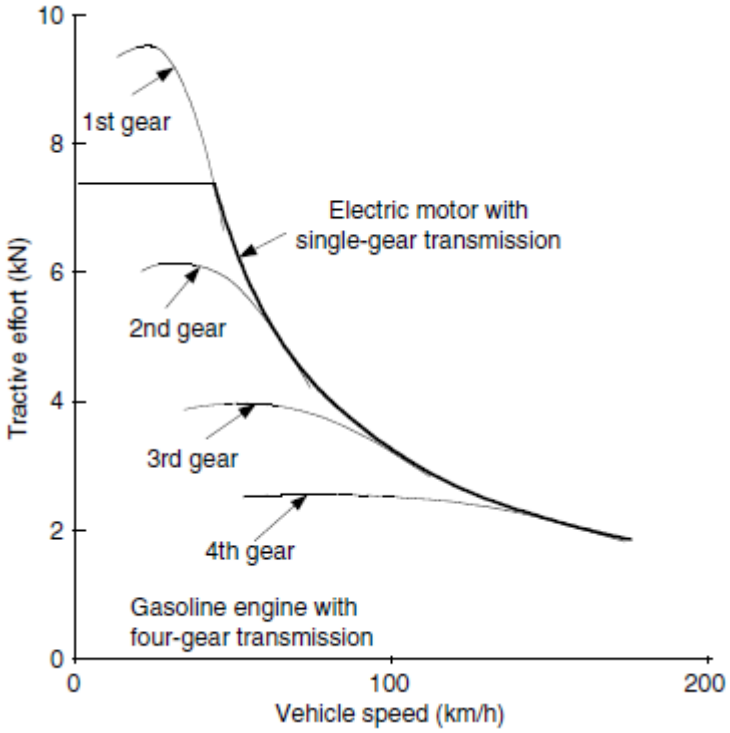


Figura 35. Esforços trativos de um veículo com motor a combustão interna de quatro marchas e de um motor elétrico de apenas uma marcha

10.4 Velocidade máxima de um veículo

A velocidade máxima de um veículo é determinada como velocidade de cruseiro que um veículo pode exercer em máxima potência em uma pista plana. A

intersecção da curva de torque com a curva de resistência fornece a máxima velocidade do veículo.

$$\frac{T_{p.} i_{g.} i_{0.} \eta_t}{r_d} = M_v . g . f_r . cos\alpha + 0{,}5 . \rho_{a.} C_{D.} A_{f.} V^2$$

Alguns veículos não possuem uma intersecção de tais curvas, para eles a máxima velocidade é dada por:

$$V = \frac{\pi . N_w . r_d}{30 . i_0 . i_{gmin}}$$

10.5 Economia de combustível

O consumo de combustível pode ser determinado encontrando-se a potência e o consumo específico de combustível. A potência de saída do motor é igual a potência resistiva do veículo:

$$P_e = \frac{V}{\eta_t} . \left(M_v . g . f_r . cos\alpha + 0{,}5 . \rho_{a.} C_{D.} A_{f.} V^2 + M_v . g . sen\alpha + M_v . \delta . \frac{dV}{dt} \right)$$

A taxa de consumo de combustível pode ser determinada por:

$$Q_{fr} = \frac{P_e . g_e}{1000 . \gamma_f}$$

Sendo g_e o consumo específico e γ_f a densidade mássica do combustível.

11. Projeto de um veículo híbrido em série

O motor a combustão interna está desacoplado das rodas motrizes, assim sua rotação e torque são independentes da velocidade do veículo. Assim, ele pode ser controlado em qualquer ponto de operação, com isso ele é operado na sua região de operação ótima, minimizando o consumo de combustível.

Um híbrido em série possui vários modos de operação, que são selecionados conforme a demanda do veículo. Esses modos são:

- Tração híbrida: quando uma grande quantidade de potência é demandada (o condutor pisa no acelerador até o fim) o motor a combustão interna e a bateria fornecem energia ao motor elétrico. O motor a combustão é operado no seu ponto ótimo e a bateria fornece potencia adicional. Neste caso:

$$P_{demandada} = P_{MCI} + P_{Bateria}$$

- Tração da bateria: neste caso a potência fornecida pela bateria consegue suprir a potência demandada:

$$P_{demandada} = P_{Bateria}$$

- Motor a combustão tracionando: apenas o motor a combustão fornece energia para suprir a potência demandada:

$$P_{demandada} = P_{MCI}$$

- Bateria sendo carregada: quando a energia da bateria for baixa, ela deve ser carregada, seja pelo freio regenerativo ou através do motor a combustão. Assim a potencia do MCI tanto recarrega a bateria como fornece potência ao motor elétrico.

$$P_{demandada} = P_{MCI} - P_{Bateria}$$

11.1Projeto dos principais componentes

Os principais componentes da planta trativa de um veículo híbrido em série são o motor elétrico, o motor a combustão interna e a bateria.

11.1.1 Projeto do Motor Elétrico (Trativo)

A potência do motor elétrico do veículo em série é determinada pelos requisitos de desempenho de aceleração, das características do motor e da transmissão. No início do projeto, a potência pode ser estimada a partir do desempenho da aceleração através da seguinte fórmula (retirada de [9]):

$$P_t = \frac{\delta . M_v}{2 . t_a} . \left({V_f}^2 + {V_b}^2 \right) + \frac{2}{3} . M_v . g . f_r . V_f + \frac{1}{5} \rho_a . C_D . A_f . {V_f}^3$$

Onde:

- M_v é a massa total do veículo;
- δ é o fator de massa, considerando a massa equivalente adicionada pelos momentos angulares dos componentes rotativos;
- t_a é o tempo esperado de aceleração;
- V_f é a velocidade final esperada;
- V_b é a velocidade base do motor como é mostrada na figura abaixo;
- f_r é a resistência ao rolamento;
- ρ_a é a densidade do ar;
- C_D é o coeficiente aerodinâmico;
- A_f é a área frontal.

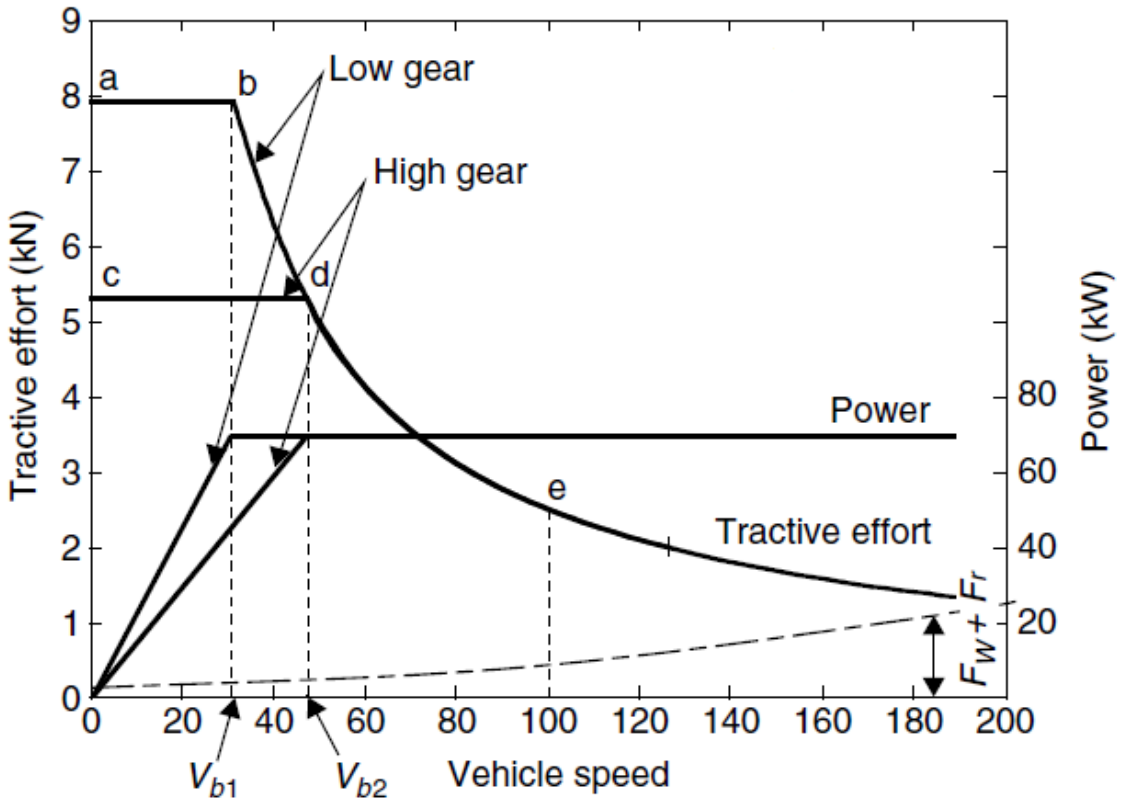


Figura 36. Curva de esforço trativo de um motor elétrico

O veículo projetado neste projeto terá características semelhantes ao Mini Cooper, assim, para se realizar os cálculos de estimativas de potência dos motores será utilizado os dados dinâmicos do Mini Cooper:

$$M_V = 1.000\ kg;\ C_D = 0{,}35;\ A_f = 2\ m^2$$

Foi considerado ainda que $f_r = 0{,}01; \delta = 1{,}04$ e que a densidade do ar é de $\rho_a = 1{,}205\ kg/m^3$. Com $V_f = 100\frac{km}{h}\ e\ V_b = 40\frac{km}{h}$ e considerando-se a aceleração de 0-100 km/h em 12 segundos obteve-se que a potência do motor elétrico é de 46 kW.

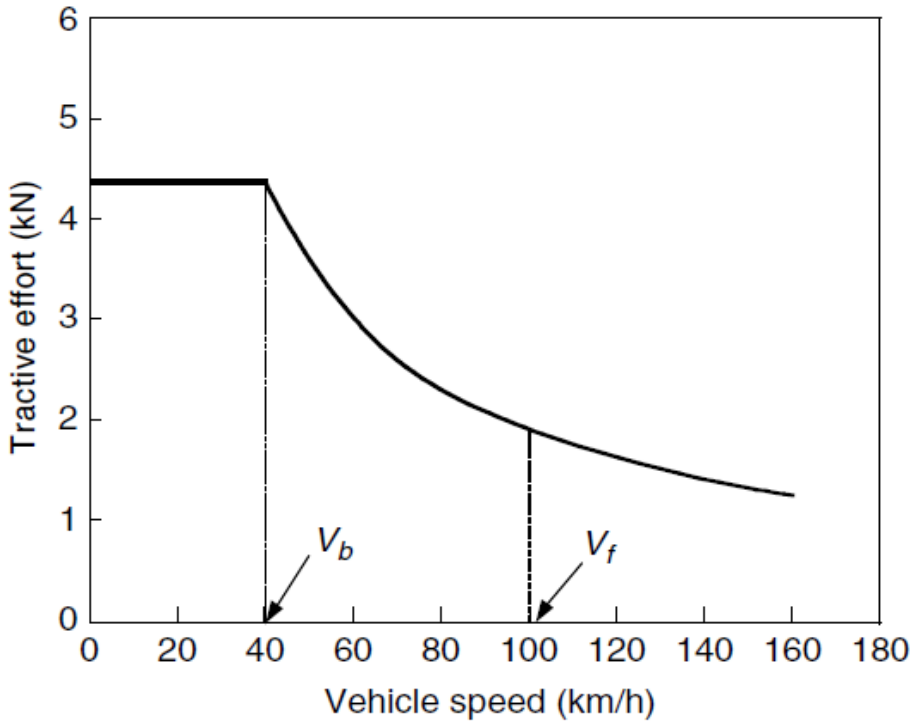


Figura 37. Curva do motor elétrico usado para exemplificação dos cálculos

11.1.2 Projeto do Motor a Combustão

Como visto anteriormente, o motor a combustão interna em um veículo em série é usado para suprir as necessidades do veículo, impedindo que a bateria seja descarregada completamente. Para o seu projeto, deve-se considerar duas condições de operação: veículo em cruzeiro com velocidade constante e veículo em condições de aceleração e parada, como no trânsito dentro de cidades.

Para a condição do veículo em cruzeiro, a potência do motor á combustão interna deve ser de acordo com [9]:

$$P_e = \frac{V}{1000.\eta_t.\eta_m}.\left(M_V.g.f_r + 0{,}5.\rho_a.C_D.A_f.V^2\right) = 24{,}7\ kW$$

Paro o Mini Cooper, considerando $\eta_t = 0{,}9\ e\ \eta_m = 0{,}85$ tem-se que a potência demandada pelo motor seria de 24,7 kW para uma velocidade constante de 120 km/h. Com a potência de 24,7 kW do motor, é possível manter o veículo a uma velocidade constante de 83 km/h em uma pista com inclinação de 5%, como mostram os dados e o gráfico a seguir:

- Para uma pista plana:

V (km/h)	0	5	10	15	20	25	30	35	40
Pot (kW)	0	0,179582	0,368026	0,574194	0,80695	1,075155	1,387671	1,753361	2,181088

V (km/h)	45	50	55	60	65	70	75	80
Pot (kW)	2,679713	3,258099	3,925108	4,689603	5,560446	6,546498	7,656624	8,899684

V (km/h)	85	90	95	100	105	110	115	120
Pot (kW)	10,28454	11,82006	13,5151	15,37852	17,41919	19,64596	22,06771	24,69329

- Para uma pista com inclinação de 5%:

V (km/h)	0	5	10	15	20	25	30	35	40
Pot (kW)	0	1,070105	2,149071	3,245763	4,369041	5,527769	6,730808	7,987021	9,305271

V (km/h)	45	50	55	60	65	70	75	80
Pot (kW)	10,69442	12,16333	13,72086	15,37588	17,13724	19,01382	21,01447	23,14805

V (km/h)	85	90	95	100	105	110	115	120
Pot (kW)	25,42343	27,84947	30,43503	33,18898	36,12017	39,23747	42,54974	46,06584

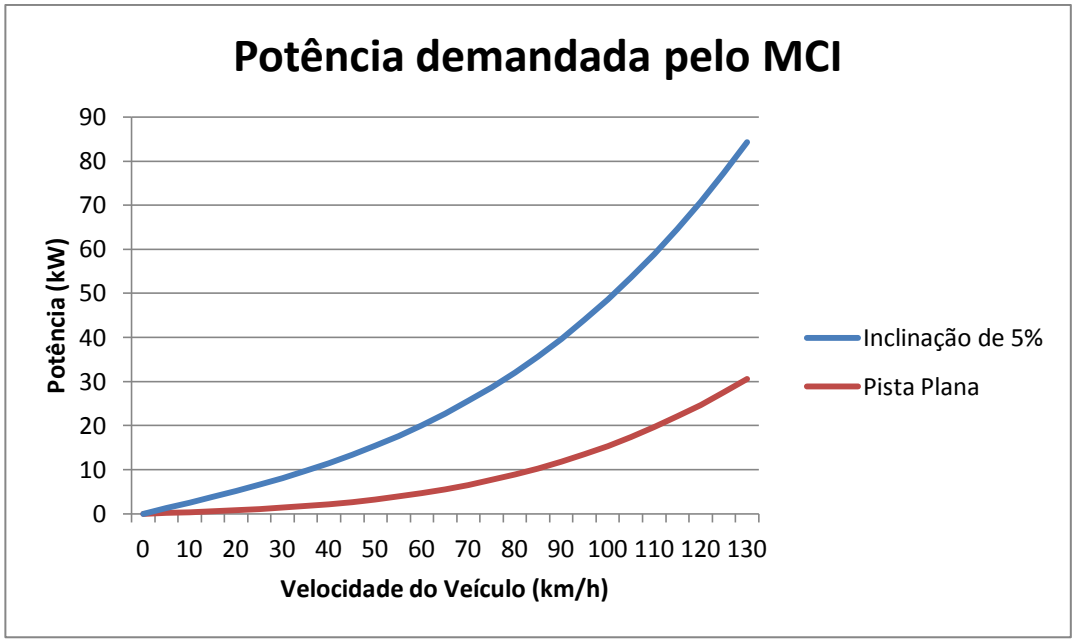


Figura 38. Curvas de potência do MCI

Na condição de aceleração e parada (que é o escopo deste projeto) o motor a combustão deve produzir energia suficiente para manter a carga da bateria para que seja possível transmitir energia suficiente em momentos de aceleração. Assim, a potência média pode ser expressa por:

$$P_{média} = \frac{1}{T}\int_0^T \left(M_v.g.f_r + \frac{1}{2}.\rho_a.C_D.A_f.V^2\right).Vdt + \frac{1}{T}.\int_0^T \delta.M_v.\frac{dV}{dt}dt$$

Onde δ é o fator de massa e $^{dV}/_{dt}$ é a aceleração do veículo. O primeiro termo da equação é a potência consumida para se superar a resistência ao rolamento e a força aerodinâmica. O segundo termo é a potência consumida na aceleração e desaceleração. Se o veículo possuir um meio de recuperar toda a energia cinética, esse segundo termo será igual a zero.

