



Diego Magno Mendes Rodrigues

**Análise da aplicação de diferentes motores em
sistemas de propulsão de Veículos Elétricos**

Projeto de Graduação

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia
Mecânica da PUC-Rio

Orientador: Sergio Leal Braga

Rio de Janeiro

Dezembro de 2017

Agradecimentos

Antes de tudo, gostaria de agradecer a Deus que em suas diversas formas foi minha referência nos momentos difíceis, sem fé nele o caminho teria sido muito mais árduo. Em segundo, gostaria de agradecer a minha família, pelo apoio. Agradecer a minha namorada Ana Beatriz, pela paciência e por estar ao meu lado em todos os momentos, sejam eles os mais difíceis e é claro nos de felicidade. Gostaria também de citar que ao longo da minha trajetória acadêmica conheci muitas pessoas, colegas, professores, alguns se tornaram amigos pessoais e sem eles com certeza esse momento não seria possível. Gostaria de agradecer a esses e aos que ajudaram de alguma forma nesse caminho. Gostaria de agradecer a PUC-Rio por ter me propiciado a melhor experiência acadêmica que eu poderia ter tido. Ao longo desses anos passei por algumas situações difíceis, situações onde acreditei em pessoas e em seus projetos me dedicando dia após dia para que os mesmos se tornassem realidade da melhor forma possível. O que aprendi, da pior maneira é que infelizmente para muitas pessoas ninguém é insubstituível e que só quem tem o desprazer de o ser entende o sentimento. Infelizmente nos dias de hoje as pessoas na maioria das vezes não pensam em outra coisa a não ser no bem-estar próprio. O que eu tiro disso, é que antes de mais nada o ser humano deve se colocar no lugar do outro e que por pior que seja a dificuldade, há sempre um ponto de luz e esperança e um aprendizado para se tirar. Pois só se aprende vivendo (e errando) e quem não vive não tem essa oportunidade.

Resumo

Esta dissertação visa o estudo da aplicação de diferentes motores em sistemas de propulsão de veículos elétricos em paralelo com o dimensionamento desse sistema. Esse estudo tem como um dos principais objetivos proporcionar a modelagem e produção de sistemas automotivos que atendam um novo conceito de matriz energética, no caso a elétrica proveniente de fontes consideradas “limpas” no que diz respeito a pegada de carbono e de menor custo. Para o dimensionamento do sistema de propulsão foi feito um levantamento sobre os principais componentes aplicados nesses sistemas e seus respectivos funcionamentos utilizados em veículos elétricos, assim como as configurações existentes atualmente. Feito esse levantamento, foi realizada uma análise da dinâmica veicular para verificar o resultado da aplicação desses diferentes componentes e como o sistema se comportaria. A análise teórica foi modelada no software de cálculos numéricos Matlab/Simulink onde puderam ser analisadas as variáveis de relevância para o desempenho de um veículo.

Palavras-Chave

Veículo Elétrico, Veículo Elétrico Híbrido, Motor elétrico, Motor Síncrono, Motor Brushless

Abstract

This dissertation aims to study the application of different motors in powertrain systems besides dimensioning these systems. This paper has a main objective of providing the possibility of modeling and producing automotive systems which attend a new concept of energetic matrix, in other words electricity considered “clean” regarding carbon footprint with lower costs. In order to design the powertrain system a research on these systems’ components was carried on to verify its respective behaviors when applied to electric vehicles as well as the existing electric vehicles configurations. In addition, an analysis of the car dynamics was made to evaluate the application of different components and how would be the system’s behavior. The analysis modeled in a numerical calculation software Matlab/Simulink where the relevant variables to cars’ performances were measured.

Keywords

Electric Vehicles, Hybrid Electric Cars, Motors, Synchronous motor, Brushless motor

Sumário

Introdução	9
Contexto histórico.....	10
Subsistemas de um Veículo	12
Powertrain	12
Suspensão	12
Direção.....	12
Estrutural (carroceria)	13
Arquitetura de Veículos Elétricos	14
1. Veículo Elétrico a Bateria – VEB	14
2. Veículo Elétrico Híbrido – VEH.....	14
2.1. MCI em Série com ME	14
2.2. MCI em paralelo com ME.....	14
3. Veículo Elétrico de Célula de Combustível.....	14
4. Veículo Elétrico Ligado à Rede	15
5. Veículo Elétrico Solar	15
Arquitetura de Veículos Elétricos Híbridos	16
Sistemas Híbridos em Série.....	16
Sistemas Híbridos em Paralelo.....	17
Sistemas Híbridos Combinação Série - Paralelo	17
Powertrain de um VEH.....	18
Motor Elétrico	19
Motor de Indução	20
Motor Síncrono	21
Motor de CC Brushless.....	21
Motor de CC Com Escovas	22
Motor de Relutância Variável.....	22
Bateria.....	24
Inversor de Frequência	27
Retificador	28
Análise Teórica da dinâmica veicular	30
Modelagem do sistema	36
Parâmetros do sistema	36
Resultados	43
Relação de Transmissão	44

Análise da utilização de 4 motores.....	47
Alimentação dos motores	52
Motor AC.....	52
Motor DC	53
Conclusão	56
Referências Bibliográficas	57

Lista de Figuras

Figura 1 – Variação do preço do petróleo	10
Figura 2 – Custo energético acumulado VE x VCI	11
Figura 3 – Sistema Híbrido em Série	16
Figura 4 – Sistema Híbrido em Paralelo.....	17
Figura 5 - Comparação da curva de torque de um ME com um MCI	19
Figura 6 - Motor Elétrico de CC sem escova.....	21
Figura 7 - Motor elétrico de CC Com Escovas	22
Figura 8 - Motor de Relutância variável.....	23
Figura 9 - Variação de corrente e tensão com nível de carga (SoC).....	24
Figura 10 - Bateria dentro de um powertrain híbrido	25
Figura 11 - Inversor de frequência com pontes e modulação de sinal	27
Figura 12 - Circuito de um retificador	28
Figura 13 - Esforços inerentes a um veículo	30
Figura 14 - Modelo Geral - Motor Trifásico Síncrono	37
Figura 15 - Car Dynamics Model.....	38
Figura 16 - Modelo do Motor Síncrono.....	38
Figura 17 - Torque do motor ao longo do tempo	39
Figura 18 - Potência do motor ao longo do tempo	40
Figura 19 - Modelo do Motor Brushless DC	40
Figura 20 - Modelo da bateria	41
Figura 21 - Seção de cabos de acordo com sua capacidade de condução de corrente e instalação	42
Figura 22 - Distância percorrida pelo veículo ao longo do tempo.....	44
Figura 23 - Velocidade desenvolvida pelo veículo ao longo do tempo.....	45
Figura 24 - Torque desenvolvido pelo motor AC ao longo do tempo	45
Figura 25 - Distância Percorrida pelos veículos com motores Brushless DC e AC Síncrono.....	48
Figura 26 - Velocidade desenvolvida pelo veículo com motores Brushless DC e AC Síncrono.....	49
Figura 27 - Aceleração desenvolvida ao longo do tempo pelo veículo com motores Brushless DC e AC Síncrono	49
Figura 28 - Torque fornecido pelos motores Brushless DC e AC Síncrono	50
Figura 29 - Potência necessária para cada motor.....	50
Figura 30 - Tensão entregue ao motor pelo inversor	52
Figura 31 - Corrente necessária para o motor AC.....	52
Figura 32 - Tensão entre fases	53
Figura 33 - Corrente necessária para o motor DC	53
Figura 41 - Aceleração de veículos de auto rendimento	55

Lista de tabelas

Tabela 1: Custo de Abastecimento Relativo a 100 km - 1º Trim. 2015	11
Tabela 2 - Comparação entre Motores Elétricos	23
Tabela 3 - Tipos de Bateria e suas aplicações.....	26
Tabela 4 – Características de Veículos Híbridos e Elétricos	29
Tabela 5 - Parâmetros Gerais do Veículo	36
Tabela 6 - Pneu 215/60 R16	37
Tabela 7 - Parâmetros do Motor utilizado na análise de relação.....	44
Tabela 8 - Parâmetros do Motor AC Síncrono	47
Tabela 9 - Parâmetros do Motor Brushless DC.....	47
Tabela 10 - Tempo necessário para atingir a velocidade de 100 km/h por diferentes veículos	54

Introdução

Buscas incessantes pela diminuição da emissão de gases estufa a fim de combater as mudanças climáticas que vem afetando diversas regiões do mundo vem aumentando os esforços pela diminuição de utilização de motores a combustão interna (MCI). Nessa grande empreitada, veículos elétricos vem se tornando um aliado de peso. De acordo com a Agência Internacional de Energia, o número de veículos elétricos passou da ordem de centenas em 2005 para mais de 1 milhão de unidades em 2015, apresentando ainda um aumento de 60% em 2016. Em paralelo ao desenvolvimento de carros elétricos e aos anúncios de grandes montadoras de datas limites para produção de carros que utilizam motores a combustão interna como única forma de propulsão como por exemplo por parte da Volvo, há também uma corrida mundial pela utilização de fontes renováveis de energia como as energias eólica e solar. Tal transformação também nas matrizes energéticas mundiais se deve ao fato de tentar tornar a eletro mobilidade o mais eficiente possível. Mesmo com tais aumentos, não existe um sistema de propulsão elétrica que seja unanimidade no mercado de carros elétricos. Isso ocorre devido ao fato de que a energia demandada por veículos elétricos necessita de sistemas de armazenagem muito robustos, ou seja, de grandes dimensões. Isso pode ser noticiado pela diferença de autonomia entre os carros existentes no mercado atualmente onde um modelo tido como o mais eficiente do mercado possui autonomia de cerca de 500 km enquanto a maioria dos modelos encontram dificuldades para percorrer 160km a partir da carga total. A partir disso, o presente trabalho visa analisar a aplicação de diferentes motores elétricos e suas grandezas, necessárias para a modelagem de um sistema de transmissão híbrido em série, isto é, um sistema que une geração de energia elétrica para alimentar a bateria que alimenta o motor elétrico responsável por suprir a demanda dos veículos por ambos torque e velocidade.

Contexto histórico

Os registros da utilização de MCI em automóveis já constam de 1789, quando foi concedida a primeira patente ao Norte-Americano Oliver Evans. Mas foi só em 1888 que Karl Benz deu início a primeira linha de produção de veículos que utilizavam MCI. Porém, ao longo dos anos o mercado automobilístico vem sofrendo com as variações e altos preços praticados pela indústria do petróleo para com seu produto final. A indústria automobilística, por sua vez começou estudos e implementação de formas alternativas ao veículo que até então utilizava MCI. Uma das soluções escolhidas foi a adoção de veículos que utilizam como forma de propulsão, motores elétricos. Veículos elétricos são altamente reconhecidos pela não emissão de gases estufa e por serem altamente silenciosos.

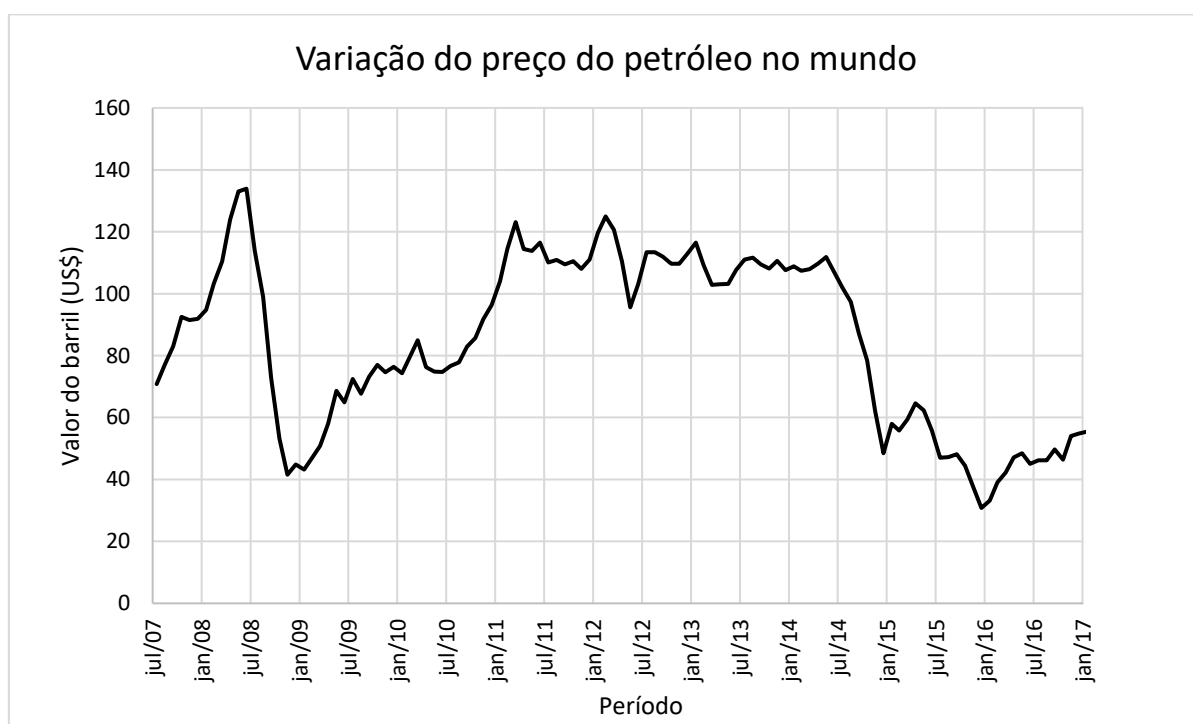


Figura 1 – Variação do preço do petróleo
Fonte: US Energy Information Administration

Em um estudo realizado pela Universidade de Brasília – UNB foi feita uma análise comparativa entre a utilização de VE e VCI para transporte de cargas da Empresa Brasileira de Correios e Telégrafos. A utilização dos veículos elétricos por parte da companhia parte do seu compromisso firmado de redução de emissões de CO_2 em 20%. A partir de uma frota de 23,4 mil VCI, foram realizados vários testes, onde 3 carros de idades diferentes, modelo Renault Kangoo foram escolhidos aleatoriamente da sua frota. Como os VCI são modelos flex, ou seja, podem ser abastecidos tanto com gasolina quanto com etanol, foi feito o cálculo levando em consideração o custo energético de cada um e dessa forma a gasolina foi escolhida para o estudo por seu alto custo. Inicialmente foram comparados os valores relativo a 100 km percorridos como pode ser visto na tabela 1.

Tabela 1: Custo de Abastecimento Relativo a 100 km - 1º Trim. 2015

<i>Nº de Veículos</i>	<i>Autonomia (100km)</i>	<i>Custo (R\$)</i>	<i>Custo Total (R\$/100km)</i>
1 VCI	16,99 L	R\$ 3,47/L	R\$ 58,96
1 VE	15,38 kW	R\$ 0,55/kW	R\$ 8,46

Fonte [2]

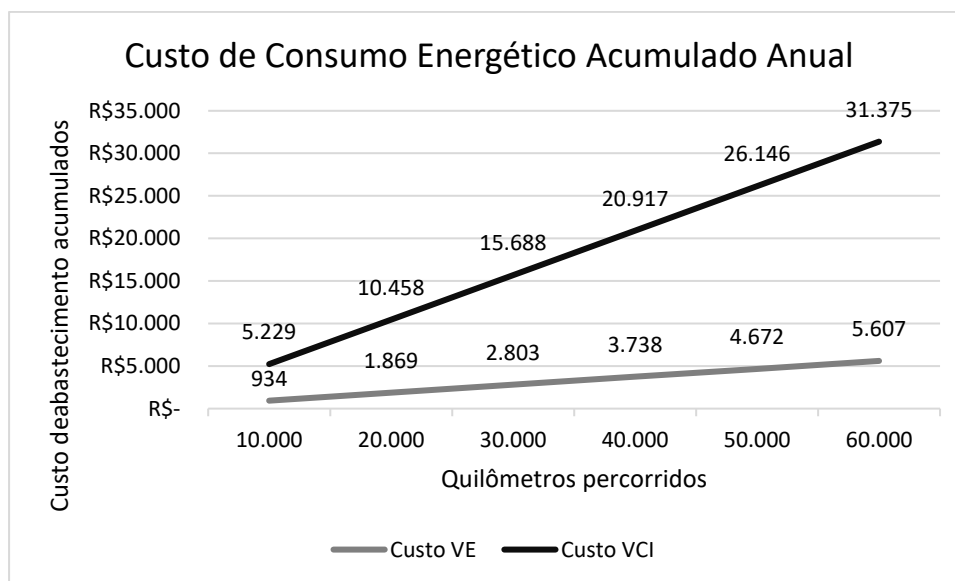


Figura 2 – Custo energético acumulado VE x VCI

Fonte [2]

Subsistemas de um Veículo

Powertrain

Na engenharia há diferentes maneiras pelas quais pode se aplicar uma carga ou esforço sobre um corpo. A intenção é que esse saia de uma posição de repouso e passe a se locomover no espaço ou mesmo aumente a velocidade em que se encontra, a esse tipo de esforço damos o nome de propulsão. Propulsão é então definido como o fenômeno da aplicação de um impulso sobre um corpo, matematicamente pode ser descrito como a variação da força exercida por unidade de tempo.

Por décadas a forma utilizada como propulsão para veículos foi basicamente o motor a combustão interna. O motor a combustão interna se utiliza da ignição de uma mistura de ar e combustível para impulsionar um pistão que se desloca transversalmente no interior da câmara de combustão. Na outra extremidade do pistão, existe uma biela acoplada ao eixo de manivela, que juntos fazem a conversão do movimento transversal em movimento de rotação. Este movimento de rotação é então transmitido as rodas do veículo por meio de uma caixa de marchas. Ao conjunto responsável pela geração de força e pela entrega dessa até a roda que tem o papel de interface veículo solo se dá o nome de powertrain.

Suspensão

É o sistema responsável por amortecer os impactos provenientes das irregularidades dos terrenos onde o veículo trafega não deixando que um esforço afete integralmente a estrutura do veículo ou mesmo o condutor. A suspensão pode utilizar um conjunto de molas ou amortecedores pneumáticos/hidráulicos que são acopladas a estrutura do veículo e as rodas permitindo que essas transladem verticalmente ou inclinem em relação ao plano vertical (cambagem).

Direção

Sistema que permite ao condutor controlar o ângulo das rodas com relação ao plano horizontal. Esse sistema é constituído do volante, componente através do qual o condutor define a direção do veículo, o volante por sua vez é acoplado a coluna de direção, responsável pela rotação da caixa de direção que está diretamente ligada as rodas através das barras de direção. As caixas de direção mais utilizadas são a manual, hidráulica e elétrica.

Estrutural (carroceria)

A carroceria ou chassi como é amplamente conhecido é o componente estrutural do veículo. Ele é responsável por alojar e conectar todos os outros sistemas, assim como prover segurança aos usuários do veículo em casos de impactos.

Arquitetura de Veículos Elétricos

Os veículos elétricos podem adotar diferentes arranjos, mas mantendo o conceito de utilizar pelo menos um motor elétrico como forma de propulsão. Seguindo esse conceito os carros são distribuídos em cinco arquiteturas diferentes com relação ao powertrain.

1. Veículo Elétrico a Bateria – VEB

Esses tipos de veículos usam como fonte de energia baterias que são carregadas somente com eletricidade proveniente da rede elétrica. A bateria pode ser recarregada utilizando simplesmente uma tomada.

2. Veículo Elétrico Híbrido – VEH

São veículos que utilizam uma combinação de sistemas de propulsão como por exemplo motor elétrico e motor a combustão interna, com finalidade de melhorar ou a autonomia do veículo ou seu desempenho com relação a torque ou potência. Os veículos híbridos possuem atualmente dois arranjos principais.

2.1. MCI em Série com ME

Esse tipo de arranjo utiliza um MCI acoplado a um gerador para carregar a bateria, que serve de alimentação para o motor elétrico (ME) que tem como função a propulsão do veículo.