No projeto, alguns ciclos de operação em regiões urbanas podem ser usados para se prever a potência média do veículo, por questões de projeto, a potência fornecida pelo motor deve ser maior que a potência média de tais ciclos, alguns ciclos são mostrados a seguir:

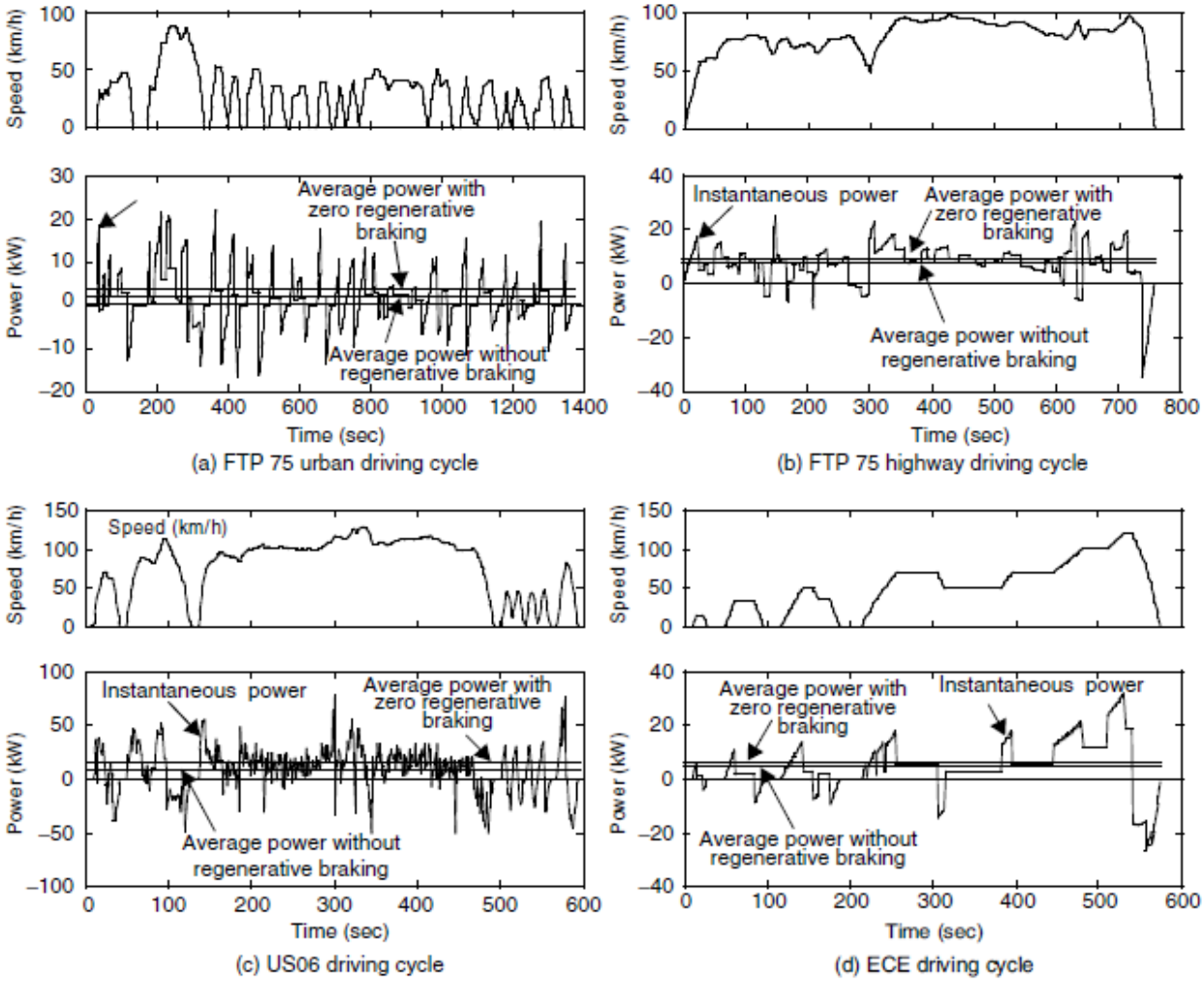


Figura 39. Ciclos Urbanos

Destes ciclos urbanos podemos filtrar as velocidades máximas, as velocidades médias, as potências médias com total recuperação de energia através da frenagem e sem nenhuma recuperação.

Tabela 3. Valores de referência dos ciclos urbanos

	Max. Speed (km/h)	Average Speed (km/h)	Average Power with Full Regen. Braking (kW)	Average Power with No Regen. Braking (kW)
FTP 75 urban	86.4	27.9	3.76	4.97
FTP 75 highway	97.7	79.6	12.6	14.1
US06	128	77.4	18.3	23.0
ECE-1	120	49.8	7.89	9.32

Como se pode observar, com o motor tendo uma potência de 24,7 kW ele irá possuir uma potência maior que a média de qualquer ciclo urbano mostrado acima, atendendo assim aos requisitos de projeto.

11.1.3 Projeto da Bateria

Primeiramente deve-se estimar a potência máxima que a bateria é capaz de fornecer ao motor elétrico. Tal potência deve ser igual ou maior do que a potência do motor elétrico:

$$P_{MaxBat} \geq \frac{P_{m,max}}{\eta_m} - P_{MCI}$$

Onde $P_{m,max}$ é a potência máxima do motor, η_m é a eficiência do motor e P_{MCI} é a potência do motor a combustão interna. Assim temos que:

$$P_{MaxBat} = \frac{54}{0{,}85} - 24{,}7.0{,}9 = 41{,}3\ kW$$

A capacidade de energia do PPS (Peak Power Source) depende do ciclo de condução adotado. Neste projeto, já que a capacidade de potência do motor elétrico é muito maior que a média da carga a estratégia de controle de motor ligado-desligado é apropriada. Assim, estabelecendo-se a variação do PPS em 0.5 kWh e que os limites de SOC são de 0.3 até 0.6 tem-se que a energia total acumulada no PPS é de:

$$E_{PPS} = \frac{\Delta E_{max}}{\Delta SOC} = \frac{0.5}{0.3} = 1.7\ kWh$$

De acordo com [13], o alcance do veículo utilizando apenas a bateria como sua fonte primária de energia é dada por:

$$R = \frac{VE_B}{P_R}$$

Sendo V a velocidade, Eb a energia da bateria e Pr é a potência necessária para mover o veículo. Como foi dito anteriormente, o alcance do veículo deve ser de 50 km, e supondo uma velocidade de 35 km/h temos que Pr=1,75 kW e, assim Eb deve ser de 2,5 kWh. Assim o Epps da bateria deve ser de 2,5 kWh.

12. Projeto de um Veículo Híbrido Paralelo

Diferentemente da configuração em série, a configuração em paralelo permite que tanto o motor a combustão interna quanto o motor elétrico tracionem o veículo. As maiores vantagens desta configuração em relação à configuração em série são: (1) não é necessário o uso de um gerador; (2) o motor de tração é menor; (3) não há diversas conversões da potência do motor a combustão até as rodas girantes.

Há diversas possibilidades de configurações de um veículo híbrido paralelo. O projeto para uma particular configuração talvez não seja aplicável a outra, e assim os resultados esperados irão diferir. Aqui será dado um enfoque no projeto de uma configuração em paralelo com acoplador de torque, na qual o motor a combustão interna deve suprir a demanda de energia a uma velocidade constante em uma pista sem ou com pouca inclinação, ou deve suprir a energia média demandada em um percurso de parada e aceleração (trânsito), enquanto o motor elétrico deve suprir os picos de potência demandados.

Nesta configuração, a potência média do motor a combustão será menor que a do motor elétrico.

9.1 Projeto dos principais componentes

Os parâmetros do powertrain como potência do motor a combustão, potência do motor elétrico, relações de engrenagem da transmissão e potência e capacidade energética da bateria são os parâmetros chaves.

9.1.1 Projeto do motor a combustão interna

Como mencionado anteriormente, o motor a combustão deve suprir a demanda de energia a velocidades constantes tanto em pista inclinada como em pista sem inclinação sem o auxilio da potência fornecida pela bateria. Ao mesmo tempo, tal motor deve ser capaz de fornecer mais potência do que a potência média demandada em um percurso de parada e aceleração, ou seja, no trânsito.

Para o primeiro tipo de operação a potência necessária é:

$$P_e = \frac{V}{1000.\eta_{t,e}}.\left(M_V.g.f_r + 0{,}5.\rho_a.C_D.A_f.V^2 + M_v.g.sen\alpha\right)$$

Sendo $\eta_{t,e}$ a eficiência da transmissão do motor até as rodas movidas.

O projeto em questão visa a construção de um carro leve e de pequeno porte, para uso urbano. Assim, o veículo Mini Cooper é uma referência a este projeto, pois ele seria um dos seus principais concorrentes. Calculou-se então a potência necessária para o Mini, que tem as seguintes características:

$$M_V = 1.000\ kg;\ C_D = 0{,}35;\ A_f = 2\ m^2$$

Foi considerado ainda que $\eta_{t,e} = 0{,}9;\ f_r = 0{,}01$ e que a densidade do ar é de $\rho_a = 1{,}205\ kg/m^3$. Com isso obteve-se os seguintes dados:

- Para uma pista plana:

V (km/h)	0	5	10	15	20	25	30	35	40
Pot (kW)	0	0,152644	0,312822	0,488065	0,685907	0,913881	1,17952	1,490357	1,853925

V (km/h)	45	50	55	60	65	70	75	80
Pot (kW)	2,277756	2,769384	3,336342	3,986163	4,726379	5,564524	6,50813	7,564731

V (km/h)	85	90	95	100	105	110	115	120
Pot (kW)	8,74186	10,04705	11,48783	13,07174	14,80631	16,69907	18,75756	20,9893

- Para uma pista com inclinação de 5%:

V (km/h)	0	5	10	15	20	25	30	35	40
Pot (kW)	0	0,909589	1,826711	2,758898	3,713685	4,698604	5,721187	6,788968	7,90948

V (km/h)	45	50	55	60	65	70	75	80
Pot (kW)	9,090256	10,33883	11,66273	13,0695	14,56666	16,16175	17,8623	19,67584

V (km/h)	85	90	95	100	105	110	115	120
Pot (kW)	21,60992	23,67205	25,86978	28,21063	30,70214	33,35185	36,16728	39,15597

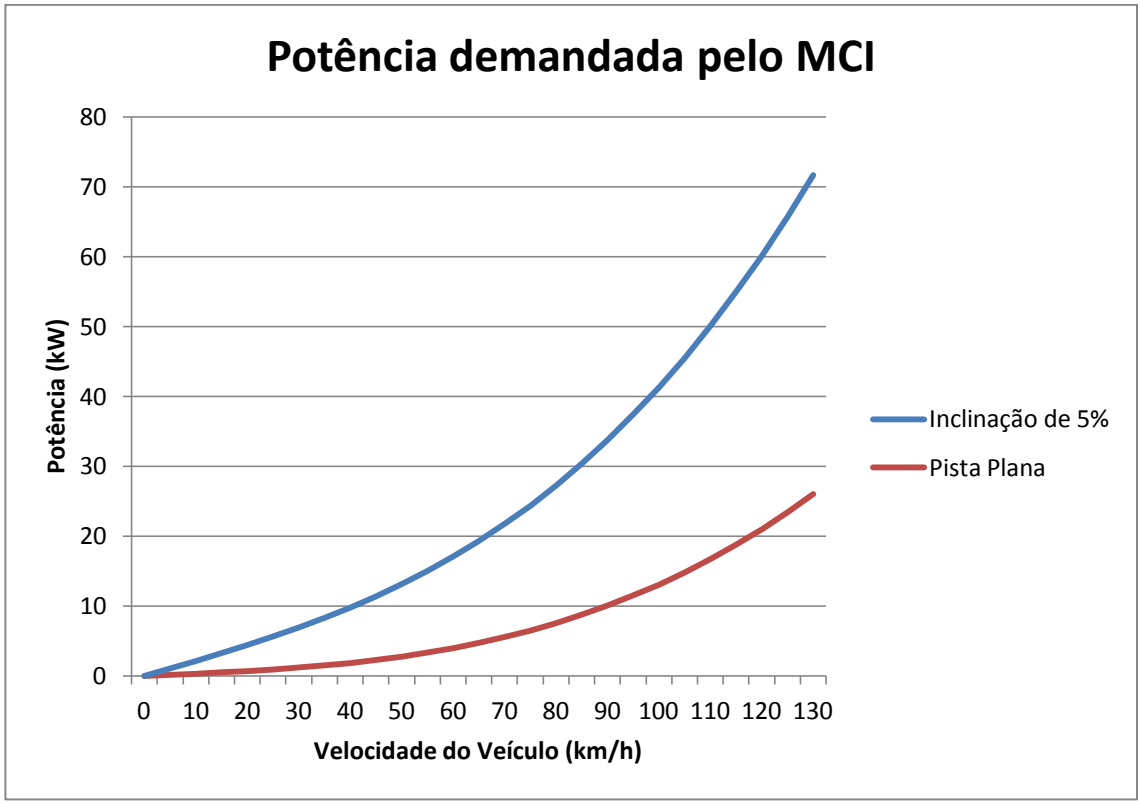


Figura 40. Curvas de potência do MCI

A partir dos dados acima, observa-se que em uma pista plana a 120 km/h o MCI demandará uma potência de 21 kW. O ideal seria cruzar tal gráfico com o gráfico de potência do motor para ver o ponto de cruzamento entre as curvas estabelecendo-se o ponto ideal de aplicação. Mas realizando-se uma estimativa, para a mesma potência (21 kW) o veículo conseguiria andar em uma pista com inclinação de 5% a uma velocidade de aproximadamente 80 km/h.

O motor também deve suprir a demanda de uma operação de parada e aceleração, a potência média do veículo pode ser calculada por:

$$P_{médio} = \frac{1}{T}.\int_0^T \left(M_V.g.f_r.V + 0{,}5.\rho_a.C_D.A_f.V^3 + \delta.M_v.V.\frac{dV}{dt}\right)dt$$

Tal potência média varia com o grau de regeneração de frenagem. Os dois casos extremos são a total regeneração e regeneração zero. A regeneração total recupera toda a energia consumida na frenagem e, assim, a potência média pode ser calculada pela fórmula acima.

Na configuração em paralelo o motor a combustão está acoplado mecanicamente às rodas movidas. Assim, a velocidade de rotação do motor varia com a velocidade do veículo. Ainda sabemos que a potência do motor com o pedal totalmente acionado varia com a rotação do motor. Assim, a determinação da potência do motor que deve suprir a demanda de potência média em um ciclo de operação urbano não é tão direta quanto na configuração em série. A potência média que o motor pode fornecer a toda carga pode ser calculada por:

$$P_{máx-média} = \frac{1}{T}.\int_0^T P_e(v)dt$$

Onde T é o tempo total em ciclos de operação e $P_e(v)$ é a potência do motor a plena carga, que é uma função da velocidade do veículo a uma dada relação de transmissão.

Aqui, assim como no projeto de um veículo em série, se deve comparar a potência requerida para velocidade constante em pista plana com as potências médias demandadas nos ciclos urbanos. Como já foi visto, para o ciclo urbano US06 sem regeneração de energia de frenagem a potência média é de 23 kW, maior que a potência encontrada para o MCI. Como este projeto refere-se a um veículo totalmente híbrido, a regeneração por frenagem será usada como fator de projeto e a potência encontrada de 21 kW para o MCI atende a todos os requisitos de projeto.

9.1.2 Projeto do motor elétrico

A função principal do motor elétrico é suprir a demanda de pico de potência. O desempenho de aceleração é uma das principais preocupações neste caso.