2.2. MCI em paralelo com ME

Veículos híbridos com esse tipo de arranjo usam ambos os motores como forma de propulsão. Geralmente o ME atua como forma de propulsão principal, já o MCI só opera em condições de baixos níveis de bateria ou quando há exigência por potência ou torque.

3. Veículo Elétrico de Célula de Combustível

Nesse tipo de veículo utiliza-se hidrogênio como fonte de energia. A célula de combustível tem o papel de converter o hidrogênio em eletricidade, este processo ocorre através da mistura do mesmo com oxigênio. Além da eletricidade outro produto dessa mistura é vapor d'água que é então liberado para o ambiente.

4. Veículo Elétrico Ligado à Rede

Geralmente utilizado em transportes públicos, esses tipos de veículos são diretamente ligados a rede elétrica através de um dispositivo na parte superior do automóvel. A energia fornecida para o veículo aciona os motores responsáveis pela propulsão do sistema de transmissão.

5. Veículo Elétrico Solar

Esse tipo de veículo utiliza um sistema de placas fotovoltaicas para transformar energia solar em eletricidade e então alimentar os motores elétricos. Ainda há muitas limitações para essa solução devido as grandes dimensões necessárias pelas células fotovoltaicas devido a sua baixa eficiência energética.

Contudo, a baixa experiência que ainda se tem sobre esse tipo de veículos dificulta uma troca em grandes escalas da frota automotiva. Grande parte desses problemas é relacionada com sua baixa autonomia. As baterias utilizadas em VE possuem uma baixa capacidade de armazenamento, grandes dimensões e um elevado tempo de carga.

Arquitetura de Veículos Elétricos Híbridos

Veículos elétricos híbridos são veículos que apesar de utilizarem motores elétricos, utilizam também outra forma de energia, seja para gerar propulsão ou simplesmente, gerar energia para o sistema existente. Mais recentemente foram desenvolvidos também os veículos “plug-in” que se utilizam de uma tomada embarcada para que as baterias possam ser recarregadas utilizando a energia da rede elétrica. O presente trabalho terá como foco os sistemas híbridos que possuem motores elétricos combinados com motores a combustão interna, seja para aumento de autonomia ou para melhorar de desempenho.

Sistemas Híbridos em Série

Veículos híbridos em série utilizam um motor a combustão interna acoplado a um gerador, a fim de alimentar a bateria com energia elétrica. A bateria por sua vez, é usada para abastecer o motor ou motores elétricos responsáveis pela propulsão do veículo. Em alguns casos, o motor elétrico pode desempenhar mais de uma função como a de gerador. O motor elétrico é acoplado ao sistema de transmissão, que por sua vez é acoplado as rodas do veículo. Na figura (3) está esquematizado um sistema híbrido em série com utilização de um motor DC.

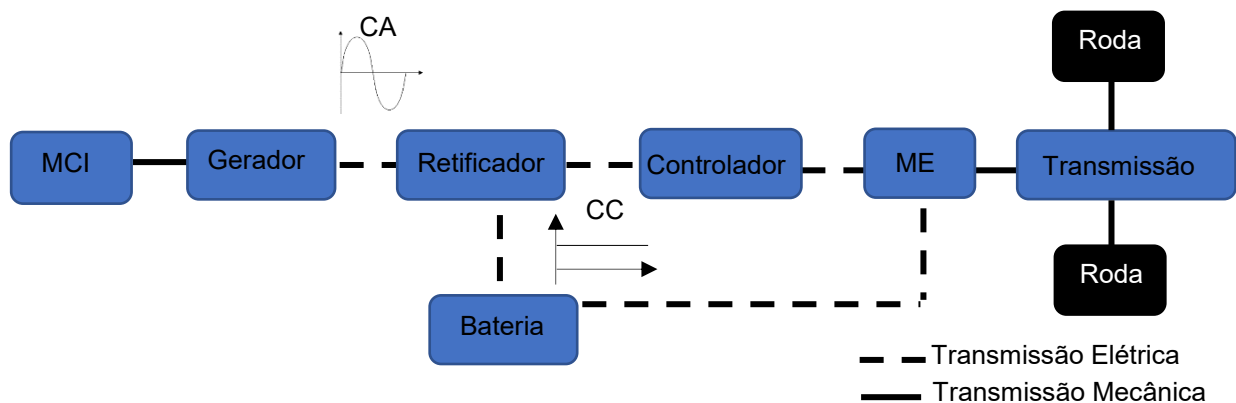


Figura 3 – Sistema Híbrido em Série

Sistemas Híbridos em Paralelo

Veículos híbridos em paralelo apresentam dois motores, sendo um elétrico e outro abastecido por outra fonte de energia, geralmente um MCI. Os dois motores são acoplados ao mesmo sistema de transmissão mecânica habilitando o funcionamento do veículo somente com o MCI, com o motor elétrico ou com ambos. O motor elétrico é geralmente usado como gerador durante descidas, frenagens, quando o veículo está parado ou simplesmente quando há um baixo nível de bateria, nestes dois últimos casos o veículo é acionado apenas pelo MCI. Na figura (4) está esquematizado um sistema híbrido em paralelo com utilização de um motor DC.

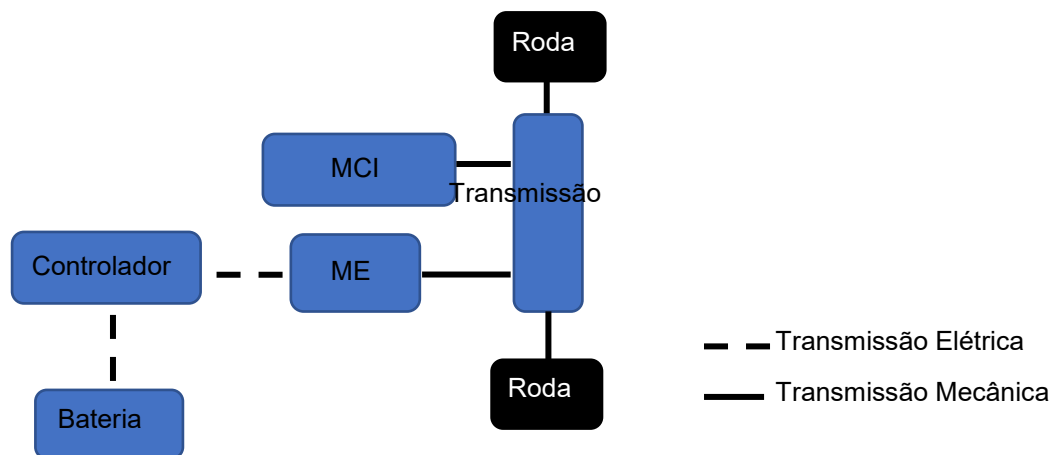


Figura 4 – Sistema Híbrido em Paralelo

Sistemas Híbridos Combinação Série - Paralelo

Esta configuração de veículo híbrido possui um arranjo similar ao dos VEH em paralelo, porém, seu diferencial é a combinação das duas formas de propulsão de forma a otimizar o desempenho do veículo e aproveitamento maior de energia. Um controlador é responsável por definir qual motor será utilizado de acordo com a demanda por mais torque ou velocidade resultando no acionamento de um ou outro motor. Veículos com combinação de motores aproveitam eventos como frenagem, repouso do veículo durante o trânsito seja por um semáforo, seja por congestionamentos para gerar energia para carregamento das baterias. Isso se dá através do acionamento por parte do controlador para que se utilize o ME como gerador que por sua vez carrega a bateria.

Powertrain de um VEH

O powertrain é o subsistema do carro responsável pela interface entre usuário e as variáveis utilizadas para medir a performance de veículos como velocidade e torque. Em um VEH o usuário ao efetuar um comando no pedal do acelerador ou de freio pode aumentar ou diminuir a velocidade do veículo, respectivamente. O comando do usuário através dos pedais é convertido em sinal elétrico e enviada ao controlador do veículo. O controlador por sua vez é responsável pelo envio do sinal de acionamento do sistema de tração. Veículos elétricos híbridos podem ter diferentes configurações quanto a arquitetura de seu powertrain dependendo do sistema utilizado, ou seja, em série ou em paralelo como citado no presente trabalho anteriormente. Para sistemas em série essas diferenças envolvem como os motores elétricos são utilizados e quantos são utilizados.

Veículos em geral são avaliados quanto a sua velocidade máxima, tempo de resposta e capacidade de subir um plano inclinado. Para satisfazer essas variáveis é preciso conhecer o comportamento do elemento do sistema responsável pela transformação de energia de abastecimento em energia mecânica.

MCI variam seu torque com um respectivo aumento da rotação de forma não linear até um limite físico. Com o aumento da rotação do eixo do motor há um decréscimo do torque entregue pelo motor. Com isso, para obter um melhor aproveitamento de um MCI e atender aos diversos cenários a que um veículo está sujeito são utilizadas transmissões que contemplam um trem de engrenagens formando relações de transmissão que irão aumentar ou diminuir torque e rotação.

Já um ME possui torque máximo em baixa rotação e permanece constante até a rotação base do motor. Rotação base é a rotação onde há enfraquecimento do campo magnético resultante da diminuição do fluxo com aumento da frequência, gerando consequentemente a queda de torque. Para rotações acima da rotação base o torque por sua vez começa uma queda de forma não linear com o aumento da rotação.

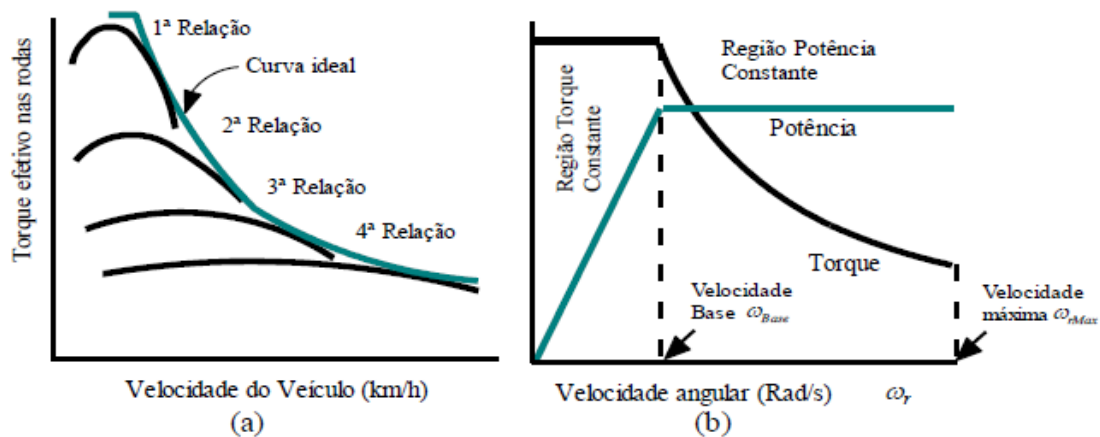


Figura 5 - Comparação da curva de torque de um ME com um MCI
Fonte [6]

Motor Elétrico

O ME é sem dúvidas um dos principais componentes do powertrain de um VE. Já que o mesmo é responsável por transformar a energia elétrica em energia cinética, mais especificamente em movimento de rotação. Motores utilizados em veículos elétricos devem possuir:

- Capacidade de fornecer alta cargas em baixa rotação e atingir altas rotações com carga reduzida;
- Ampla faixa de velocidades;
- Baixa emissão de ruídos;
- Alta eficiência energética;
- Baixo custo;
- Repetitividade das medidas relacionadas as variáveis de saída;
- Robustez;
- Alto tempo de vida.

Atualmente são utilizados em veículos elétricos basicamente dois tipos de motores elétricos, os motores elétricos de corrente contínua CC/DC dos quais são utilizados os motores com ou sem escova. E também os motores elétricos de corrente alternada AC.

Motor de Indução

Motores de indução utilizam corrente alternada para seu funcionamento. Atualmente são amplamente utilizados na indústria nas mais diversificadas áreas devido ao seu baixo custo, alta eficiência e robustez. Geralmente são alimentados com tensão proveniente da rede, porém quando utilizados em veículos elétricos são alimentados por inversores de frequência. Motores de indução são compostos por um estator, onde ficam alojadas bobinas, uma vez que se aplica uma tensão às bobinas, um campo eletromagnético de onda senoidal é formado. Esse campo eletromagnético induz então uma tensão alternada na bobina do rotor que devido a sua formação resulta no movimento de rotação do eixo.

No funcionamento em baixas rotações a tensão fornecida ao motor é proporcional a rotação do motor. Para rotações acima da velocidade base a tensão de alimentação atinge seu valor máximo.

A rotação no eixo dos motores de indução pode ser obtida através da equação (1)

$$n = \frac{120f_1}{p}(1 - s) \quad (1)$$

O torque pode ser obtido de acordo com a equação (2)

$$T_m = k_1 \phi_m I_2 \quad (2)$$

Onde o fluxo magnético ϕ_m pode ser calculado de acordo com a equação (3)

$$\phi_m = k_2 \frac{V_1}{f_1} \quad (3)$$

Onde,

n : Velocidade de rotação do eixo (rpm);
 f_1 : Frequência Fundamental da tensão de alimentação (Hz);
 p : Número de polos;
 s : Escorregamento;
 I_2 : Corrente rotórica (A);
 V_1 : Tensão estatórica (V);
 k_1 e k_2 são as constantes relacionadas ao material e geometria dos motores

Motor Síncrono

Motores síncronos são máquinas capazes de transformar energia elétrica em mecânica, ou seja, em torque e rotação, funcionando assim como um motor. Essas máquinas também tem a capacidade de funcionar como um gerador, isto é, a partir da aplicação de um torque no seu eixo o motor síncrono é capaz de gerar energia elétrica de corrente alternada. Uma das particularidades desse motor é o “sincronismo” entre a rotação do rotor e a frequência de alimentação do mesmo.

Motores síncronos possuem estator formado por bobinas alimentados por correntes alternadas e rotores alimentados com corrente contínua. Essas máquinas possuem como características importantes a capacidade de suportar variações de carga com velocidade constante possuindo potências relativamente altas associadas a dimensões menores que os motores convencionais proporcionando um alto rendimento.

Motor de CC Brushless

Motores de corrente contínua assim como os de indução são constituídos por um rotor, parte móvel, e um estator, parte fixa. Diferentemente dos motores de indução, os rotores são feitos a partir de um número par de ímãs permanentes responsáveis pelo torque desenvolvido pelo motor de CC sem escova. Motores sem escovas tem como vantagens o fato de ter menor demanda por manutenção já que não possuem escovas levando a uma maior vida útil, podem alcançar elevados torques e velocidades, o que resulta em alta eficiência.

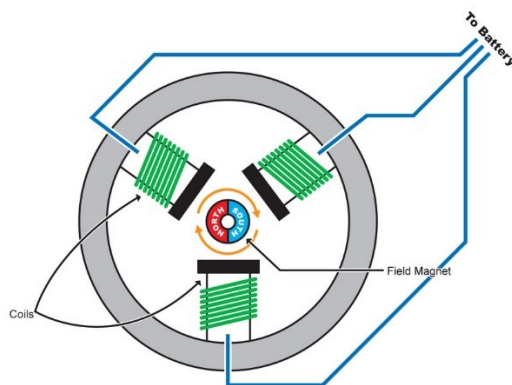


Figura 6 - Motor Elétrico de CC sem escova

Motor de CC Com Escovas

Nesse motor, as escovas são acopladas ao comutador e alimentadas com corrente contínua. O campo magnético da estrutura fixa, que pode ser formada por um estator ou ímãs permanentes, atua diretamente nas espiras do rotor acopladas ao comutador que tem por função fazer a inversão da corrente, fazendo que o torque não varie a direção. Uma vez que há corrente nas espiras do rotor em combinação com o campo magnético, uma força eletromagnética é gerada perpendicularmente ao sentido da corrente, gerando a rotação do rotor.

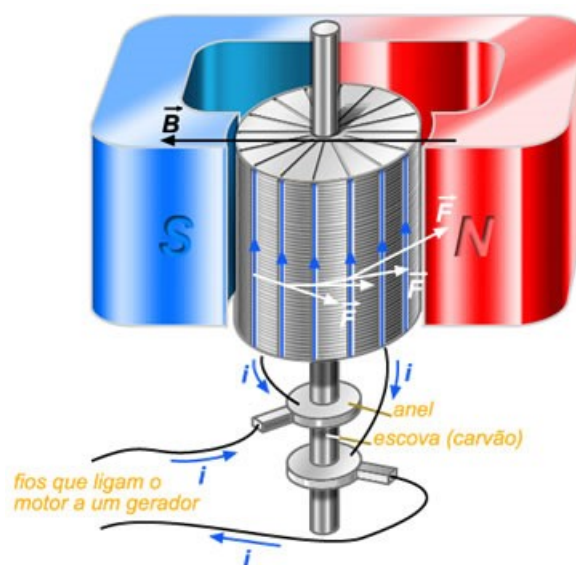


Figura 7 - Motor elétrico de CC Com Escovas

A variação do torque em motores de corrente contínua pode ser modelada de acordo com a seguinte equação.

$$T_m = k_v V - k_\omega \omega_m \quad (4)$$

Motor de Relutância Variável

Também conhecido como motor de passo, o MRV é amplamente usado quando se deseja precisão na rotação do eixo o que justifica sua grande utilização em sistemas que demandam controle com ajustes finos. Assim como motores de CC sem escova, MRV não utilizam comutadores nem escovas. MRV utilizam um rotor com polos magnéticos, o rotor possui formato de uma roda dentada onde cada par de dentes fica alinhado com o par de bobina energizada. Esses motores têm como vantagens altas velocidades, porém possuem alto torque ripple resultante de ruídos no sinal

de alimentação ou de fontes mecânicas, uma outra desvantagem é o alto ruído sonoro.

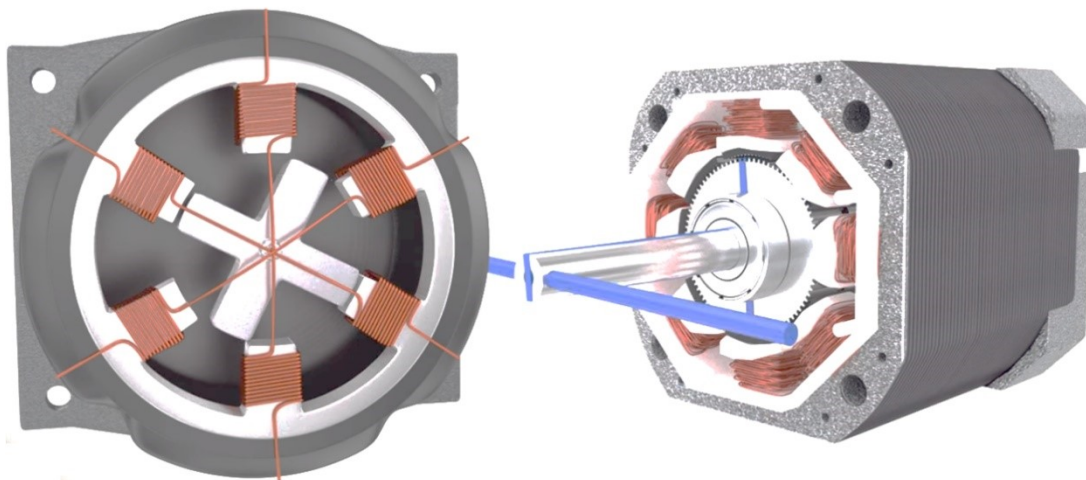


Figura 8 - Motor de Relutância variável
Tabela 2 - Comparação entre Motores Elétricos

A tabela (2) mostra uma comparação entre os motores apresentados no presente trabalho. Em termos de comparação, o valor 5 foi atribuído ao índice mais qualificado, por exemplo, valor 5 para os motores mais leves e 5 também para os motores com menor custo. Pode se ver claramente que os motores CC com ímã e de relutância variável apresentam maior eficiência e baixo custo que está diretamente relacionado a sua alimentação e a facilidade de controle. No entanto, são reconhecidamente pesados, o que dificulta sua utilização quando são necessários motores de alta potência. Já motores de indução apresentam peso menor combinados com uma alta eficiência, mas inferior aos de CC com ímã permanente e de relutância variável.