Seria difícil projetar o motor diretamente das especificações de aceleração, assim, é necessário primeiro fazer uma boa estimativa baseando-se nas especificações de aceleração. Uma boa estimativa inicial é assumir que a resistência ao rolamento e o arrasto aerodinâmico são vencidos pelo motor a combustão interna e que as cargas dinâmicas (carga inercial na aceleração) são vencidas pelo motor elétrico. Assumindo isto, a aceleração é diretamente relacionada ao torque de saída do motor elétrico:

$$\frac{T_m . i_{t,m} . \eta_{t,m}}{r} = \delta_m . M_v . \frac{dV}{dt}$$

Onde Tm é o torque do motor. O motor elétrico deve acelerar o veículo sozinho desde a sua partida até a velocidade de 35 km/h como foi especificado anteriormente, após esta velocidade o MCI auxiliará o motor elétrico. Usando um tempo de aceleração especificado, t_a, de zero até a velocidade final, V_f, e utilizando-se de equações anteriores temos:

$$P_{elétrico} = \frac{\delta_m . M_v}{2 . \eta_{t,m} . t_a} . \left({V_f}^2 + {V_0}^2 \right)$$

Usando as características do motor elétrico mostrados na figura abaixo, com $V_f = 100\ km/h\ e\ V_b = 40\ km/h$, e utilizando-se o Mini Cooper como referência, com peso de 1000 kg e tempo de aceleração de 0-100 km/h de $t_a = 12\ s$. Adotando-se ainda $\delta_m = 1{,}04$ a potência do motor elétrico demandada será de:

$$P_{elétrico} = \frac{1{,}04.1000}{2.0{,}95.12.1000} . (100^2 + 40^2) = 41kW$$

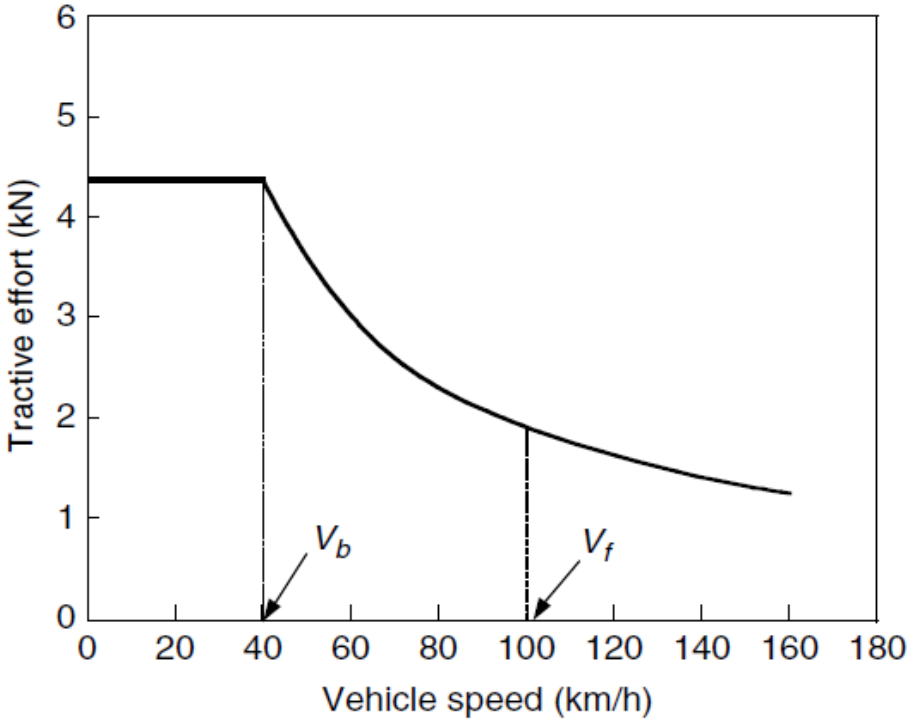


Figura 41. Curva do esforço trativo do motor elétrico usado para exemplificação dos cálculos

A potência acima estará sobreestimada já que o motor a combustão interna possui ainda energia para auxiliar na aceleração do veículo, o que diminuiria a potência necessária advinda do motor elétrico.

Estimou-se ainda o motor elétrico de uma segunda maneira. Sabendo que o motor elétrico será o responsável por acelerar o veículo quando o mesmo encontra-se parado e que ele será responsável por conduzir o veículo até uma velocidade de 35 km/h temos a seguinte fórmula, com $V_f = 100\ km/h\ e\ V_{f2} = 35 km/h$, com os outros valores permanecendo os mesmos de antes:

$$P_t = \frac{\delta . M_v}{2 . t_a} . \left({V_f}^2 + {V_b}^2 \right) + \frac{2}{3} . M_v . g . f_r . V_{f2} + \frac{1}{5} \rho_a . C_D . A_f . {V_{f2}}^3$$

$$P_t = 39{,}5\ kW$$

Conclui-se então que um motor elétrico de 41 kW atenderá a demanda para a configuração em paralelo e com os requisitos previamente comentados.

9.1.3 Projeto da bateria

A potência que a bateria deve ser capaz de fornecer ao motor elétrico deve ser maior que a potência demandada pelo motor elétrico, assim temos:

$$P_{MaxBat} \geq \frac{P_{m,max}}{\eta_m} = 57\ kW$$

De acordo com o ciclo de condução FTP 75, a máxima alteração de energia na bateria é de cerca de 0.11 kWh, que é menor que em máxima aceleração (0.3 kWh). Definindo que a 20% do total da energia da bateria é permitido ser usado. Assim temos que:

$$E_{CS} = \frac{E_D}{SOC_t - SOC_b} = \frac{0{,}3}{0{,}2} = 1{,}5\ kWh$$

De acordo com [13], o alcance do veículo utilizando apenas a bateria como sua fonte primária de energia é dada por:

$$R = \frac{VE_B}{P_R}$$

Sendo V a velocidade, Eb a energia da bateria e Pr é a potência necessária para mover o veículo. Como foi dito anteriormente, o alcance do veículo deve ser de 50 km, e supondo uma velocidade de 35 km/h temos que Pr=1,75 kW e, assim Eb deve ser de 2,5 kWh. Assim o Epps da bateria deve ser de 2,5 kWh.

13. Seleção da Configuração do Powertrain

Foram apresentadas nos capítulos anteriores as configurações de powertrain mais utilizadas nos veículos híbridos atualmente. No caso da configuração em série, existe basicamente apenas uma opção de configuração. Para a configuração em paralelo a gama de opções aumenta muito, tendo o projetista diversas opções de configuração.

No capítulo anterior, foram realizados diversos cálculos para se estimar a potência necessária do motor a combustão interna, do motor elétrico e da bateria para as configurações em série e em paralelo. A configuração em paralelo possui diversas opções de planta, no capítulo anterior, para se ter uma base comparativa, calculou-se para a configuração em paralelo que possui acoplador de torque. Neste caso, o motor elétrico foi mensurado de tal forma a suprir a demanda de energia no trecho urbano ou os picos de potência e o motor a combustão foi mensurado para ser um complemento do motor elétrico quando necessário e para suprir a demanda quando o veículo se move a uma velocidade constante em uma pista plana. Deste modo, tem-se uma base de comparação e se consegue selecionar a melhor configuração.

Nas imagens a seguir, serão mostradas as opções de configurações, já analisadas anteriormente, que serão comparadas e dentre elas será escolhida a que melhor atenda aos requisitos deste projeto.

- Configuração em Série:

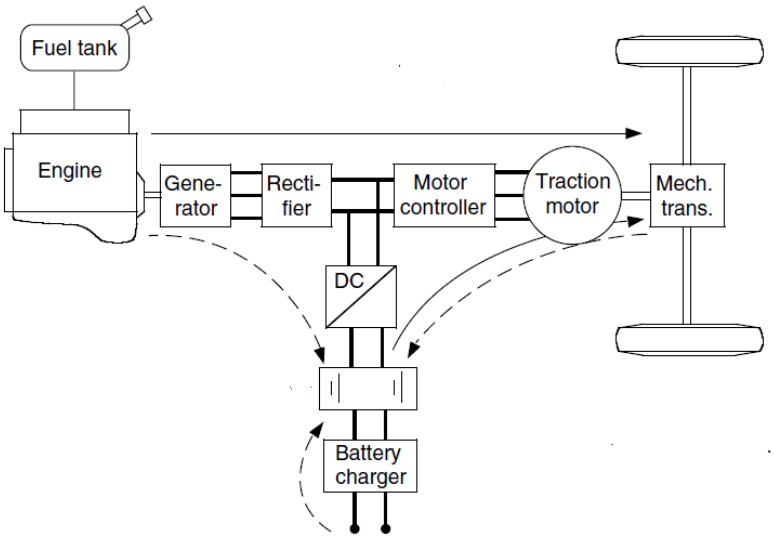
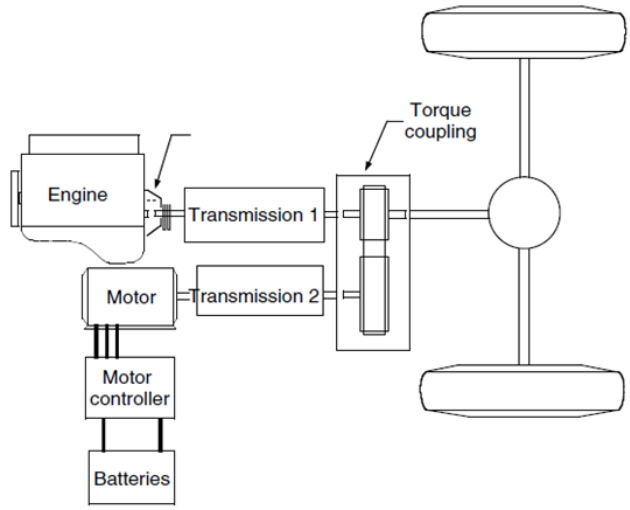
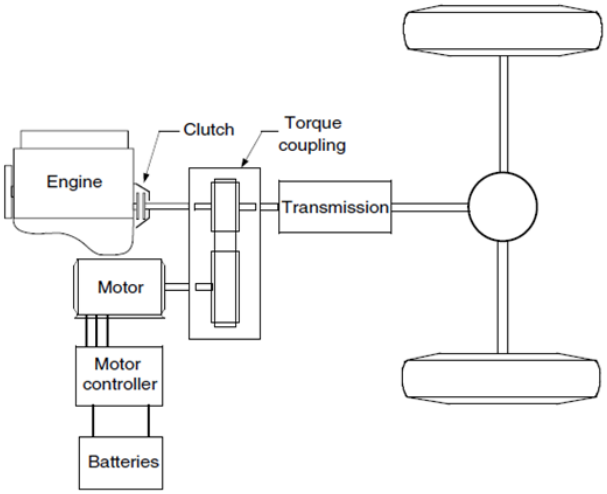


Figura 42. Configuração de um veículo híbrido em série

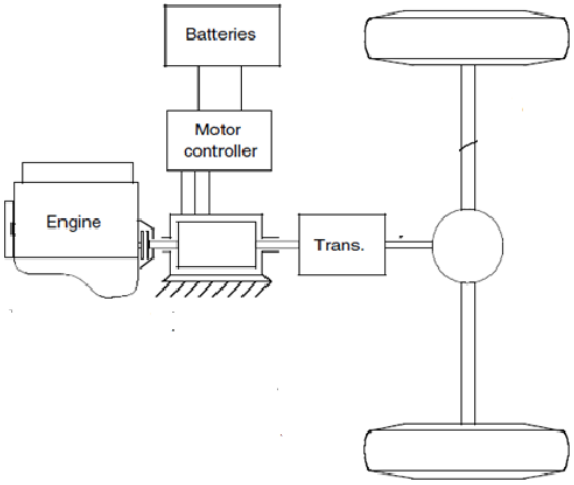
- Configuração em Paralelo – Com acoplador de torque:



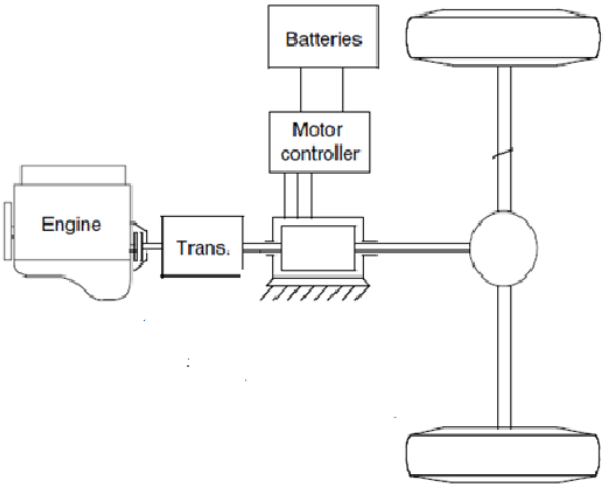
(a) Paralela com dois eixos e e duas transmissões



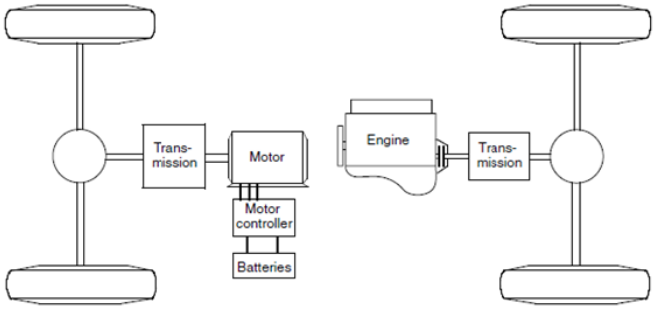
(b) Paralela com dois eixos e uma única transmissão



(c) Paralela com um eixo e o motor elétrico sendo usado como acoplador de torque - única transmissão após o motor



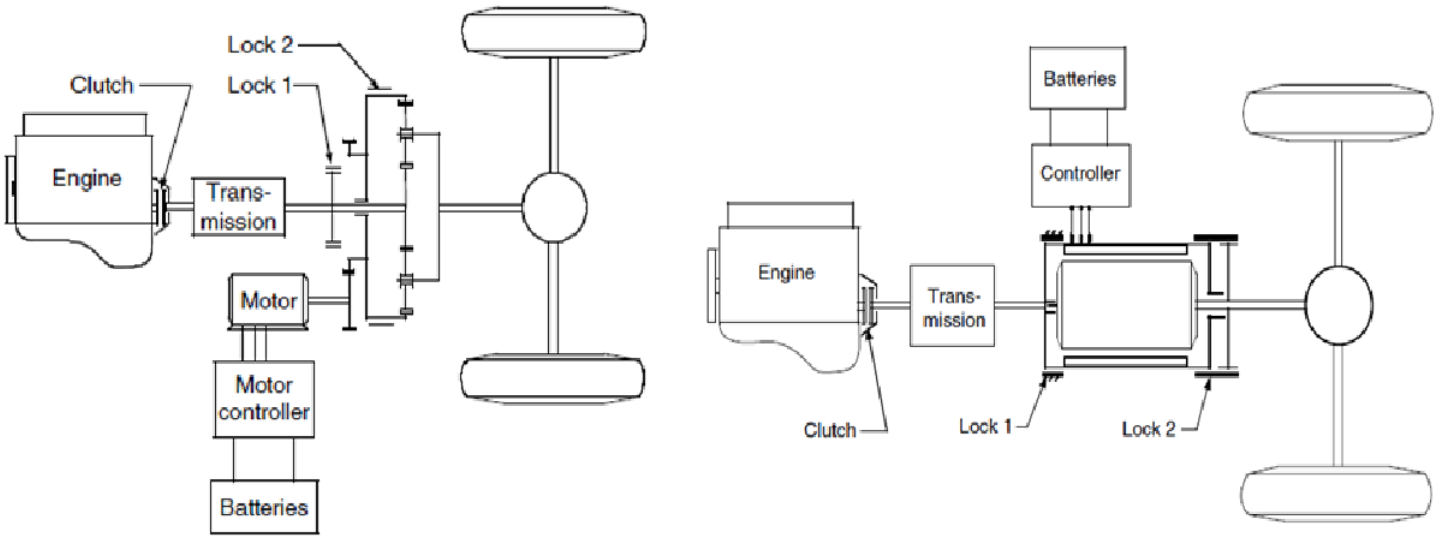
(d) Paralela com um eixo e o motor elétrico sendo usado como acoplador de torque - única transmissão antes do motor



(e) Paralelo com dois eixos separados

Figura 43. Configurações em paralelo com acoplador de torque

- Configuração em Paralelo – com acoplador de velocidades:

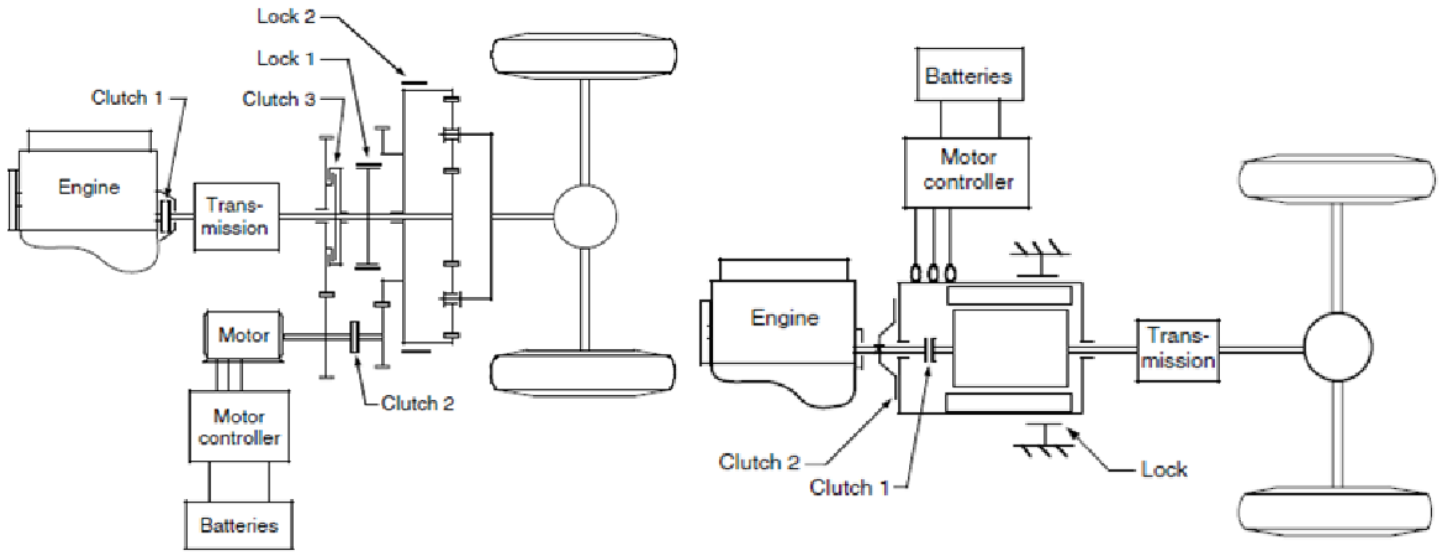


(a) Paralela com Planetária

(b) Paralela com o motor elétrico sendo usado como acoplador de velocidade

Figura 44.Configurações em paralelo com acoplador de velocidade

- Configuração em Paralelo – com acoplador de velocidades e de torque:



(a) Paralela com acoplador de torque e velocidade

(b) Paralela com motor elétrico sendo usado como acoplador de torque e de velocidade

Figura 45.Configurações em paralelo com acoplador de torque e de velocidade

Para ficar mais fácil a montagem da matriz de decisão, as possíveis configurações serão numeradas:

- Opção 1: Configuração em Série (fig. 41);

- Opção 2: Configuração em paralelo com acoplador de torque com dois eixos e duas transmissões (fig. 42 a);
- Opção 3: Configuração em paralelo com acoplador de torque com dois eixos e uma única transmissão (fig. 42 b);
- Opção 4: Configuração em paralelo com acoplador de torque com um eixo e o motor elétrico funcionando como acoplador (fig. 42 c);
- Opção 5: Configuração em paralelo com acoplador de torque com um eixo e o motor elétrico funcionando como acoplador e com um única transmissão antes do motor (fig. 42 d);
- Opção 6: Configuração em paralelo com acoplador de torque com dois eixos separados (fig. 43 e);
- Opção 7: Configuração em paralelo com acoplador de velocidade com uma planetária (fig. 43 a);
- Opção 8: Configuração em paralelo com acoplador de velocidade com um motor elétrico funcionando como acoplador (fig. 43 b);
- Opção 9: Configuração em paralelo com acoplador de torque e de velocidade (fig. 44 a);
- Opção 10: Configuração em paralelo com acoplador de torque e de velocidade com um motor elétrico funcionando como acoplador (fig. 44 b);

Com todas as opções ilustradas, agora é possível se montar a matriz de decisão com base nos requisitos de projeto. Antes de montá-la serão apresentados os critérios utilizados e os seus respectivos pesos.

Como já foi comentado nos capítulos anteriores a opção 2 possui algumas configurações possíveis. Esta opção possui duas transmissões, sendo que ambas podem ser de múltiplas engrenagens ou simples. Já foi comentado que a melhor arquitetura para esta opção é se ter uma transmissão múltipla ligando o MCI e uma simples ligando o motor elétrico pois assim seria aproveitado o que cada motor possui de melhor. Sendo assim, será esta configuração que entrará na comparação para a seleção da melhor opção.

A complexidade da arquitetura é um dos requisitos nesta seleção. Quanto mais complexa for a sua arquitetura, mais difícil será o seu controle,

além de aumentar o custo de construção e provavelmente o peso do conjunto. O que se quer é uma configuração que atenda a todos os requisitos e que ao mesmo tempo seja simples.

Deseja-se como projeto um veículo que seja capaz de recarregar a bateria através do MCI. Isso quer dizer que se busca uma configuração em que o motor a combustão interna seja capaz de recarregar a bateria, caso isso não seja possível a configuração em questão não será viável. Assim, a Opção 6 não é uma opção viável e nem entrará na matriz de decisão, pois ela não permite que o motor a combustão interna recarregue a bateria já que os eixos do MCI e do ME estão desacolpados.

Versatilidade é um requisito muito importante nesta seleção. A configuração que mais pontuar neste quesito é aquela arquitetura em que existem maiores opções de velocidade e torque, ou seja, ela consegue vencer com mais facilidade os ciclos de condução a que será exposta.

Este trabalho tem como objetivo o projeto de um veículo híbrido urbano. Assim, um dos principais focos é a diminuição da emissão de poluentes e do consumo de combustível visando a sustentabilidade do meio ambiente. Seguindo nesta mesma linha, é evidente que a eficiência do powertrain é de grande importância para a decisão e definição da arquitetura mais adequada. Aquela que for mais eficiente, ou seja, que consuma menos energia e que tenha menos perdas será a de maior pontuação.

Algumas arquiteturas demandam um maior motor a combustão interna, como a idéia deste projeto é reduzi-lo, a configuração que tiver a necessidade de um MCI maior, ou seja, a que emitir mais poluentes será penalizada e receberá uma baixa pontuação no quesito “MCI”.

O veículo aqui sendo projetado é um carro pequeno, com capacidade para duas pessoas e com isso acaba sendo leve. Assim, o peso de seus componentes tem uma importância elevada. Além disso, o espaço interno para o powertrain não pode ser muito grande, ou seja, a arquitetura deve ser compacta.

Tabela 4.Peso dos critérios para seleção da configuração do powertrain

Complexidade	Recarga da Bat. Pelo MCI	Versatilidade	Eficiência	Tamanho MCI	Peso	Custo	Espaço
1	2	2	2	1	1	1	2

Dado os pesos dos critérios pode-se então construir a matriz de decisão:

Tabela 5. Matriz de decisão da configuração do powertrain

	Opção 1	Opção 2	Opção 3	Opção 4	Opção 5
Complexidade	4	3	3,5	4	4
Recarga da Bateria pelo MCI	5	5	5	3,5	3,5
Versatilidade	3	4	3,5	3	4
Eficiência	3	4	3,5	2,5	4
Tamanho MCI (Downsizing)	5	4	3	4	4
Peso	3	3	3,5	4	4
Custo	3	3	3,5	4	4
Espaço	4	3,5	4	5	5
Total	45	46	45,5	44	49

	Opção 6	Opção 7	Opção 8	Opção 9	Opção 10
Complexidade	X	3	4	3	3,5
Recarga da Bateria pelo MCI	X	5	3,5	5	3,5
Versatilidade	X	3,5	4	5	5
Eficiência	X	4	4	5	5
Tamanho MCI (Downsizing)	X	4	4	4	4
Peso	X	3,5	4	3,5	4
Custo	X	3,5	4	3,5	4
Espaço	X	3,5	5	3	4,5
Total (já multiplicado pelos pesos)	X	46	49	50	51,5

Pela matriz de decisão a arquitetura que melhor atende aos requisitos de projeto é a Opção 10, ou seja, a arquitetura em paralelo com o motor elétrico

funcionando como acoplador de torque e de velocidade. Esta configuração é bastante complexa por ter o motor elétrico funcionando como acoplador de torque e de velocidade, mas é exatamente esta característica que dá a ela toda sua versatilidade. A observação que deve ser feita aqui é que a transmissão que está ligada após o motor elétrico deve estar na verdade entre o MCI e o motor elétrico como mostra a figura abaixo:

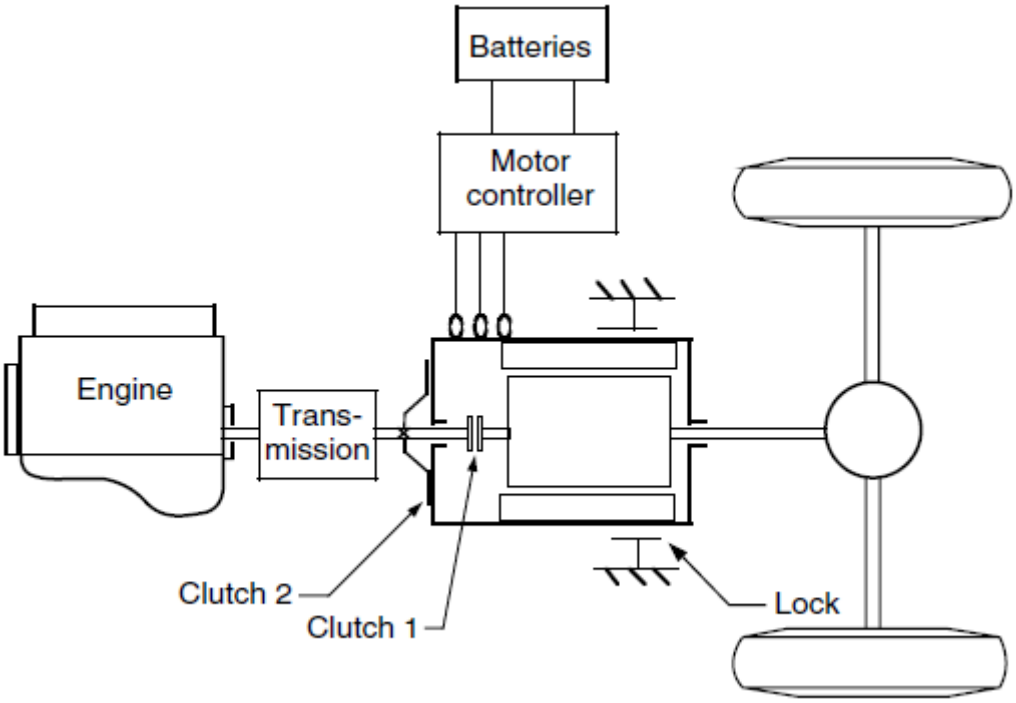


Figura 46. Configuração de Powertrain escolhida

Com esta nova posição da transmissão aproveita-se melhor as vantagens de cada motor. Assim, o MCI possui melhores opções de ser operado em seu ponto ideal de velocidade, melhorando seu desempenho e eficiência, e por causa das características de torque e potência do motor elétrico, o seu funcionamento do jeito ilustrado já é suficiente. Poderia ser melhorada esta arquitetura adicionando-se uma transmissão de engrenagem simples entre o motor elétrico e o eixo de saída.

As duas opções mais bem pontuadas foram as que possuíam acoplador de torque e de velocidade. Esta característica acaba por dar uma maior

versatilidade ao powertrain fazendo com que o trabalho dos dois motores (elétrico e mecânico) seja mais eficiente. Com isto, tanto as velocidades dos motores como os torques dos mesmos estão desacoplados, assim a velocidade e o torque de cada motor pode ser escolhido de maneira livre, aumentando a eficiência do conjunto.

A opção 10 pontuou mais que a 9 por ser mais compacta, por se tratar de um veículo pequeno a característica de ser compacta contou muito a seu favor. Além disso, ela é menos complexa, seu funcionamento exige menos engrenagens.

Uma das desvantagens desta opção é a recarga da bateria pelo MCI. O motor a combustão interna não pode recarregar a bateria quando o veículo encontra-se parado e o motor elétrico acoplado ao eixo de saída.

14. Motor a Combustão interna

Para este projeto de um veículo híbrido urbano, será usado um motor que segue o ciclo Otto e que será movido à álcool. Para esta seção não será feita nenhuma matriz de decisão para a escolha do motor mais adequado. Como os motores baseados neste ciclo equipam a maioria dos automóveis de passeio atualmente, este será o escolhido para equipar o veículo deste projeto. Para esta aplicação, é possível construir motores a quatro tempos mais eficientes e menos poluentes em comparação aos motores a dois tempos, apesar do maior número de partes móveis, maior complexidade, peso e volume, comparando motores de mesma potência.

Este ciclo consiste dos seguintes processos: (1) Admissão isobárica 0-1; (2) Compressão adiabática 1-2; (3) Combustão isocórica 2-3; (4) expansão adiabática 3-4; (5) abertura de válvula 4-5; (6) exaustão isobárica 5-0.

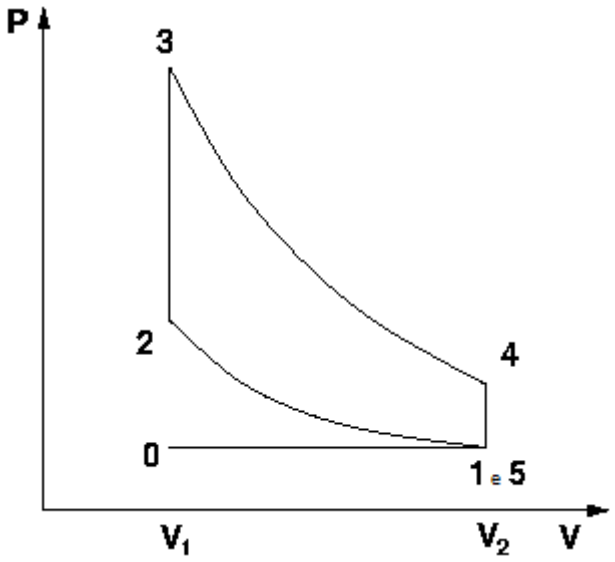


Figura 47. Ciclo Otto padrão

Por se tratar de um veículo que está sendo projetado para o mercado nacional, o motor será movido apenas a álcool, utilizando-se assim de um combustível renovável e mais limpo.

15.Motores Elétricos

Até o momento foram utilizados basicamente quatro tipo de motores elétricos em veículos elétricos ou híbridos, motores DC com escovas, motores por indução (IM), motores de corrente contínua sem escovas e os motores de relutância variável. Por serem os mais comuns e por terem sua tecnologia mais bem desenvolvida, será estudado neste trabalho estes quatro motores e se realizará a comparação entre eles.

15.1 Motores de Corrente Contínua com escovas

Nos motores de corrente contínua a energia elétrica é fornecida aos condutores do enrolamento da armadura pela aplicação de uma tensão elétrica em seus terminais pelo anel comutador (coletor), fazendo com que se circule uma corrente elétrica nesse enrolamento que produz um campo magnético no enrolamento da armadura.

Como o corpo do estator é constituído de materiais ferromagnéticos, ao ser aplicada uma tensão nos terminais do enrolamento de campo da máquina tem-se uma intensificação do campos magnéticos no mesmo e, portanto, a produção de pólos magnéticos (Norte e Sul) espalhados por toda a extensão do estator.

Pela atuação do anel comutador que tem como função alternar o sentido de circulação da corrente no enrolamento da armadura, quando se aplica uma tensão no comutador, com a máquina parada, a tensão é transferida ao enrolamento da armadura fazendo com que se circule uma corrente pelo mesmo o que produz um campo magnético e outros pares de pólos no enrolamento da armadura.

A orientação desse campo, ou seja, a posição do pólo norte e sul permanece fixa, simultaneamente tem-se uma tensão elétrica aplicada no enrolamento de campo no estator, assim, ao quando houver a interação entre os campos magnéticos da armadura no rotor e do campo no estator, os mesmos tentarão se alinhar, ou seja, o pólo norte de um dos campos tentará se aproximar do pólo sul do outro.

Como o eixo da máquina pode girar, caso os campos da armadura e do estator não estejam alinhados, surgirá um binário de forças que produzirá um torque no eixo, fazendo o mesmo girar. Ao girar, o eixo gira o anel comutador que é montado sobre o eixo, e ao girar o anel comutador muda o sentido de aplicação da tensão, o que faz com que a corrente circule no sentido contrário, mudando o sentido do campo magnético produzido.

Assim, ao girar o anel comutador muda a posição dos pólos magnéticos norte e sul do campo da armadura e como o campo produzido pelo enrolamento de campo no estator fica fixo, tem-se novamente a produção do binário de forças que mantém a mudança dos pólos e conseqüentemente o movimento do eixo da máquina.

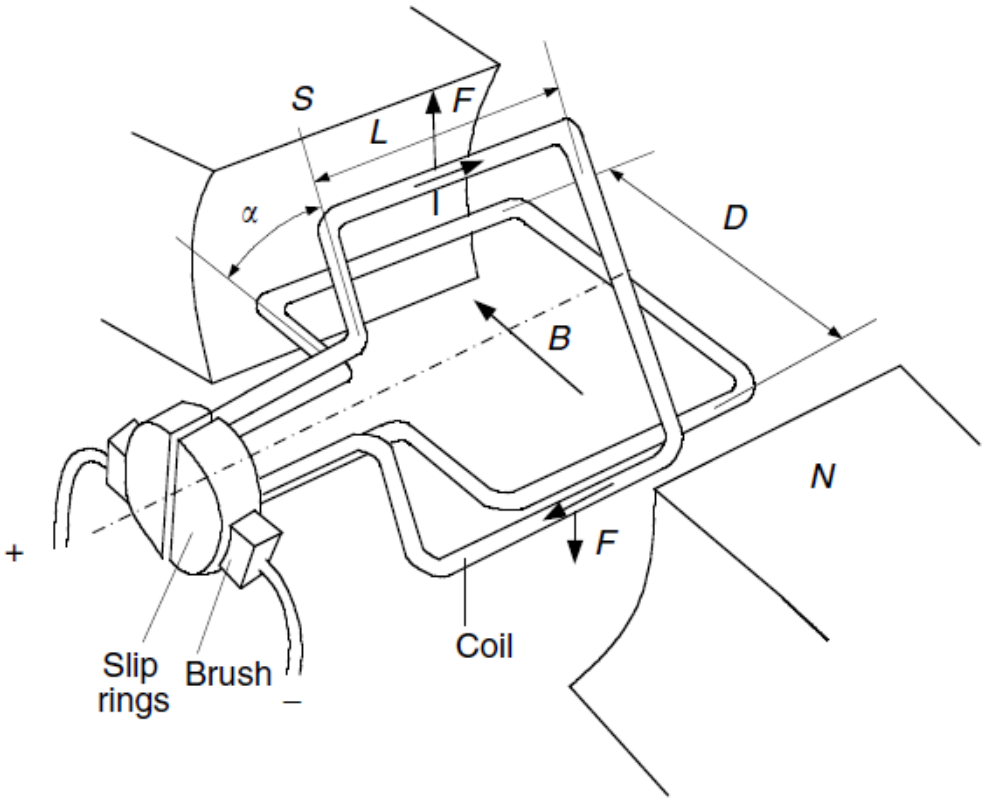


Figura 48. Princípio de funcionamento de um motor de corrente contínua

Tais motores são bastantes conhecidos por sua capacidade de atingirem altos torques em baixas velocidades e por suas curvas de torque-velocidade atenderem aos requisitos de tração. Sua velocidade é ajustada variando-se a voltagem, sendo, assim, fácil de controlar. Porém tais motores são grandes, possuem uma baixa eficiência, baixa confiabilidade e possuem uma maior

necessidade de manutenção, principalmente devido às escovas que diminuem a velocidade máxima do motor pela fricção entre elas. Além disso, são pesados e caros.