Índice	Motor CC	Motor de Indução	Motor CC com Ímã Perm.	Motor de Rel. Variável
Eficiência	2	4	5	4,5
Peso	2	4	4,5	5
Custo	5	4	3	4
Total	9	12	12,5	13,5

Fonte: Australian Universities Power Engineering Conference (AUPEC' 08)/ Paper P-170[24].

Bateria

Bateria é o componente responsável pelo armazenamento da energia elétrica que é utilizada pelo ME na propulsão do veículo. A estrutura de uma bateria contém pilhas em série ou paralelo formadas por células que podem conter anodos (positivo) ou catodos (negativo). Baterias aplicadas em veículos elétricos devem ser capazes de proporcionar ao veículo autonomia e um bom desempenho. Muitos tipos de baterias são utilizados atualmente, mas as que atendem o segmento automotivo da melhor forma são as baterias de Íon-Lítio e Lítio polímero. Isso se deve ao fato de que essas baterias têm maior capacidade de armazenamento de energia com dimensões menores, ou seja, maior densidade de energia. Baterias de lítio possuem também ciclos de carregamento e descarregamento maior que o das baterias convencionais, ou seja, possuem vida útil mais longa além do fato de não necessitarem estar totalmente carregadas para que se obtenha um bom desempenho dos motores elétricos. No entanto, o nível de bateria e temperatura das mesmas influenciam diretamente na potência entregue ao motor. Assim como em temperaturas extremas, baixos níveis de carga limitam a potência das baterias.

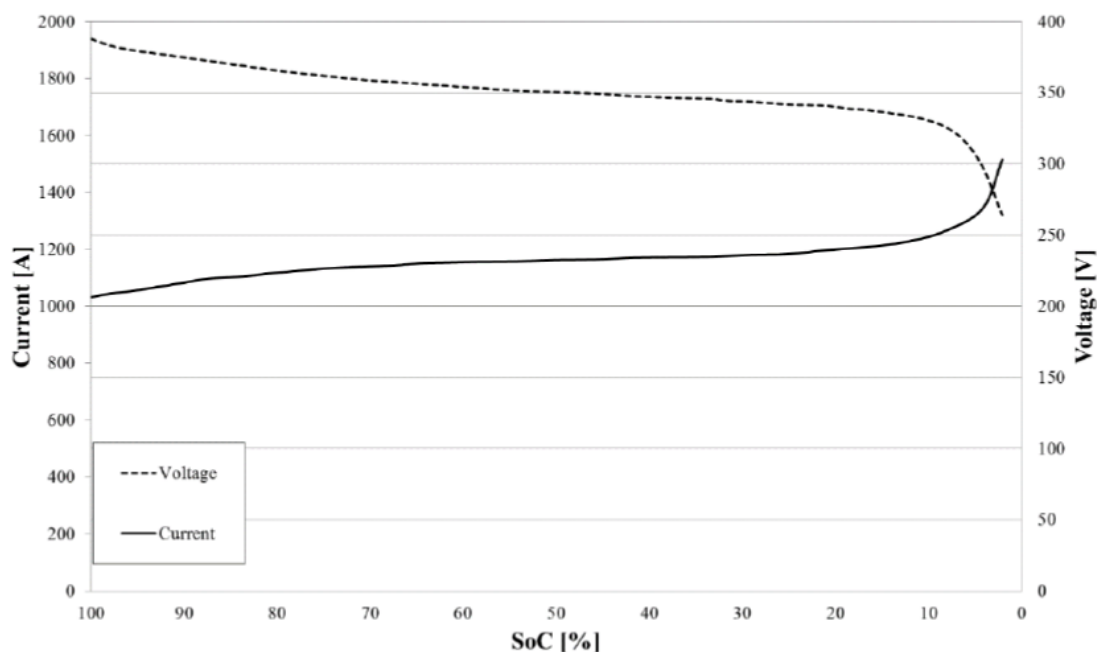


Figura 9 - Variação de corrente e tensão com nível de carga (SoC)
Fonte [1]

Schueppel, F em seu estudo sobre desenvolvimento de baterias para VE, esses veículos funcionam com potência máxima apenas com níveis de carga (SoC), entre 80% e 100% para temperaturas entre 10° e 30° Celsius. Uma vez que a bateria atinge níveis de carga menores a potência cai consideravelmente.

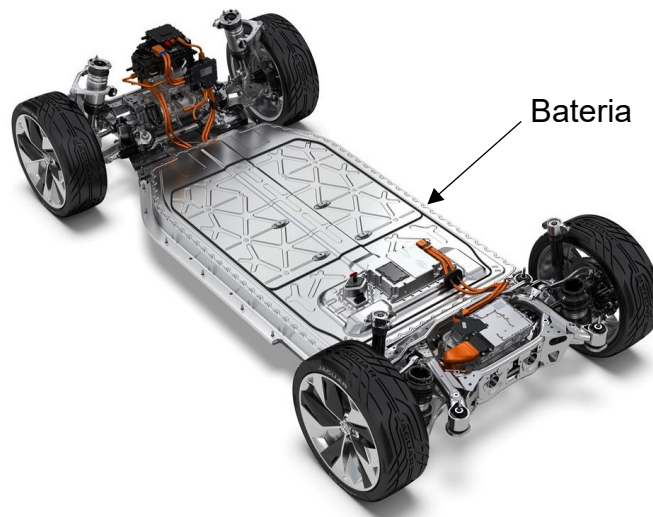


Figura 10 - Bateria dentro de um powertrain híbrido

A tensão da bateria pode ser modelada de acordo com a equação (5).

$$E = E_0 - K \frac{Q}{Q - it} + Ae^{(-B.it)} \quad (5)$$

Onde,

E – Tensão da bateria (V)

E_0 – Constante de tensão (V)

K – Constante de polarização (V)

Q – Capacidade da bateria (Ah)

A – Tensão exponencial (V)

B – Capacidade exponencial (Ah)⁻¹

Tabela 3 - Tipos de Bateria e suas aplicações

Tipo de Bateria	Densidade de Energia (W/kg)	Tensão da Pilha (V)	Temp. de Operação ($^{\circ}C$)	Auto Descarregamento ($\%/dia$)	Ciclos de Vida	Fabricantes	Veículos com Bateria
Chumbo ácido	20 - 35	2	-88	2	800	Trojan Hawker Exide	Carta bus; Selectria E10
Níquel-Cádmio	35 - 57	1,2	-100	0,5	1000-2000	SAFT	WWU Viking 23
Níquel-Metal	50 - 80	1,2	Ambiente	> 0,5	600-1500	Panasonic SAFT Sony	Toyota RAV-EV; Toyota Prius
Íon-Lítio	100 - 150	3,5	Ambiente	0,33	400-1200	A123 SAFT	Nissan Eltra EV
Zinco - Ar	100 - 200	1,2	Ambiente	Alta	>2000	-	-

Cópia Adaptada da Tabela 1 BATTERY TYPES

Fonte: ThermoAnalytics Inc.[26]

Inversor de Frequência

São dispositivos utilizados para converter um sinal de corrente contínua CC em um sinal de corrente alternada AC. São aplicados em sistemas híbridos que possuem motores de indução que necessitam de uma alimentação de tensão do tipo senoidal. Os inversores de frequência em geral são constituídos de pontes H contendo 4 transistores IGBT. Esse circuito aplica uma modulação no sinal de entrada conhecida como PWM (Pulse-Width Modulation) que faz a conversão do sinal CC em CA. Inversores são capazes de variar a potência e tensão do sinal de saída, um dos pontos que viabiliza sua aplicação em veículos elétricos. Atualmente vêm se ampliando a utilização de inversores bidirecionais capazes de converter tanto CC em CA como de CA em CC.

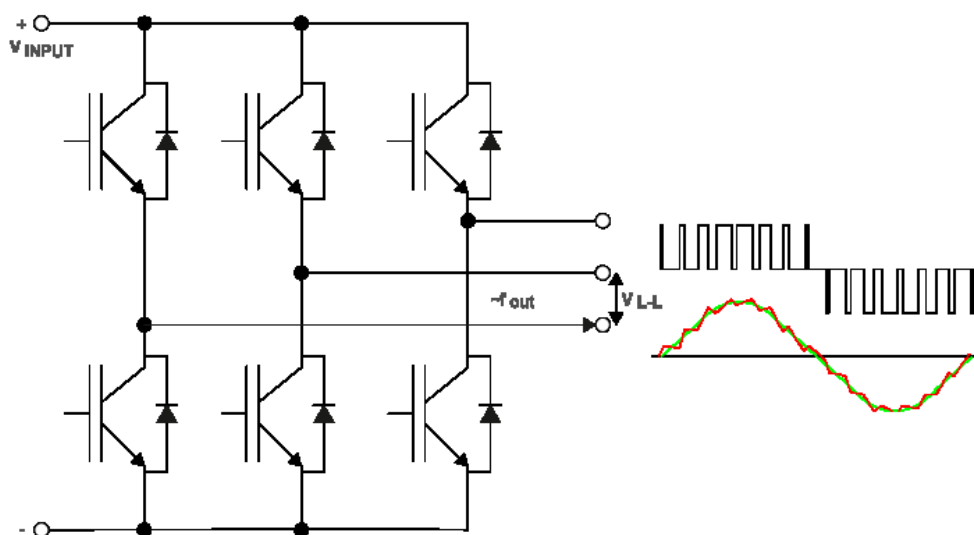


Figura 11 - Inversor de frequência com pontes e modulação de sinal

Retificador

São aplicados em VEH que utilizam como forma de propulsão motores CC. É utilizado para converter sinais de CA proveniente do gerador em CC para alimentar ambos os motores e a bateria. São compostos de um circuito que possui

- Transformador: responsável por aumentar ou diminuir a tensão de entrada;
- Conjunto de diodos: responsável pela conversão da tensão de sinal negativa em positiva através do fluxo unidirecional que ele impõe a corrente.
- Filtro RL: responsável pela estabilização do sinal, utilizando um capacitor como acumulador de tensão a fim evitar quedas bruscas na intensidade da tensão.

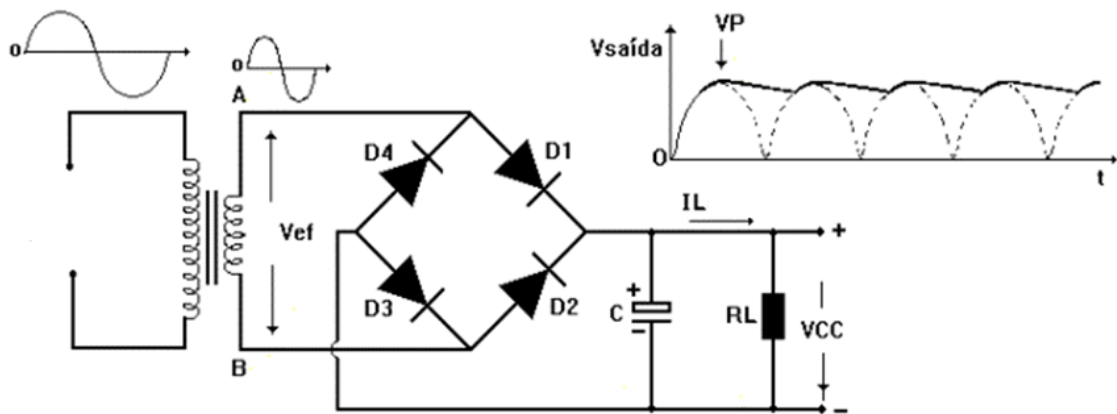


Figura 12 - Circuito de um retificador

A fim de comparar os veículos elétricos e híbridos existentes no mercado atualmente a tabela (4) traz alguns das principais características desses veículos. As informações contidas na tabela foram obtidas a partir dos websites das montadoras dos respectivos veículos, suas parceiras, documentos técnicos e veículos de mídia especializados no meio automotivo.

Tabela 4 – Características de Veículos Híbridos e Elétricos

	Nissan Leaf S	Ford Focus Electric	Volvo C30	Tesla S 60 RWD	Volvo XC90	Toyota Prius Prime Plus	Chevrolet Volt LT
Motor Elétrico AC [kW]	80	107	89	285 4 polos	89	MG1 23kW 40Nm MG2 53kW 163Nm	ME1 - 111 kW ME2 - 55kW
Qtd. ME	1	1	1	2	1	2	2
MCI	N/A	N/A	N/A	N/A	4 Cilindros - 2.0 320 HP - 5700 rpm 400 Nm - 2200 rpm	Ciclo Atkinson 4 Cilindros - 1.8 95HP - 5200 rpm 142NM - 3600rpm	4 Cilindros - 1.5 101 HP-5600 rpm 103 Nm - 4300 rpm
Transmissão	Dianteira	Dianteira	Dianteira	Traseira	Elétrica Traseira MCI Dianteira	Dianteira planetária	Dianteira
Potência Total [kW]/[HP]	80/107	107/143	89/120	285/382	303/407	90/121	111/149
Torque Total [Nm]	253	250	250	441	637	-	-
Autonomia [km]	172	185	163	338	EV - 35	HV - 1030	EV - 85 HV - 640
Massa [kg]	1507	1596	1725	2027	2319	1420	1721
Bateria [kWh]	30	33,5	24	60	9,2	8,8	18,4

A partir da tabela 4, podemos notar algumas semelhanças e peculiaridades dentre as arquiteturas dos veículos que possuem estrutura pertinente ao tema deste trabalho. Dentre os pontos de maior relevância, pode-se destacar a escolha de motores síncronos trifásicos, ou seja, de ímã permanente. Dentre os veículos elétricos, percebemos que as baterias são de grande porte com objetivo de armazenar o máximo de energia elétrica possível já que o abastecimento da mesma se dá somente por recargas que podem chegar a 10 horas, ou em alguns casos por recuperação da energia utilizada no processo de frenagem.

Já nos veículos híbridos, podemos notar baterias menores, uma vez que a utilização de motores a combustão visam principalmente a geração de energia elétrica dessas baterias, proporcionando assim maiores autonomies.

Análise Teórica da dinâmica veicular

Com intuito de dimensionar não só o motor elétrico e o motor a combustão interna utilizados no powertrain do VEH, mas também o conjunto de transmissão responsável pela propulsão de um veículo, foi realizada uma análise a fim de verificar o comportamento do sistema e os componentes que influenciam sua dinâmica. Inicialmente, essa análise consiste na verificação das forças e condições de contorno que influenciam um sistema de um veículo com tração integral, ou seja, com propulsão nas 4 rodas.

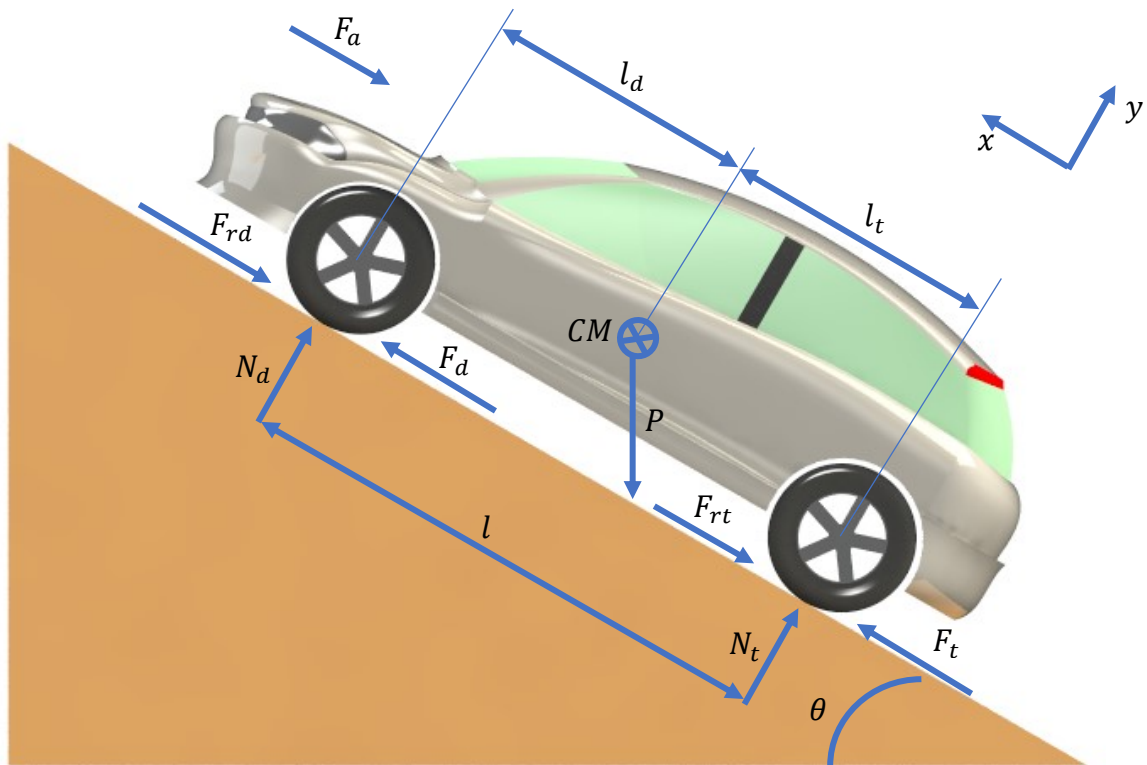


Figura 13 - Esforços inerentes a um veículo

Calculo do torque aplicado nas rodas

$$F_T = F_t + F_d \quad (6)$$

$$F_R = F_{rt} + F_{rd} + P \sin(\theta) + F_a \quad (7)$$

Onde,

F_T - Força de tração ou propulsão nas 4 rodas resultante do atrito

F_R - Forças de Resistência ao movimento

F_{rt} - Força de resistência ao rolamento na roda traseira

F_{rd} - Força de resistência ao rolamento na roda dianteira

P - Peso do veículo

F_a - Força de arrasto exercida pelo ar

As componentes acima descritas podem ser obtidas segundo as equações abaixo.

$$F_{rt} = N_t \cdot \mu_r \quad (8)$$

$$F_{rd} = N_d \cdot \mu_r \quad (9)$$

$$P = mg \quad (10)$$

$$F_a = \frac{1}{2} \rho C_d A V^2 \quad (11)$$

Onde,

N_t e N_d são as forças normais sobre as rodas traseiras e dianteiras respectivamente

μ_r - Coeficiente de resistência ao rolamento

A partir da força obtida com a equação (6) podemos calcular o torque nas rodas acopladas ao sistema de propulsão

$$T_t = r_t F_t \quad (12)$$

$$T_d = r_d F_d \quad (13)$$

Uma outra forma de se calcular o torque relativo a tração nas rodas é a partir do cálculo do torque de saída do sistema de transmissão diminuído das respectivas perdas.

$$T_p = N_r T_m - J_m \dot{\omega}_m - b_m \omega_m \quad (14)$$

$$T_r = T_p N \quad (15)$$

$$T_T = \sum (T_r - J_r \dot{\omega}_r - b_r \omega_r) = T_t + T_d \quad (16)$$

Considerando o sistema agora com freios e motores nas duas rodas traseiras do veículo, podemos equaciona-lo da seguinte maneira

$$m_E \frac{dv}{dt} = \frac{N}{r} 4T_p - b_E v - \frac{1}{2} \rho C_D A V^2 - (\mu_r + \mu \delta_F) N_d - (\mu_r + \mu \delta_F) N_t - mg \sin \theta \quad (17)$$

No qual m_E é a massa equivalente instantânea do veículo para uma determinada velocidade e b_E são as dissipações inerentes ao sistema mecânico veicular, ou seja, são as transformações energéticas do sistema como atrito por exemplo.