15.2 Motores de Indução (IM)

Um motor de indução é composto basicamente de duas partes: Estator e Rotor. O espaço entre o estator e o rotor é denominado entreferro. O estator constitui a parte estática e o rotor a parte móvel. O estator é composto de chapas finas de aço magnético tratadas termicamente para reduzir ao mínimo as perdas por correntes parasitas e histerese. Estas chapas têm o formato de um anel com ranhuras internas de tal maneira que possam ser alojados enrolamentos, os quais por sua vez, quando em operação, deverão criar um campo magnético no estator. O rotor também é composto de chapas finas de aço magnético tratadas termicamente, com o formato também de anel (vista frontal) e com os enrolamentos alojados longitudinalmente.

Existem dois tipos de motores de indução:

- Motor de Indução Gaiola de esquilo: No qual o rotor é composto de barras de material condutor que se localizam em volta do conjunto de chapas do rotor, curto-circuitadas por anéis metálicos nas extremidades.
- Motor de Indução com rotor Bobinado: No qual o rotor é composto de um enrolamento trifásico distribuído em torno do conjunto de chapas do rotor.

O motor de indução é o motor de construção mais simples. Estator e rotor são montados solidários, com um eixo comum aos “anéis” que os compõem. O estator é constituído de um enrolamento trifásico distribuído uniformemente em torno do corpo da máquina, para que o fluxo magnético resultante da aplicação de tensão no enrolamento do estator produza uma forma de onda espacialmente senoidal. A onda eletromagnética produzida pelo enrolamento é uma função senoidal do espaço e do tempo.

A aplicação de tensão alternada nos enrolamentos do estator irá produzir um campo magnético variante no tempo que devido à distribuição uniforme do enrolamento do estator irá gerar um campo magnético resultante

girante na velocidade proporcional à freqüência da rede trifásica. O fluxo magnético girante no estator atravessará o entreferro e por ser variante no tempo induzirá tensão alternada no enrolamento trifásico do rotor. Como os enrolamentos do rotor estão curto circuitados essa tensão induzida fará com que circule uma corrente pelo enrolamento do rotor o que por conseqüência ira produzir um fluxo magnético no rotor que tentará se alinhar com o campo magnético girante do estator.

Como o valor das tensões induzidas no rotor no caso de rotor bobinado dependem da relação de espiras entre o rotor e o estator, o estator pode ser considerado como o primário de um transformador e o rotor como seu secundário.

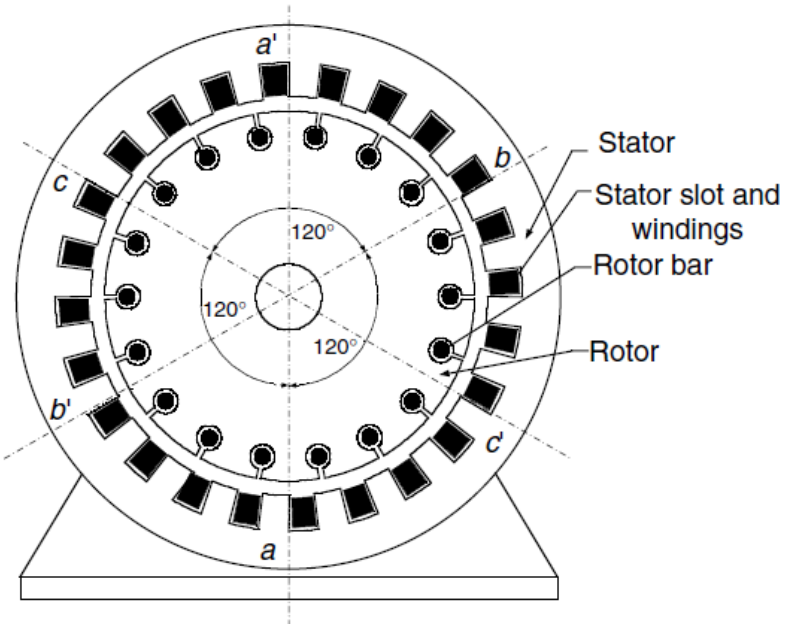


Figura 49. Corte de uma seção do Motor de Indução

Tais motores são de fácil construção, são muito confiáveis, robustos, necessitam de baixa manutenção, possuem um baixo custo e são capazes de operar em ambientes hostis. Como não existe a fricção das escovas, o motor é capaz de alcançar maiores velocidades em comparação ao de corrente contínua. No entanto, o controle deste tipo de motor é mais caro que o de corrente contínua

15.3 Motores de Corrente Contínua sem escovas

Os motores de corrente contínua sem escovas ou motores BLDC (brushless DC) oferecem diversas vantagens sobre os motores de corrente contínua com escovas, dentre as quais se podem destacar a confiabilidade mais elevada, o ruído reduzido, a vida útil mais longa (devido a ausência de desgaste da escova), a eliminação da ionização do comutador, e a redução total de EMI (interferência eletromagnética).

A desvantagem principal do motor sem escovas é o custo mais elevado, a qual se deve a dois fatores: primeiramente, estes motores requerem dispositivos MOSFET de alta potência na fabricação do controlador eletrônico de velocidade. Por outro lado, os motores de corrente contínua com escovas podem ser regulados por um resistor variável simples (potenciômetro ou reostato), mesmo sendo ineficiente, ele também pode ser satisfatório para algumas aplicações dependendo do custo-benefício. Os motores BLDC necessitam de um mais caro circuito integrado, chamado de controlador eletrônico de velocidade para oferecer o mesmo tipo de controle variável. Em segundo, ao comparar técnicas de construção e manufatura entre BLDC e os motores escovados, muitos projetos de BLDC requerem trabalho manual, no caso de fixação da bobinas do estator. Por outra banda, os motores com escovas usam enrolamentos que podem ser bobinados automaticamente e são portanto mais econômicos.

Os motores BLDC são considerados mais eficientes do que os motores de corrente contínua escovados, do que os motores de indução e do que os motores de relutância variável e além disso possuem uma alta densidade de energia. A eficiência é maior na região de "baixa-carga" e "à vazio" na curva característica do motor. Sob cargas mecânicas elevadas, os motores BLDC e os motores escovados de alta qualidade são equivalentes em eficiência.

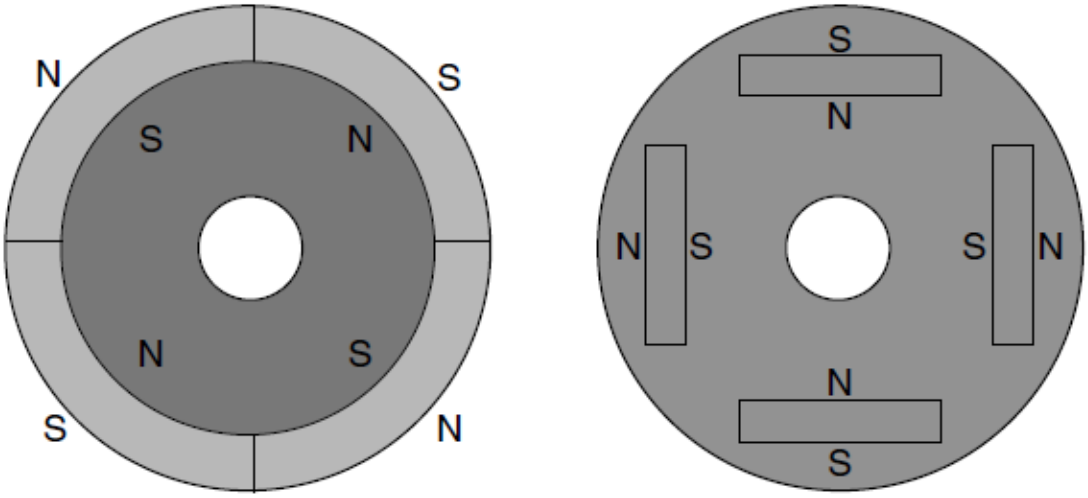


Figura 50. Corte de uma seção transversal de um motor de Corrente Contínua sem Escovas

15.4 Motores de Relutância Variável

Neste motor, o estator é formado, em geral, por quatro pólos usinados de forma que apresentem ranhuras, chamadas dentes devido ao seu aspecto. O rotor é também dentado, lembrando uma engrenagem, onde cada dente corresponde a um pólo saliente, assim, o número de dentes do rotor determina o número de passos do motor.

Neste tipo de motor a rotação do balancete é controlado por uma série de campos eletromagnéticos que são ativados e desativados eletronicamente.

Tais motores não usam escovas ou comutadores e possuem um número fixo de pólos magnéticos que determinam o número de passos por revolução. Os motores de passo mais comuns possuem de 3 a 72 passos/revolução, significando que ele leva de 3 a 72 passos para completar uma volta. Controladores avançados de motores de passo podem utilizar modulação por largura de pulso para realizarem micropassos, obtendo uma maior resolução de posição e operação mais macia, em detrimento de outras características.

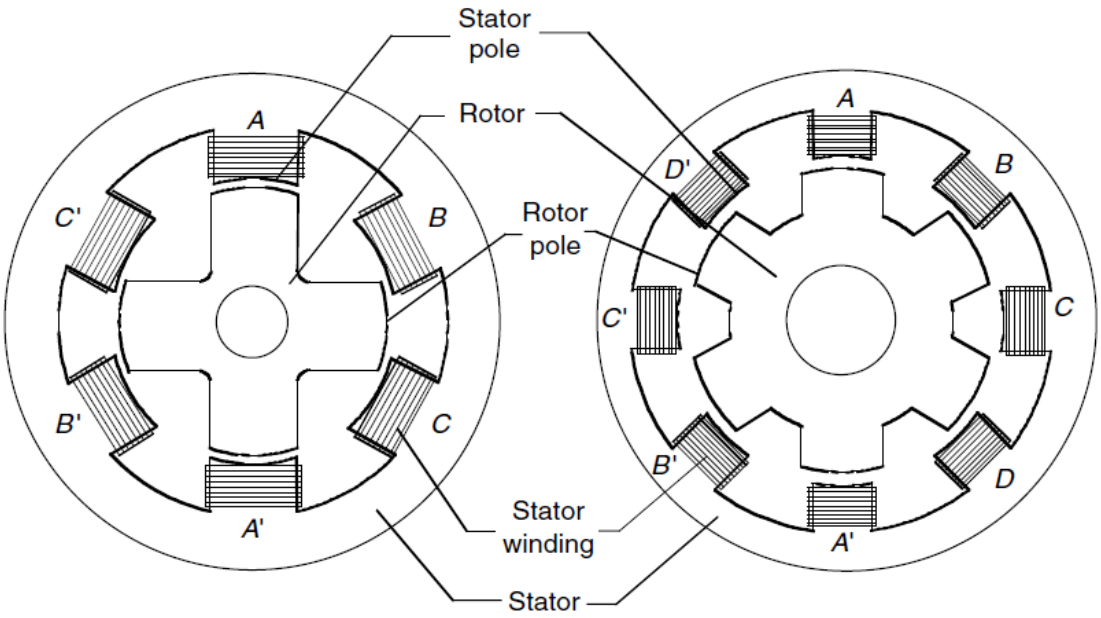


Figura 51. Corte da seção de um Motor de Relutância Variável

Os motores de relutância variável estão cada vez mais ganhando atenção e são bem reconhecidos pelo seu potencial quanto ao uso em veículos elétricos e híbridos. Esses motores possuem uma construção simples, um controle simples e características de torque-velocidade muito boas. Suas características de torque-velocidade atendem perfeitamente os requisitos de veículos elétricos ou de híbridos plug-in. Ele possui altas velocidades e possui uma grande região de potência constante, tendo também alto torque em baixas velocidades. O motor possui uma aceleração bastante rápida e possui uma faixa de operação de velocidade bastante extensa dispensando a necessidade do uso de uma transmissão acoplada a ele.

15.5 Comparação dos Motores Elétricos

Deve ser feita a comparação entre os motores elétricos apresentados para que se escolha o que mais se adequa para a utilização em veículos híbridos. Para efeitos de comparação, foram estabelecidos alguns critérios como eficiência, custo, peso e potência.

Este trabalho tem como objetivo o projeto de um veículo híbrido urbano. Assim, um dos principais focos é a diminuição da emissão de poluentes e do

consumo de combustível visando a sustentabilidade do meio ambiente. Seguindo nesta mesma linha, é evidente que a eficiência do motor elétrico é de grande importância para a decisão e definição do motor mais adequado. Aquele que for mais eficiente, ou seja, que consuma menos energia e fornecendo uma potência adequada permitindo que a bateria tenha uma vida útil maior terá uma maior pontuação.

O peso é um critério bastante importante também para a seleção do motor ideal. Como foi citado no início deste trabalho, existem muitas pesquisas que envolvem a diminuição de peso dos diversos elementos do veículo. Todo peso que pode ser diminuído no veículo trará benefício, pois aumentará a eficiência dos motores resultando em um menor consumo e em um impacto menor para o meio ambiente. Assim, o peso do motor elétrico é fator decisivo no processo de seleção do motor.

Custo impacta diretamente o consumidor, afetando a sua decisão pela compra ou não do veículo. Ao mesmo tempo em que este critério é de grande importância, ele não é primordial, pois o projeto em questão refere-se a tecnologias novas, que estão em desenvolvimento e que por isso o seu custo é mais elevado.

O critério potência aqui mencionado refere-se à potência que o motor elétrico consegue fornecer, estando relacionado com a característica da curva torque-velocidade. Ou seja, se o motor tiver características de torque-velocidade que atendam os requisitos para os veículos híbridos, como alto torque em velocidades baixas, diversas faixas de operação de velocidade e uma potência considerável para que se possa ter uma diminuição do motor a combustão, então o motor receberá uma boa pontuação.

Feitos os devidos comentários, estabelece-se então a matriz de importância dos critérios:

Tabela 6. Peso dos critérios para seleção do motor elétrico

Critério	Eficiência	Peso	Custo	Potência
Peso	2	1,5	1	2

Com base nos dados apresentado no capítulo pode-se construir a matriz de decisão para o motor com base nos critérios adotados. O peso máximo é 5 para cada critério, sendo que para o quesito peso e custo, o que tiver a maior nota possui o menor peso ou custo.

Tabela 7. Matriz de decisão do Motor Elétrico

	Corrente Contínua com Escova	Indução	Corrente Contínua sem Escova	Relutância Variável
Eficiência	2	4	5	4,5
Peso	2	4	4,5	5
Custo	5	4	3	4
Potência	2	3	4	4
Total (já multiplicado pelo peso do critério)	16	24	27.75	**28.5**

Observa-se que os Motores de Corrente Contínua com Escova apresentam ainda uma grande atratividade pelo seu baixo custo. Do ponto de vista da eficiência, a melhor opção é o motor de Corrente Contínua sem Escova e o motor de Relutância Variável é o mais leve e o que apresenta características de torque-velocidade mais adequadas ao uso em veículos híbridos.

Com base nesses critérios, o motor de relutância variável é a melhor opção de motor elétrico. Além de ser forte em tais requisitos, este motor possui outras propriedades favoráveis como o seu resfriamento, a máxima velocidade que ele consegue atingir e a sua confiabilidade. Além disso, a relação entre a velocidade máxima e a velocidade base é da ordem de 5~6 e produz uma potência mínima para maximização do desempenho da aceleração e da frenagem regenerativa.

Para que se alcance grandes velocidades o motor deve operar a uma velocidade por volta de 10.000 rpm e, seguindo este critério, o motor de relutância variável atinge facilmente o patamar desejado. Já o motor de corrente contínua sem escova não consegue atingir tais valores facilmente, para isso ele deveria sofrer modificações em seu rotor que iriam prejudicar o seu desempenho e aumentaria o seu custo.

Após terem sido analisados todos os motores com relação aos critérios adotados conclui-se que, entre os motores observados (corrente contínua sem escova, de indução, corrente contínua com escova e de relutância vairável) o motor mais adequado é o de relutância variável para o uso em veículos híbridos e elétricos.

16.Unidade de Armazenamento de Energia

As unidades de armazenamento de energia elétrica devem ser dimensionadas de forma que elas possam armazenar energia suficiente (kWh) e fornecer potência de pico adequada (kW) para que o veículo possa atingir o desempenho e aceleração especificados e cumprir o ciclo de condução apropriado. Para os veículos cujo objetivo é ter um grande alcance no modo elétrico, a unidade de armazenamento de energia deve armazenar energia suficiente para que o carro tenha capacidade de atingir grandes quilometragens no mundo real. Além disso, a unidade de armazenamento deve ter um ciclo de vida adequado. É muito mais difícil e bem menos intuitivo estabelecer os requisitos de peso, volume e custo de tais unidades de armazenamento. Há claramente limites sobre essas características que impediriam o sucesso do projeto e das vendas do veículo, mas definir tais limites para que se atinja o objetivo do trabalho seria muito arbitrário.

As unidades de armazenamento de energia são projetadas através de requisitos de energia e de potência. No caso das baterias, elas são projetadas a fim de se atingir o alcance especificado do veículo. O peso e volume da bateria podem ser calculados a partir da energia consumida (Wh/km) do veículo. Na maioria dos veículos que utilizam bateria como fonte de energia, a bateria sendo projetada a partir do alcance desejado se consegue atingir a potência (kW) requerida para uma determinada aceleração, inclinação e velocidade máxima em cruzeiro. As baterias usadas nestas aplicações são regularmente descarregadas e carregadas usando-se a eletricidade da rede. Assim, o ciclo de vida para grandes descargas é um aspecto considerável e é essencial que a bateria atinja os requisitos mínimos especificados.

No caso desta energia sustentar veículos elétricos-híbridos que usam um MCI ou uma célula de combustível como principal fonte de energia e a bateria como armazenamento de energia, a unidade de armazenamento de energia é projetada pelo seu pico de potência durante a aceleração.

Projetar a unidade de energia para veículos híbridos plug-in é mais complexo. Isso se deve ao fato de um plug-in poder se locomover todo o tempo no modo elétrico sem nunca precisar do MCI. Neste caso, a potência do sistema elétrico deve ser calculada da mesma forma para um veículo

totalmente elétrico e o requisito da energia armazenada (kWh) seria calculado a partir do consumo de energia (Wh/km) e da especificação de alcance do veículo. Neste caso, interpreta-se que o veículo deve realizar todo o percurso no modo elétrico e somente ser assistido pelo MCI quando a potência demandada for muito alta ou quando o carro ultrapassar uma determinada velocidade.

A maioria dos veículos elétricos alimentados por bateria e híbridos testados e comercializados até 2006 usaram baterias de níquel metal hidreto (caso do Toyota Prius). Porém o desenvolvimento das baterias de lítio-íon tem sido muito grande na medida em que deve-se considerar o uso de tais baterias nos veículos elétricos e híbridos. A maioria dos estudos recentes se concentra em baterias de alta potência para veículos híbridos e não em baterias de alta densidade para veículos elétricos. Como comentado anteriormente, o projeto de baterias para híbridos tem uma ênfase na potência da mesma e não em sua densidade. Baterias para veículos híbridos plug-in devem possuir ambos os requisitos, alta potência e alta densidade de energia, assim suas características ficam entre as características de baterias para veículos elétricos e para veículos híbridos.

Baterias eletroquímicas convertem energia elétrica em energia química durante o carregamento e convertem energia química em elétrica durante a descarga. A bateria é composta de diversas células empilhadas. Uma célula é uma unidade completa e independente que possui todas as propriedades eletroquímicas. Basicamente, a célula consiste de três elementos primários: dois eletrodos imersos em um eletrólito.

Atualmente, as baterias viáveis para o uso em veículos elétricos e híbridos são as de chumbo-ácido, níquel-cádmio, níquel-ferro, níquel-hidreto de metálico e as baterias de lítio –íon. Atualmente, parece que as baterias de chumbo-ácido ainda irão ser a maioria por suas grandes vantagens, porém, no longo prazo, aparentemente as baterias de cádmio e de lítio serão mais usadas em veículos.

16.1 Baterias de Chumbo-ácido

Tais baterias foram muito bem sucedidas comercialmente por mais de um século e ainda é amplamente usada na indústria automotiva. Entre suas vantagens estão o baixo custo, sua tecnologia bem desenvolvida, um bom ciclo de vida e uma alta potência. Tais vantagens são bem atrativas para o uso em veículos híbridos, principalmente a alta potência. Seus componentes (chumbo, chumbo oxidado e ácido sulfúrico) são baratos em comparação aos seus concorrentes. Essas baterias, porém, possuem algumas desvantagens também como a sua baixa densidade em termos de energia. Suas características de temperatura são fracas (abaixo de 10 graus sua potência e energia específica diminuem).

A presença de ácido sulfúrico é um problema para a segurança dos ocupantes do veículo. O Hidrogênio liberado pelas reações químicas representa outro perigo já que este gás é extremamente inflamável mesmo em pequenas concentrações. Assim, para que se tenha a segurança devida é necessário selar bem a bateria o que pode ocasionar em uma alta pressão dentro da bateria, devido aos gases, podendo danificar o invólucro. A emissão constante de chumbo no meio ambiente pode ocorrer durante a fabricação da bateria, durante uma batida do veículo ou mesmo no descarta da bateria ao final de sua vida útil.

Houve um grande avanço na tecnologia desta bateria, chegando-se a mais de 40 Wh/kg de energia específica com a possibilidade de rápida carga. Uma destas baterias é a feita pela Electrosources Horizon, que oferece uma energia específica de 43 Wh/kg, uma potência específica de 285 W/kg e um ciclo de vida de 600 ciclos para aplicação na estrada em veículos elétricos e rápida recarga (50% em 8min e 100% em 30 min), baixo custo (US$ 2000-3000).

16.2 Baterias de níquel

Tais baterias possuem propriedades eletroquímicas muito boas e existem quatro tipos basicamente de baterias: níquel-ferro, níquel-zinco, níquel-cadmio e níquel-hidreto metálico.

As baterias de níquel-cadmio sofreram um grande desenvolvimento devido às suas diversas vantagens como a sua alta potência específica (mais

de 220 W/kg), longa vida útil (mais de 2000 ciclos), uma alta tolerância elétrica e mecânica, possibilidade de recarga rápida (cerca de 40 até 80% em 18 min), grande faixa de temperatura de operação (-40 até 85 graus Celsius), pouca perda de carga (cerca de <0.5% por dia) e uma grande variedade de possíveis tamanhos. Este tipo de bateria, porém, possui desvantagens como alto custo inicial e alguns efeitos ambientais devido ao cádmio.

As baterias de níquel- metal hidreto estão no mercado desde 1992 e são bastante parecidas com as de níquel-cádmio, mas ela usa hidrogênio no lugar do cádmio tendo assim uma energia específica superior e ficando livre de toxidade. Atualmente esta bateria possui uma voltagem nominal de 1.2V com uma energia específica de 65 Wh/kg e potência específica de 200 W/kg.

Como as baterias de Ni-MH ainda estão em desenvolvimento, suas vantagens baseadas na tecnologia presente são: possuem a energia específica mais alta (70 até 95 Wh/kg) e a mais alta potência específica (200 até 300 W/kg) das baterias à base de níquel, possuem alta capacidade de recarga e não poluem o meio ambiente.

16.3 Baterias de Lítio-íon

Desde a sua primeira aparição em 1991, a bateria de Li-ion teve uma grande evolução chegando a ser considerada por muitos a mais promissora bateria recarregável. Mesmo estando em estágio de evolução, esta bateria já ganhou aceitação tendo sua aplicação efetivada em veículos elétricos e híbridos.

Esta bateria possui uma voltagem nominal de 4V, uma energia específica de 120 Wh/kg, uma densidade de energia de 200 Wh/l e uma potência específica de 260 W/kg. Recentemente a SAFT anunciou o desenvolvimento de uma bateria de Li-ion de alta potência para aplicação em veículos híbridos com uma energia específica de 85 Wh/kg e potência específica de 1350 W/kg.

16.4 Comparativo de Baterias

A seguir serão mostradas algumas tabelas comparando diversas baterias. A primeira tabela foi retirada de [9] e compara diversos tipos de baterias, e a segunda tabela faz a comparação de algumas características de baterias usadas em veículos elétricos e híbridos.

Status of Battery Systems for Automotive Applications

System	Specific Energy (Wh/kg)	Peak Power (W/kg)	Energy Efficiency (%)	Cycle Life	Self-Discharge (% per 48 h)	Cost (US$/kWh)
Acidic aqueous solution						
Lead/acid	35–50	150–400	>80	500–1000	0.6	120–150
Alkaline aqueous solution						
Nickel/cadmium	50–60	80–150	75	800	1	250–350
Nickel/iron	50–60	80–150	75	1500–2000	3	200–400
Nickel/zinc	55–75	170–260	65	300	1.6	100–300
Nickel/metal hydride	70–95	200–300	70	750–1200+	6	200–350
Aluminum/air	200–300	160	<50	?	?	?
Iron/air	80–120	90	60	500+	?	50
Zinc/air	100–220	30–80	60	600+	?	90–120
Flow						
Zinc/bromine	70–85	90–110	65–70	500–2000	?	200–250
Vanadium redox	20–30	110	75–85	—	—	400–450
Molten salt						
Sodium/sulfur	150–240	230	80	800+	0[a]	250–450
Sodium/nickel chloride	90–120	130–160	80	1200+	0[a]	230–345
Lithium/iron sulfide (FeS)	100–130	150–250	80	1000+	?	110
Organic/lithium						
Lithium-ion	80–130	200–300	>95	1000+	0.7	200

[a]No self-discharge, but some energy loss by cooling.

Figura 52. Características de baterias para o uso automotivo, retirada de [9]

Battery Technology	Applic. type	Ah	V	Wh/kg At C/3	Resist mOhm	W/kg Match. Imped.	W/kg 95%eff.	Useable SOC,
Lead-acid								
Panasonic	HEV	25	12	26.3	7.8	389	77	28%
Panasonic	EV	60	12	34.2	6.9	250	47	----
Nickel Metal Hydride								
Panasonic EV	EV	65	12	68	8.7	240	46	----
Panasonic EV	HEV	6.5	7.2	46	11.4	1093	207	40%
Ovonic	EV	85	13	68	10	200	40	----
Ovonic	HEV	12	12	45	10	1000	195	30%
Saft	HEV	14	1.2	47	1.1	900	172	30%
Lithium-ion								
Saft	HEV	12	4	77	7.0	1550	256	20%
Saft	EV	41	4	140	8.0	476	90	----
Shin-Kobe	EV	90	4	105	.93	1344	255	------
Shin-Kobe	HEV	4	4	56	3.4	3920	745	18%

Figura 53.Características de baterias para o uso automotivo (EV e HEV), retirado de [12]

Através destas duas tabelas pode-se fazer algumas comparações interessantes entre as diversas tecnologias de baterias para que se possa chegar a uma decisão sobre qual delas é a mais adequada ao veículo que está sendo projetado neste trabalho. Dentre as mais usadas e comentadas neste trabalho até este momento, a bateria que possui uma maior potência específica é a de Li-ion, que está na faixa de 100-150 Wh/kg para veículos elétricos e na faixa de 60-75 Wh/kg para veículos híbridos.

O passo seguinte é selecionar a bateria mais adequada para a sua utilização em um veículo híbrido. Assim deve-se estabelecer os principais

requisitos para a seleção, sempre tendo em mente os requisitos gerais do carro.

Os dois principais fatores que irão influenciar na seleção da bateria mais adequada são a energia específica (kWh) e o pico de potência da mesma (kW).

A bateria deve ter capacidade de guardar energia suficiente para que o veículo consiga trafegar no maior tempo possível no modo elétrico sem precisar de uma recarga. O principal objetivo deste trabalho é se ter uma configuração de powetrain que reduza o máximo possível o consumo de combustível e a emissão de poluentes. Assim, a bateria deve ter energia suficiente para atender os requisitos de condução citados anteriormente, como, por exemplo, poder trafegar a maior parte do tempo no modo elétrico o trajeto de 50 km (casa-trabalho-casa) de um morador de uma grande cidade.

Outro fator de extrema importância, é que a bateria consiga fornecer energia suficiente para que o veículo consiga superar os requisitos de aceleração e que consiga percorrer determinados ciclos de condução. Tal fator está ligado com o pico de potência que a bateria é capaz de fornecer.

Por se tratar de um projeto que visa a economia de combustível, a eficiência da bateria é um fator primordial. Quanto maior a eficiência de seus componentes internos, menor é o gasto do veículo como um todo com combustível fóssil e com eletricidade. Isso torna o carro mais “verde”, que é exatamente a tendência do mercado.

Custo impacta diretamente o consumidor, afetando a sua decisão pela compra ou não do veículo. Ao mesmo tempo em que este critério é de grande importância, ele não é primordial, pois o projeto em questão refere-se a tecnologias novas, que estão em desenvolvimento e que por isso o seu custo é mais elevado.

Feitos os devidos comentários e observações pode-se então montar a matriz de pesos dos critérios estabelecidos para a seleção da bateria:

Tabela 8. Peso dos critérios para seleção da bateria

Critério	Energia Específica	Potência de Pico	Eficiência	Custo

Peso	3	2	1	1

Com base nos dados apresentado no capítulo pode-se construir a matriz de decisão para bateria com base nos critérios adotados. O peso máximo é 5 para cada custo. Utilizou-se como base de comparação a tabela comparativa mostrada anteriormente retirada de [9].

Tabela 9.Matriz de decisão da Bateria

	Chumbo Ácido	Ni-Mh	Lítio Íon
Energia Específica	1,5	3,5	5
Potência de Pico	5	3,8	3
Eficiência	4	3,7	5
Custo	5	2	4
Total (já multiplicado pelo peso do critério)	23,5	23,8	30

As baterias de Chumbo-Ácido são baterias que possuem uma tecnologia muito bem desenvolvida, assim seu custo é muito baixo em comparação com as outras baterias. Além disso, sua eficiência excede os 80%, tornando-a uma bateria muito viável. Porém, sua aplicação em veículos híbridos não é muito recomendada por possuir baixos valores de energia específica, ou seja, o veículo não possuiria uma autonomia suficiente para percursos um pouco mais distantes. Apesar disso esta bateria consegue entregar uma boa potência de pico, conseguindo atender aos requisitos de aceleração do veículo.

As baterias de Níquel Metal Hidreto possuem uma tecnologia razoavelmente nova, assim, seu custo é o mais elevado das três baterias aqui

comparadas. Apesar disso, essa bateria possui uma alta potência de pico, e bons valores de energia específica. O veículo Toyota Prius, por exemplo, utiliza este tipo de bateria. Outro ponto negativo desta bateria é que ela possui um alto valor de estado de carga da bateria e uma eficiência baixa (70%) se comparada com as outras baterias.

A bateria selecionada neste trabalho como a mais viável foi a de Lítio-íon. Esta bateria já é utilizada em alguns veículos como, por exemplo, no carro da Nissan. Esta bateria possui a mais alta energia específica dentre as três além de possuir altos valores de potência de pico. A empresa Saft já consegue produzir baterias para veículos híbridos de lítio-íon com uma energia específica de 77 Wh/kg, enquanto que a mesma empresa Saft produz baterias de Níquel metal hidreto que alcançam 47 Wh/kg. Esta mesma bateria de lítio-íon produzida pela Saft alcança valores de 1550 W/kg. Isso mostra a vantagem desta bateria em comparação com as outras. Além disso, este tipo de bateria possui uma alta eficiência (maior que 95%) e um alto ciclo de vida.

16.5 Ultracapacitores

Os ultracapacitores são caracterizados por possuírem uma potência específica muito alta, mas uma baixíssima energia específica quando comparado com as baterias químicas. Sua energia específica é de apenas alguns watts-horas por quilograma. Sua potência específica, porém, pode alcançar valores de até 3 kW/kg, muito maior do que qualquer tipo de bateria. Devido a sua baixa densidade de energia específica e a sua dependência com relação a voltagem no SOC (State of Charge – Estado de Carga), é muito difícil utilizar-se apenas de ultracapacitores como uma unidade de armazenamento de energia para veículos elétricos e híbridos.

Por isso ele pode ser usado como uma fonte auxiliar de energia. Um uso promissor é o sistema de armazenamento de energia híbrido de bateria e ultracapacitor para veículos híbridos e elétricos. Energia específica e potência específica podem ser desacoplados, dando a oportunidade de se projetar a bateria de tal forma que se otimize a energia específica e a vida útil dando pouca atenção à potência específica. Devido ao efeito de nivelamento do ultracapacitor, a alta corrente descarregada da bateria e a alta corrente que carrega a bateria devido à frenagem regenerativa é minimizada para que a

energia disponível, a resistência e a vida útil da bateria possam ser aumentadas significativamente.

A seguir são mostrados alguns dados da tecnologia proveniente dos ultracapacitores:

Technical Specifications of the Maxwell Technologies Ultracapacitor Cell and Integrated Modules[5]

	BCAP0010 (Cell)	BMOD0115 (Module)	BMOD0117 (Module)
Capacitance (farads, −20%/+20%)	2600	145	435
maximum series resistance ESR at 25°C (mΩ)	0.7	10	4
Voltage (V), continuous (peak)	2.5 (2.8)	42 (50)	14 (17)
Specific power at rated voltage (W/kg)	4300	2900	1900
Specific energy at rated voltage (Wh/kg)	4.3	2.22	1.82
Maximum current (A)	600	600	600
Dimensions (mm) (reference only)	60 × 172 (Cylinder)	195 × 165 × 415 (Box)	195 × 265 × 145 (Box)
Weight (kg)	0.525	16	6.5
Volume (l)	0.42	22	7.5
Operating temperature[a] (°C)	−35 to +65	−35 to +65	−35 to +65
Storage temperature (°C)	−35 to +65	−35 to +65	−35 to +65
Leakage current (mA) 12 h, 25°C	5	10	10

[a]Steady-state case temperature.