$$m_E = m + m_B + \frac{N^2}{r_t^2} (N_R^2 J_m) + \frac{2}{r_t^2} J_t + \frac{2}{r_d^2} J_d \quad (18)$$

$$b_E = \frac{N \dot{N}}{r_t^2} J_m + \frac{N^2}{r_t^2} b_m + \frac{2}{r_t^2} b_t + \frac{2}{r_d^2} b_d \quad (19)$$

$$N_d = \frac{mg(\cos \theta (l_t + \mu \delta_F h) - h \sin \theta) - \frac{N}{r_t} T_p h - \frac{1}{2} \rho C_D A v^2 h}{(l + \mu(\delta_t - \delta_d)h)}$$

$$N_t = \frac{mg(\cos \theta (l_d - \mu \delta_F h) + h \sin \theta) + \frac{N}{r_t} T_p h + \frac{1}{2} \rho C_D A v^2 h}{(l + \mu(\delta_t - \delta_d)h)}$$

Onde,

J_t, J_d e J_m são os momentos de inércia das rodas traseira, dianteira e do motor respectivamente;

N_r – Redução na saída do motor

Considerando o motor como um cilindro sólido e as rodas como um tubo cilíndrico podemos calcular os momentos de inércia da seguinte forma

$$J_m \cong \frac{1}{2} m r^2$$

$$J_t = J_d \cong \frac{1}{2} m (r_{ext}^2 + r_{int}^2)$$

A rotação de saída da transmissão de VEH pode ser calculada de acordo com a seguinte equação

$$\omega_m = \frac{N_R N_i}{r_t} v$$

Uma das variáveis utilizadas para mensurar a performance de um veículo são a velocidade máxima, o tempo que se leva para atingir uma determinada velocidade, normalmente adotado como padrão 100km/h. Considerando as dissipações nulas, o torque do motor constante e o fato de que a velocidade máxima é atingida quando a aceleração é nula, uma vez que, não há mais variação de velocidade, fazendo as devidas alterações na equação (17) podemos calcular a velocidade máxima através do seguinte polinômio.

$$\frac{1}{2}\rho C_D A v_{máx}^2 + b_E v_{máx} + (mg \sin \theta - 2 \frac{N}{r_t} T_p) = 0$$

A velocidade máxima pode ser obtida ainda através da interseção das forças de tração máxima e das forças de resistência incidentes sobre o veículo. Tal força pode ser obtida também através da seguinte equação.

$$v_{máx} = \frac{\pi n_{máx} r}{30 N_{máx}} \quad (20)$$

Onde,

$n_{máx}$ – Rotação máxima do motor

$N_{máx}$ – Menor relação de transmissão

Para se obter o tempo necessário para um veículo atingir uma determinada velocidade, temos que saber o rendimento desse veículo.

$$d = \frac{F_t - F_a}{mg} \quad (21)$$

A partir do cálculo do rendimento explicitado na equação (21) podemos verificar então o tempo necessário para atingir uma determinada velocidade para um VE.

$$t_a = \int_0^{v_b} \frac{m\delta}{F_t - (F_r + F_a)} dv + \int_{v_b}^{v_f} \frac{m\delta}{F_t - (F_r + F_a)} dv \quad (22)$$

Usando o conceito fundamental do cálculo da potência, onde

$$P = \frac{\Delta Energia}{\Delta Tempo} = \left[\frac{J}{s} \right]$$

Dentre diversas grandezas, foram consideradas as seguintes que são mais relevantes para o presente estudo para fazer tal cálculo

$$P = Fv = T\omega = VI$$

$$F_T = P_T/V_b \quad (23)$$

Onde,

P_T – Potência de tração disponível nas rodas do veículo

δ – Fator de correção das massas giratórias

O primeiro termo da equação (22) se refere ao período que o veículo leva para alcançar a velocidade base, ou seja, a velocidade máxima que um motor elétrico pode alcançar com um torque constante. Já o segundo termo se refere ao período referente ao aumento de velocidade no eixo do ME acompanhado da queda de torque como discutido no presente trabalho anteriormente.

Segundo análise realizada na dissertação de mestrado feita por Zegarra, Fernando, desprezando-se as perdas do sistema, isto é, forças de resistência, a equação (22) pode ser simplificada como exposto na equação (24).

$$t_a = \frac{m\delta}{2P_t}(v_f^2 + v_b^2) \quad (24)$$

Logo a potência de tração desenvolvida nas rodas durante a aceleração pode ser calculada através da seguinte equação

$$P_T = \frac{m\delta}{2t_a}(v_f^2 + v_b^2) \quad (25)$$

Levando em consideração agora as potências de resistência pertinentes ao sistema veicular em movimento referentes a força de arrasto e a resistência ao rolamento podemos calcular as respectivas potências a partir da combinação das equações (24) e (25) como realizado em Zegarra

$$P_R = \frac{1}{t_a} \int_0^{t_a} mg\mu_r v + \frac{1}{2} \rho C_D v^3 dt \quad (26)$$

$$v = v_f \sqrt{\frac{t}{t_a}} \quad (27)$$

Obtendo assim

$$P_R = \frac{2}{3}mg\mu_r v_f + \frac{1}{5}\rho C_D v_f^3 \quad (28)$$

A partir da soma das potências de resistência (28) e da potência de tração (25) podemos obter a potência necessária no sistema de propulsão de um VE para se obter determinada velocidade final em um período de tempo t_a .

$$P_T = \frac{m\delta}{2t_a}(v_f^2 + v_b^2) + \frac{2}{3}mg\mu_r v_f + \frac{1}{5}\rho C_D v_f^3 \quad (29)$$

Para o motor que é peça de extrema importância nesse sistema, já que é o responsável pela conversão de energia elétrica em energia mecânica gerando a rotação e torque responsáveis pela propulsão do VEH a tensão de alimentação é controlada de acordo com a tensão disponível pela bateria e o acionamento do condutor podendo ser equacionado da seguinte forma.

$$V = V_0 \delta_T$$

Para $0 \leq \delta_T \leq 1$, há aceleração do veículo

Para $-1 \leq \delta_T \leq 0$, há frenagem do veículo

Para um motor CC, a carga da bateria pode ser calculado de acordo com a equação

$$q = q_0 - \int i dt$$

Com

$$i = k_i V + k_T T_m$$

Onde,

k_i - Constante corrente/tensão do motor (A/V)

k_T - Constante corrente/torque do motor (A/Nm)

q_0 - Carga inicial da bateria

Dando continuidade à análise de forças que necessitam ser vencidas pelo motor para impulsionar o veículo de forma eficiente. O conjunto de transmissão entre roda do veículo e motor precisam ser discretizados, ou seja, dividir o conjunto em partes para facilitar a análise.

Modelagem do sistema

A modelagem do sistema de propulsão do VEH idealizado no presente trabalho visa dimensionar seus componentes a partir da análise teórica realizada anteriormente. Para a modelagem foram considerados dois sistemas de propulsão, um utilizando motor trifásico síncrono AC e outro utilizando motor de corrente contínua brushless DC. O propósito desta é verificar a resposta de cada motor à dinâmica do sistema, efetuando assim comparações pertinentes.

Nesta etapa do trabalho utilizou-se o software Matlab, um software voltado para resolução de cálculos numéricos em combinação com o pacote Simulink que é específico para modelagem de sistemas dinâmicos. O Simulink por sua vez tem um ótimo desempenho no que compete a resolução de equações diferenciais, proporcionando a análise do comportamento de sistemas com variação ao longo do tempo.

Parâmetros do sistema

Os parâmetros utilizados na simulação foram baseados na tese de mestrado de Zegarra, Fernando, que utilizou em seus experimentos um veículo Peugeot 3008 1.6 cc.

Tabela 5 - Parâmetros Gerais do Veículo

Parâmetro	Símbolo	Unidade	Valor
Massa do Veículo	m_c	kg	1680
Massa de 5 indivíduos	m_p	kg	400
Massa Admissível	m	kg	3220
Reboque	m_r	kg	1200
Área	S	m^2	2,686
Entre eixos	l	m	2,613
Altura do CM	h	m	1,0
Aceleração da gravidade	g	m/s^2	9,81
Coeficiente de resistência ao rolamento	μ_r	-	0,01
Coeficiente de atrito pneu solo	μ	-	0,85
Coeficiente de arrasto	C_D		0,296
Densidade do ar	ρ	kg/m^3	1,169
Eficiência do motor trifásico	η	%	85
Eficiência do motor Brushless	η	%	

Tabela 6 - Pneu 215/60 R16

Parâmetro	Símbolo	Unidade	Valor
Largura	w_p	m	0,215
Espessura	t	m	0,129
Diâmetro Interno	D_i	m	0,406
Diâmetro Externo	D_e	m	0,664

Os dados contidos nas tabelas (5) e (6) foram aplicados na equação diferencial (16). Através do modelo contendo o motor trifásico síncrono inicialmente. Esta opção foi escolhida de acordo com o que é utilizado majoritariamente no mercado atual. Essa constatação pode ser verificada na tabela (4).

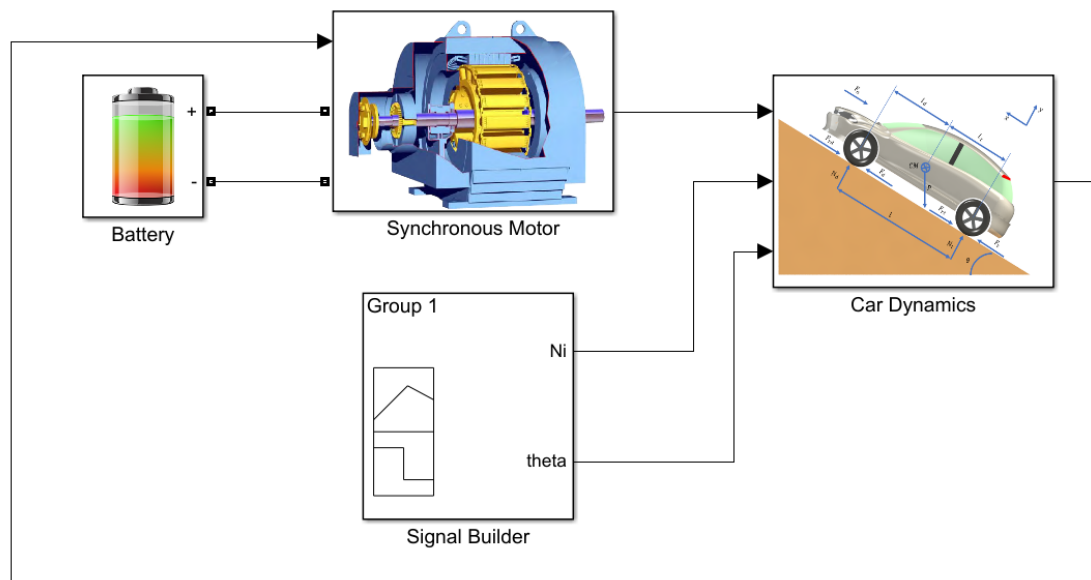


Figura 14 - Modelo Geral - Motor Trifásico Síncrono

No modelo explicitado na figura (14), podemos verificar 4 blocos contendo a bateria, responsável pelo armazenamento de energia elétrica. Um motor capaz de transformar a energia elétrica em energia mecânica. Um bloco referente a dinâmica veicular modelada na equação (16) representando também o carregamento que irá acionar o motor. E um último bloco com sinal de entrada com a relação da transmissão e a inclinação do plano por onde o veículo possa vir a trafegar. O sistema foi desenvolvido a partir do conceito de modulação, ou seja, desenvolvido de modo que cada componente tenha o máximo de independência possível para executar sua função, de modo que, sua substituição seja de fácil operação para que sejam efetuadas as manutenções pertinentes ao sistema global. Esse método facilita a verificação de diferentes tipos de modelos matemáticos e

tipos de componentes, como por exemplo a variação de motores ou mesmo de baterias dentro do sistema global.