Figura 54. Especificações técnicas de ultracapacitores

17. Frenagem regenerativa

Um dos aspectos mais importantes dos veículos híbridos é a sua capacidade recuperar grandes quantidades de energia gastos na frenagem. O motor elétrico pode ser controlado para operar como gerador para converter energia potencial ou cinética do veículo em energia elétrica que poder ser armazenada na bateria e ser reutilizada.

O desempenho em frenagem do veículo é sem dúvida um dos fatores mais importantes que afetam a segurança do carro. Um projeto bem sucedido do sistema de freios deve sempre atender dois requisitos distintos. Primeiramente, numa frenagem de emergência, ele deve parar o veículo na menor distância possível. Em segundo lugar, ele deve manter o controle da direção do veículo, ou seja, deve distribuir as forças de frenagem de forma correta nas rodas.

Geralmente, o torque de frenagem necessário é muito maior do que o torque que o motor elétrico pode produzir. Nos veículos híbridos, sistemas de freios por fricção mecânica devem coexistir com os freios regenerativos elétricos. Assim, o projeto apropriado e o correto controle de ambos os freios, mecânico e elétrico, são as maiores preocupações.

Uma grande quantidade de energia é consumida na frenagem. Frear um veículo de 1000 kg de 100 km/h até a total parada consome cerca de 0,11 kWh de energia ($0{,}5\ x\ M_v\ x\ V^2$). Quando o veículo está sendo conduzido em áreas urbanas, em ciclos de parada e aceleração, uma grande quantidade de energia é consumida pela freqüente frenagem, o que resulta em um alto consumo de combustível.

A tabela a seguir, retirada de [9], mostra a velocidade máxima, velocidade média, energia total de tração nas rodas e a energia total consumida pelo arrasto e pela frenagem a cada 100 km percorridos por um veículo de 1500 kg. A tabela mostra que em áreas urbanas típicas a energia de frenagem pode atingir cerca de 25% da energia total de tração. Em cidades grandes, como ,por exemplo, em Nova Iorque, este valor pode atingir cerca de

70%. Conclui-se então que a frenagem regenerativa pode aumentar significativamente a economia de combustível em veículos híbridos.

Tabela 10. Máxima velocidade, velocidade média, energia total de tração e energia consumida pelo arrasto e por frenagem

Maximum Speed, Average Speed, Total Traction Energy, and Energies Consumed by Drags and Braking per 100 km Traveling Distance in Different Drive Cycles

	FTP 75 Urban	FTP 75 Highway	US06	ECE-1	New York City
Maximum speed (km/h)	86.4	97.7	128.5	120	44.6
Average speed (km/h)	27.9	79.3	77.5	49.9	12.2
Total traction energy[a] (kWh)	10.47	10.45	17.03	11.79	15.51
Total energy consumed by drags[a] (kWh)	5.95	9.47	11.73	8.74	4.69
Total energy consumed by braking[a] (kWh)	4.52	0.98	5.30	3.05	10.82
Percentage of braking energy to total traction energy (%)	43.17	9.38	31.12	25.87	69.76

[a]Measured on driven wheels.

Potência e energia de frenagem consumida pelas rodas frontais e traseiras estão relacionadas com as forças de frenagem nas rodas dianteiras e traseiras. Um entendimento completo das forças de frenagem, da potência de frenagem e da energia de frenagem consumida pelas rodas dianteiras e traseiras em ciclos típicos de condução auxilia no projeto dos sistemas de feios regenerativos.

Inicialmente, assumindo que a distribuição dos freios nas rodas dianteiras e traseiras acompanha a curva *I* (figura a seguir), ignorando o arrasto do veículo, as forças de frenagem podem ser expressas por:

$$F_{fD} = \frac{jM_v}{L}(L_b + \frac{h_g}{g}j)$$

$$F_{fD} = \frac{jM_v}{L}(L_b - \frac{h_g}{g}j)$$

Onde j é a desaceleração do veículo em m/s², L é a bitola do veículo, La e Lb são as distâncias horizontais entre o centro de gravidade e o centro das

rodas dianteiras e traseiras respectivamente, e hg é a altura do centro de gravidade.

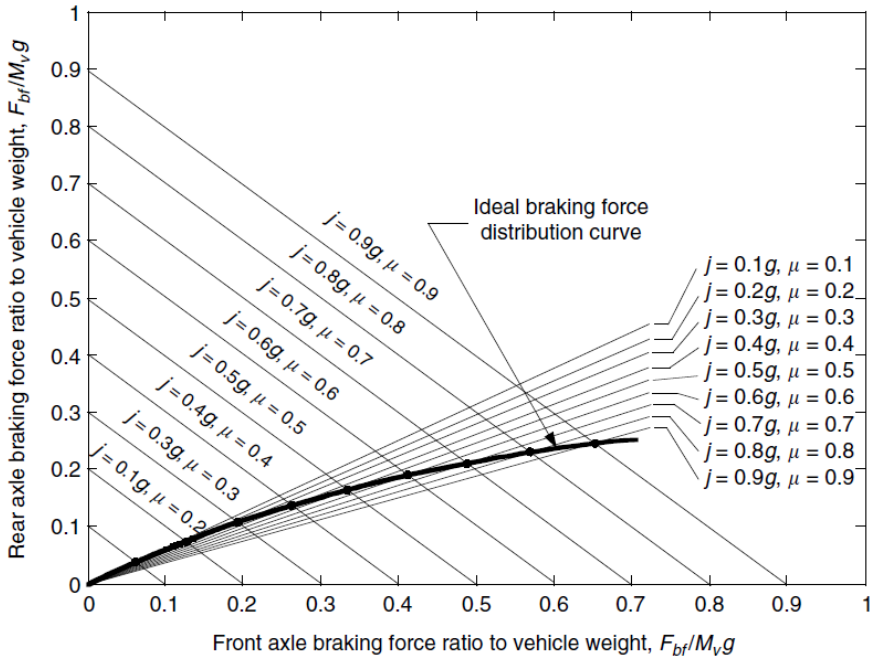


Figura 55. Curva de distribuição ideal de forças de frenagem

As figuras 56, 57 e 58 mostram a força de frenagem, potência de frenagem e energia de frenagem de um veículo de 1500 kg em um ciclo urbano de condução FTP 75. Este exemplo, retirado de [9], possui L=2.7m, La=0.4L, Lb= 0.6L e hg=0.55m.

Estas figuras indicam que: (1) as rodas dianteiras consomem cerca de 65% de toda potência e energia de frenagem. Assim, se a frenagem regenerativa for realizada em apenas um eixo, ela deve ser realizada no eixo frontal. (2) A força de frenagem é quase constante até a velocidade de 50 km/h e ela cai depois de atingir 40 km/h. A figura 51 ainda indica que a maior energia de frenagem é consumida na faixa de velocidade entre 10 até 50 km/h.

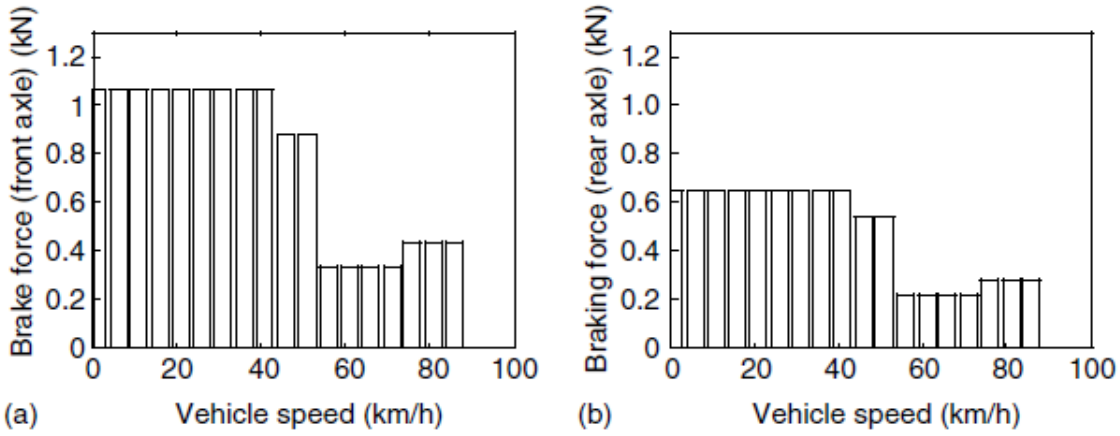


Figura 56. Forças de frenagem vs. velocidade do veículo em um ciclo FTP 75: (a) rodas frontais e (b) rodas traseiras

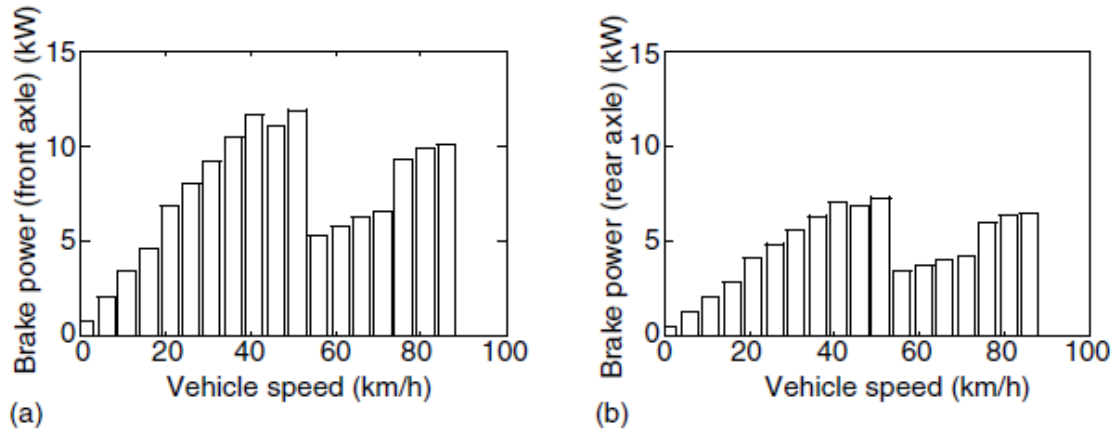


Figura 57.Potência de frenagem vs. velocidade do veículo em um ciclo FTP 75: (a) rodas frontais e (b) rodas traseiras

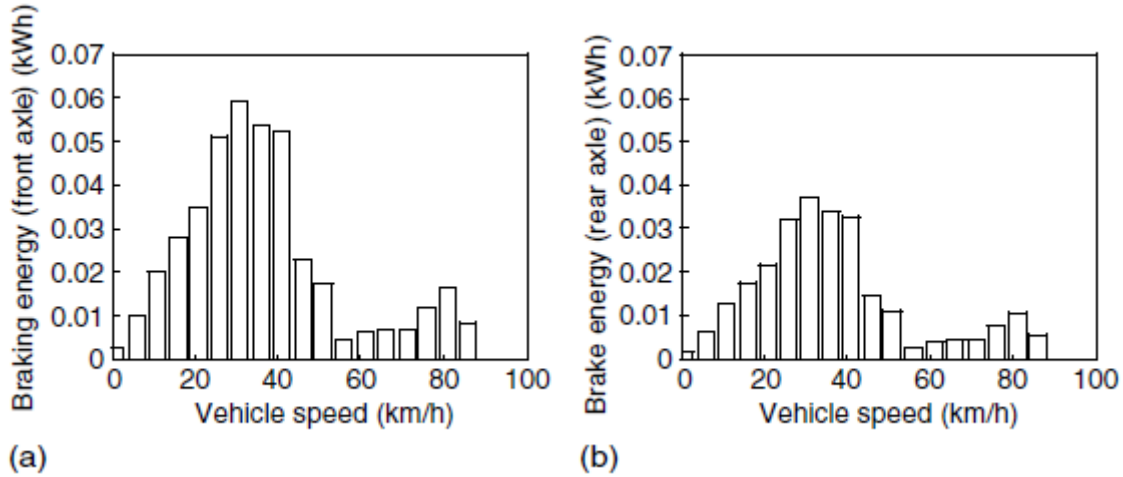


Figura 58.Energia de frenagem vs. velocidade do veículo em um ciclo FTP 75: (a) rodas frontais e (b) rodas traseiras

Frenagem regenerativa em veículos híbridos adiciona certa complexidade ao projeto do sistema de freios. Duas questões principais aparecem: a primeira é como distribuir as forças de frenagem necessárias entre o freio elétrico e o mecânico a fim de se recuperar toda a energia possível; outra questão é como distribuir as forças de frenagem nos eixos dianteiro e traseiro a fim de se manter a estabilidade do carro. Basicamente, de acordo com [9] existem três tipos básicos de estratégias de controle: frenagem em série com a melhor sensibilidade do motorista; frenagem em série com a máxima recuperação de energia possível; e frenagem paralela.

17.1 Frenagem em série – ótima sensibilidade

Neste caso o objetivo do controle é minimizar a distância de frenagem e otimizar a sensibilidade do motorista. Como já mencionado anteriormente, a menor distância na frenagem e uma boa sensibilidade do motorista levam às forças de frenagem, nas rodas dianteiras e traseiras, a acompanharem a curva de distribuição de força de frenagem ideal I.

A figura a seguir mostra o princípio deste tipo de controle. Quando o comando de desaceleração (representado pela posição do pedal de freio) é menor que 0.2g, somente o freio regenerativo nas rodas dianteiras é aplicado, o que anula a função de retardo do MCI em veículos convencionais. Quando o comando de desaceleração é maior que 0.2g, as forças de frenagem nas rodas dianteiras e traseiras seguem a curva I, como mostrado na figura pela linha em negrito.

A força de frenagem na roda dianteira é dividida em duas partes: força de frenagem regenerativa e força de frenagem por fricção mecânica. Quando a força de frenagem demandada for menor do que a máxima força de frenagem que o motor elétrico pode produzir, somente será aplicada a frenagem regenerativa. Quando a força de frenagem demandada for maior do que a força disponível pela frenagem regenerativa, o motor elétrico irá operar para produzir seu máximo torque de frenagem e a força restante é produzida pelo freio mecânico.

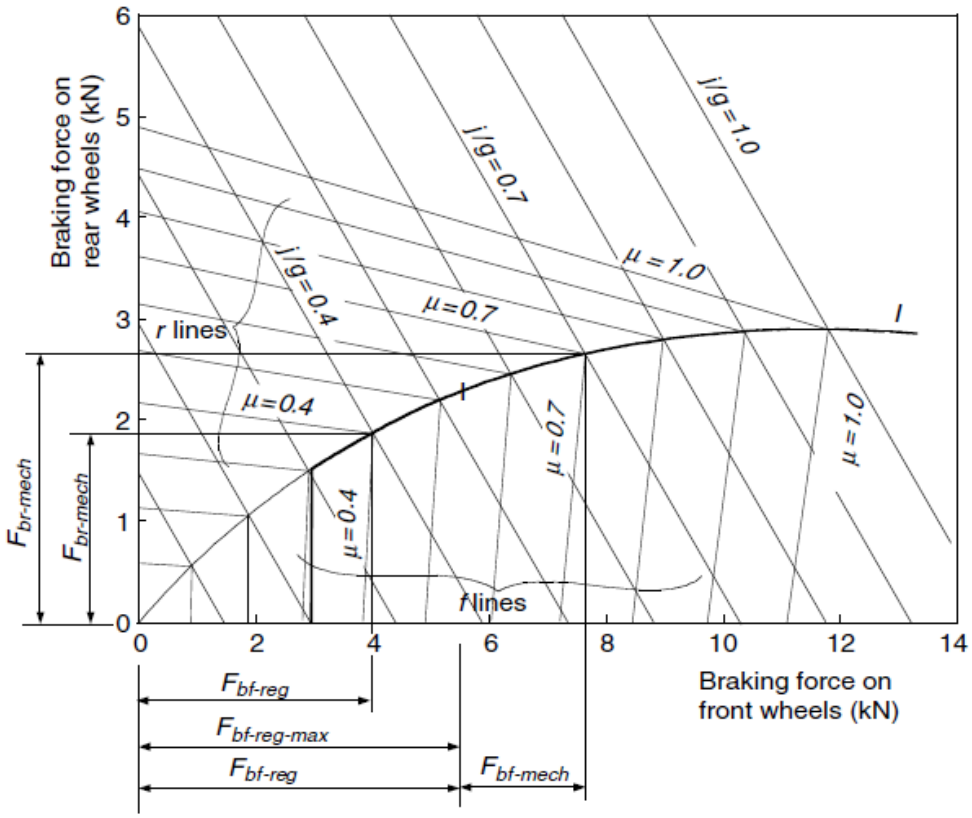


Figura 59. Forças de frenagem nas rodas dianteiras e traseiras para os freios em série - ótima sensibilidade

Deve ser notado que a máxima força de frenagem produzida pelo motor elétrico está relacionada com a velocidade do motor elétrico. Em baixas velocidades (abaixo da sua velocidade base), o torque máximo é constante. Porém, em altas velocidades, o torque máximo decresce hiperbolicamente com a velocidade. Assim, o torque do freio mecânico, dada uma desaceleração, varia com a velocidade do veículo.

17.2 Frenagem em série – ótima recuperação de energia

O princípio desta estratégia de controle é recuperar a máxima energia de frenagem possível com a condição de atender à demanda de frenagem dada uma desaceleração. Este princípio é ilustrado na próxima imagem.

Quanto o veículo é freado com uma taxa de desaceleração de j/g<μ, as forças de frenagem podem variar em uma certa faixa, enquanto $F_{fD} + F_{fT} = M_v j$ for satisfeito. Esta variação de faixa dos eixos dianteiro e traseiro é mostrado pela linha em negrito ab, onde μ=0.9 e j/g=0.7. Neste caso, a

frenagem regenerativa deveria ser usada prioritariamente. Se a força regenerativa disponível (máxima força de frenagem produzida pelo motor elétrico) estiver nesta faixa (ponto “c”, por exemplo), a força de frenagem no eixo dianteiro deve ser fornecida apenas pela frenagem regenerativa sem o freio mecânico. A força de frenagem no eixo traseiro, representado pelo ponto “e”, deve ser de magnitude suficiente para atender a demanda de força de frenagem total. Caso a força de frenagem regenerativa disponível for menor que o valor correspondente ao ponto a, o motor elétrico deve ser controlado de tal maneira que ele produza sua máxima força de frenagem regenerativa. As forças de frenagem frontal e traseira devem ser controladas de tal maneira que tendam ao ponto f a fim de otimizar a sensibilidade do motorista e reduzir a distância de frenagem. Neste caso, uma força de frenagem adicional nas rodas dianteiras deve ser aplicada pelo freio mecânico, e a força de frenagem no eixo traseiro é representada pelo ponto h.

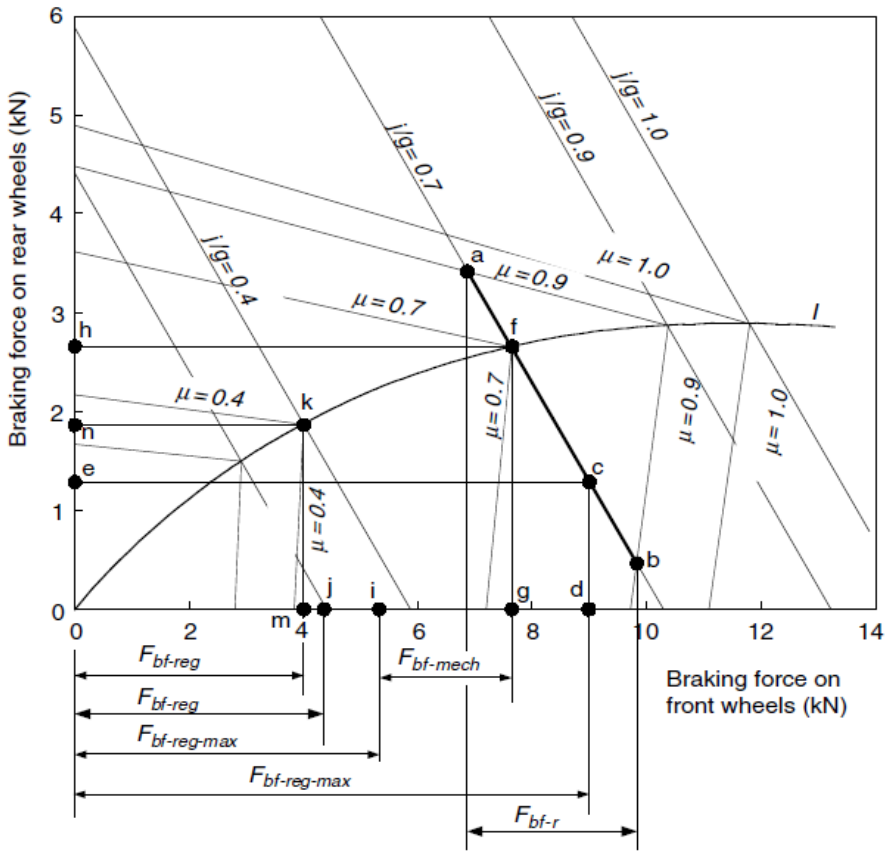


Figura 60. Forças de frenagem nas rodas dianteiras e traseiras para os freios em série - ótima recuperação de energia

Quando a taxa de desaceleração, j/g, é muito menor que o coeficiente de atrito (j/g=0.3 por exemplo), e a força de frenagem regenerativa consegue atender à demanda total, somente frenagem regenerativa é usada sem o uso dos freios mecânicos nos eixos dianteiro e traseiro.

Quando a taxa de desaceleração for igual ao coeficiente de atrito da pista, μ, o ponto de operação das forças de frenagem frontais e traseiras devem estar na curva I.

Quando a taxa de desaceleração for maior que o coeficiente de atrito da pista, esta desaceleração nunca será alcançada devido à limitação da adesão da pista. A máxima aceleração que o veículo terá é (a/g)max=μ. O ponto de operação das forças de frenagem está na curva I, correspondente ao μ.

17.3 Frenagem em paralelo

O sistema de freios em paralelo possui o freio elétrico e o freio mecânico, que produz forças de frenagem em paralelo e simultaneamente. O princípio de operação é mostrado na imagem a seguir e ele possui regeneração apenas no eixo frontal.

O sistema possui um freio mecânico convencional que possui uma taxa fixa de distribuição de forças de frenagem nos dois eixos. O freio regenerativo adicional força de frenagem às rodas dianteiras resultado em uma curva de distribuição de forças total. As forças de frenagem do freio mecânico são proporcionais à pressão do cilindro mestre. A força de frenagem regenerativa gerada pelo motor elétrico é função da pressão hidráulica do cilindro mestre, e, portanto em função da desaceleração do veículo. Como a força de frenagem regenerativa é função da velocidade do motor e como em baixas velocidades a regeneração é muito baixa, a força de frenagem regenerativa em altos valores de desaceleração (a/g=0.9, por exemplo) é projetado para ser zero mantendo assim o balanço das forças de frenagem. Quando a desaceleração demandada for menor que este valor, a frenagem regenerativa é efetiva. Quando a desaceleração é menor que um determinado valor, por exemplo, 0.15g, apenas a frenagem regenerativa ocorre.

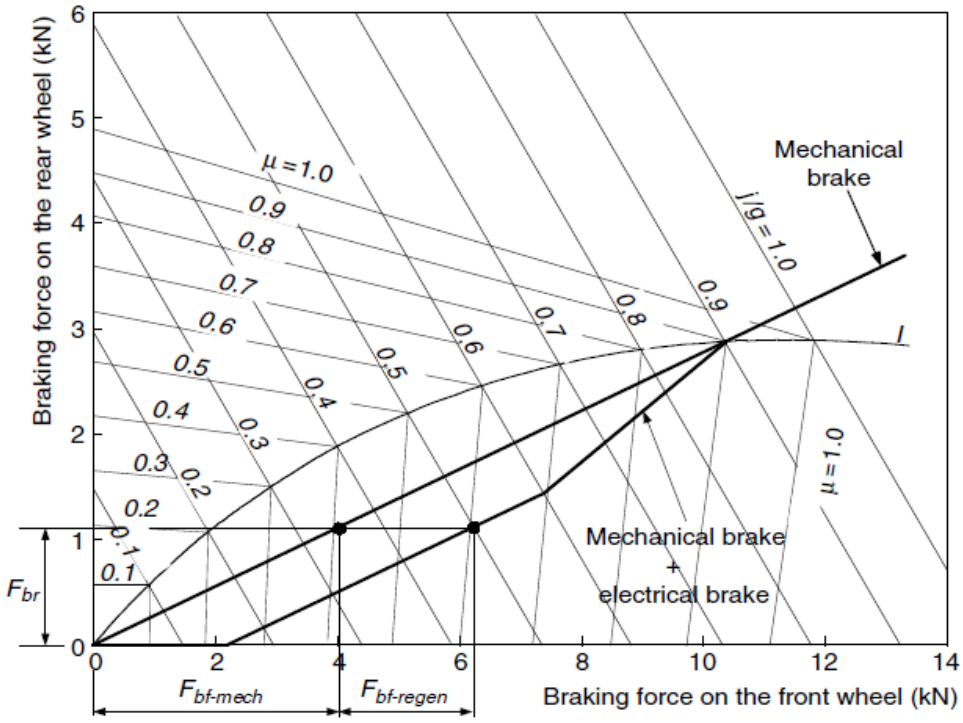


Figura 61. Forças de frenagem nas rodas dianteiras e traseiras para os freios em paralelo

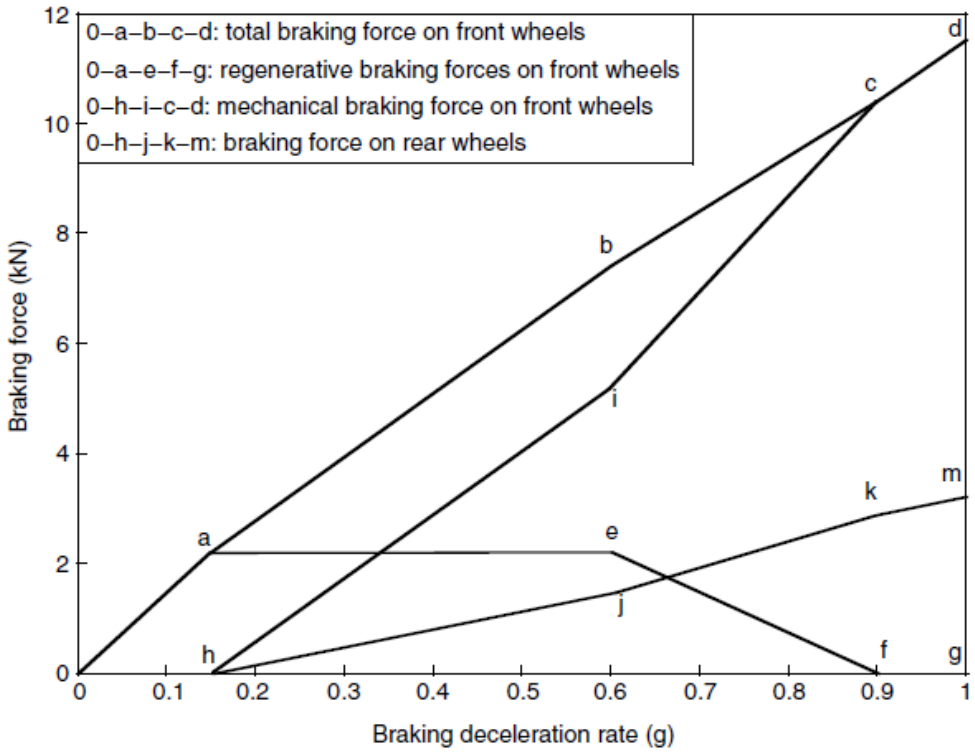


Figura 62. Variação das forças de frenagem com a desaceleração

O sistema de frenagem em paralelo não precisa de um sistema mecânico controlado eletricamente. Há um sensor de pressão hidráulica no cilindro mestre que representa a desaceleração. O sinal de pressão é regulado e enviado ao controlador do motor elétrico para que este produza o torque de frenagem demandado.

Comparado com o sistema de frenagem em série, o sistema em paralelo possui uma construção e um sistema de controle mais simples. Porém, a sensibilidade do motorista e a quantidade de energia recuperada ficam comprometidas. Como o principal objetivo deste trabalho é a diminuição do consumo de combustível, o sistema de frenagem em paralelo acaba por ser uma opção não viável.

Após ter sido considerado os três sistemas de frenagem, o mais apropriado ao veículo em questão é o segundo sistema, pois este oferece uma maior regeneração de energia durante a frenagem. O primeiro sistema oferece uma maior sensibilidade ao motorista e uma maior recuperação de energia do que o sistema em paralelo. Mas como ele não recupera tanta energia quanto o segundo sistema, e, como a sensibilidade do motorista não é um requisito fundamental para o veículo sendo projetado neste trabalho, este sistema acaba por não ser o escolhido.

18. Conclusões

A constante preocupação com o planeta, com as emissões de gases e com um modo de vida mais sustentável fizeram com que a indústria automotiva buscasse uma alternativa aos veículos movidos a motores a combustão interna.Nos últimos anos as pessoas se familiarizaram com os veículos movidos por mais de uma fonte propulsora, veículos movidos por um motor a combustão interna e um motor elétrico. Os veículos híbridos permitem a redução do consumo de combustível e da emissão de poluentes, mas este é apenas o primeiro passo de uma longa jornada que irá acabar em carros elétricos com emissões zero com alta autonomia.

Hoje em dia,os veículos híbridos representam uma solução para os problemas ambientais. Muitas montadoras já estão produzindo e comercializando estes carros, a um preço um pouco mais alto que o convencional pela tecnologia ainda nova. No Brasil, já surgem os primeiros sinais de vida destes veículos, em 2011 chega o Prius da marca japonesa Toyota.

Tendo em vista este cenário, percebeu-se a necessidade de se projetar um veículo híbrido para o mercado nacional. Este trabalho teve como objetivo, escolher a configuração e os componentes ideais de tal maneira que os mesmos atendessem os requisitos de projeto estipulados. Selecionou-se então a arquitetura ideal, o motor a combustão interna, motor elétrico e bateria, assim como o sistema de freios para regeneração de energia.

Conclui-se que a arquitetura mais vantajosa para a aplicação é a Paralela com o motor elétrico sendo utilizado como acoplador de torque e de velocidade, pois assim, seria possível utilizar o motor a combustão interna perto do seu ponto ideal aumentando seu desempenho e eficiência. Além disto, esta configuração é bastante compacta e simples.

Mensurou-se os seus principais componentes e conclui-se que seria necessário um motor elétrico de 41 kW, um motor a combustão de 21 kW e uma bateria de 57 kW e 2,5 kWh.

Estipulou-se também que o motor a combustão interna seria do ciclo Otto e que seria movido a álcool, por ser uma fonte de energia renovável e menos poluente.

O motor elétrico considerado melhor neste estudo foi o de relutância variável por apresentar, entre outras características, as melhores curvas de torque e velocidade, além de ser leve e de custo aceitável.

A bateria selecionada foi a de lítio-íon que já é utilizada em alguns veículos como, por exemplo, no carro da Nissan. Esta bateria possui a mais alta energia específica dentre as três opções além de possuir altos valores de potência de pico e energia específica.

Também foi selecionado o sistema de frenagem regenerativa, no caso, o mais bem avaliado foi o sistema de freios em série com a estratégia de ótima regeneração de energia. Apesar fornecer uma sensibilidade ao motorista menor que os outros, ele consegue recuperar uma maior parte da energia gasta na frenagem.

Ao final última etapa, conclui-se que o projeto como um todo foi bem sucedido. Foram analisados os principais componentes de um veículo híbrido chegando-se a uma configuração bastante real e tangível.

19.Referências Bibliográficas

[1] Braes, H.-H., & Seiffert, U. (2005). *Handbook of Automotive Egineering*. Warrendale: SAE International.

[2] Stone, R., & Ball, J.K., (2004). *Automotive Engineering Fundamentals.* Warrendale: SAE International.

[3] Crolla, D.A., (2009). *Automotive Engineering – Powertrain, Chassis System and Vehicle Body.* Oxford: Butterworth-Heinemann.

[4] Costa, D., & Sharp, B. (2010). Economizar combustível para menos emissões de CO2, a ordem do dia. *Engenharia Automotiva e Aeroespacial,* 30-34.

[5] Costa, D., & Sharp, B. (2010). Economizar combustível para menos emissões de CO2, a ordem do dia - parte 2. *Engenharia Automotiva e Aeroespacial,* 18-20.

[6] Silva, W. M. da, (2010). Veículos elétricos e híbridos: SAE Brasil.

[7] Miller, J. M,(2008). *Propultion System for Hybrid Vehicle*

[8] Hayashida, M. & Narusawa, K. & Odaka, M. & Noda,A.,(1997). *Study on series hybrid eletric commuter-car concept.* Detroit, SAE International.

[9] Mehrdad, E. etal. Modern-Electric-Hybrid-Electric-And-Fuel-Cell-Vehicles. CRC Press 2005.

[10] Xue, X. etal. Selection of Electric Motor Drives for Electric Vehicles (2008), Australasian Universities Power Engineering Conference.

[11] Parra, H. etal. Challanges for Electric Machines and Power Eletronics in Automotive Applications (2009).

[12] Burke, A. (2007). *Batteries and Ultracapacitors for Eletric, Hybrid and Fuel Cell Vehicles.*

[13] Fuhs, A. Hybrid Vehicles and the Future of Personal Transportation. CRC Press 2009.

Sites:

[13] http://www.natureba.com.br/aquecimento-global.htm

[14] http://www.mpgmagazine.com/

[15] http://www.hybridcenter.org/