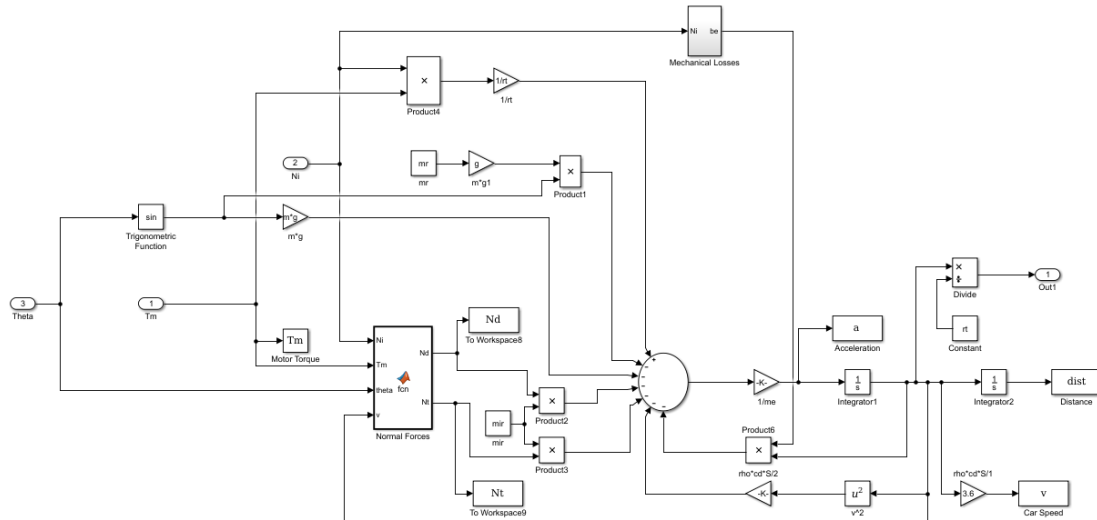


Figura 15 - Car Dynamics Model

Na figura (15) podemos ver o modelo da dinâmica veicular transcrito na linguagem Simulink. Além da variação angular e de relação de transmissão como entrada, o sistema tem também como entrada o torque do motor atribuindo ao modelo global a interação necessária para avaliar o desempenho do veículo.

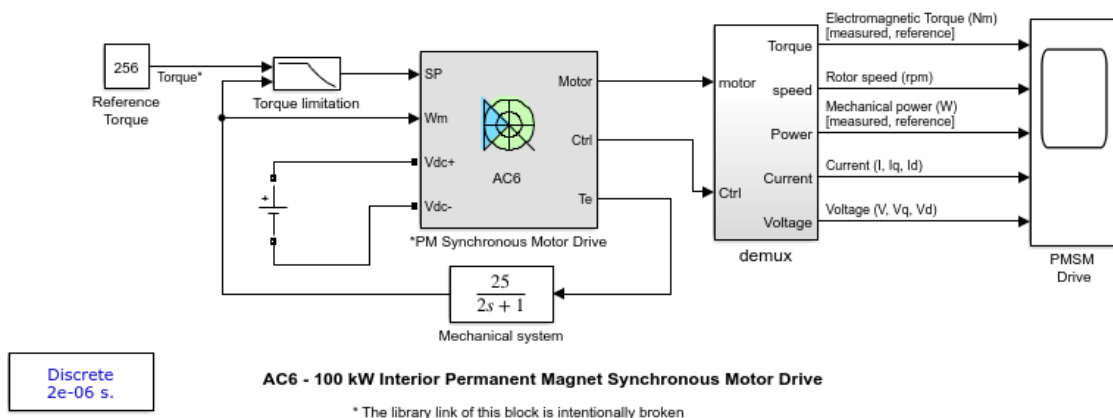


Figura 16 - Modelo do Motor Síncrono

O modelo matemático do motor utilizado na modelagem do veículo foi obtido através da biblioteca do Matlab/Simulink, uma vez que, o presente trabalho não tinha como objetivo a modelagem de um motor elétrico e sim o dimensionamento dos parâmetros necessários para conferir ao veículo um desempenho competitivo frente ao que existe no mercado atual. O modelo do motor foi adaptado para receber como parâmetros de entrada a

carga necessária para dar impulsão necessária ao veículo. Dentre as particularidades deste modelo, o controle das variáveis de saída do motor como torque e rotação foram feitas a partir da aplicação de um torque de referência. Onde esse torque é utilizado por exemplo no momento de acionamento do motor, como um impulso, podendo ser comparado nesse instante ao motor de arranque utilizado para dar partida em motores a combustão. Em outras situações o mesmo pode ser utilizado como os comandos de aceleração e de frenagem do condutor, a fim de variar a velocidade do veículo.

O modelo conta com uma alimentação de corrente contínua ideal o qual foi substituído pelo modelo da bateria de lítio-Íon que considera o descarregamento da mesma. O sinal da bateria por sua vez, por ser um sinal DC, é convertido em AC pelo inversor contido no modelo do motor que se utiliza de modulação PWM para tal processo. A conversão do sinal DC para AC tem reflexo direto nas variáveis de saída do motor que são dependentes dos sinais de alimentação do mesmo. Como exemplo temos os sinais obtidos do torque e potência, tais sinais variam com a tensão de alimentação do estator como explicitado nas equações (2) e (3).

Abaixo podemos verificar os resultados obtidos a partir do modelo adquirido pelo Matlab, ou seja, os esforços não são relacionados com a dinâmica veicular.

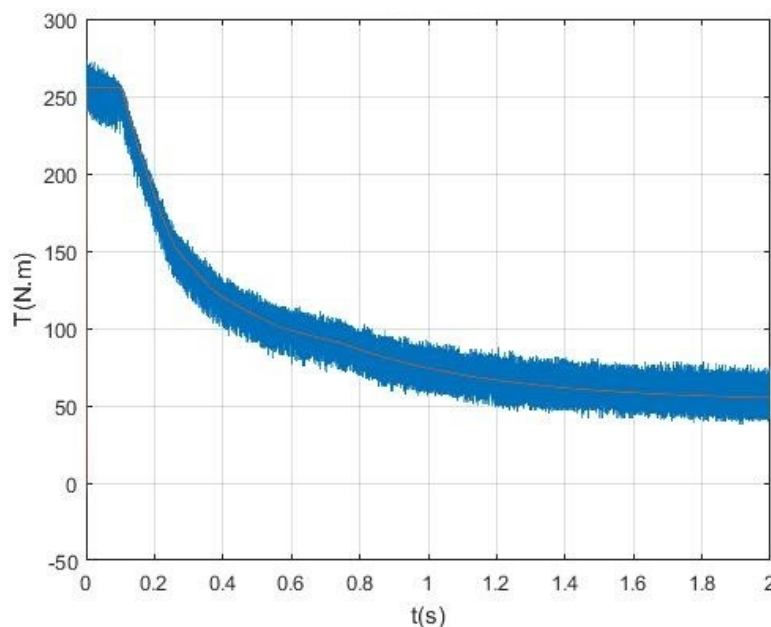


Figura 17 - Torque do motor ao longo do tempo

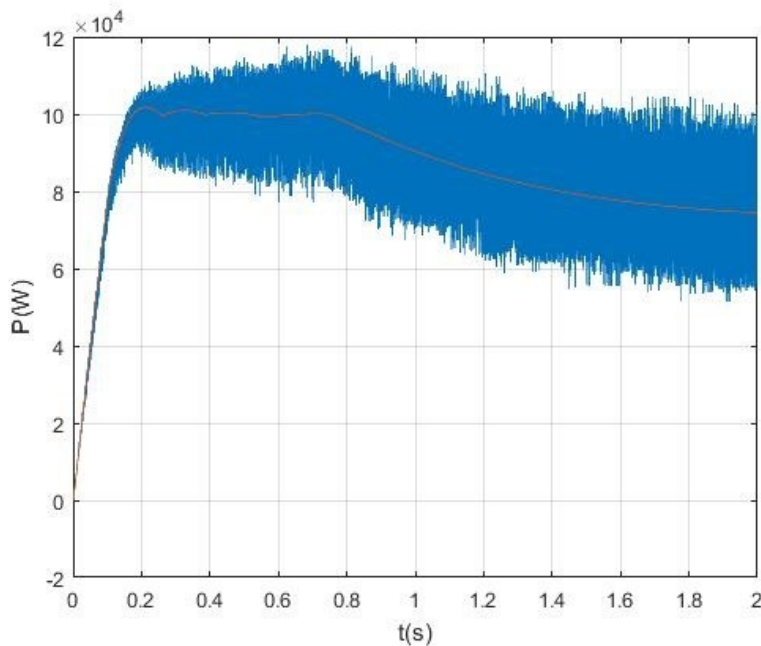


Figura 18 - Potência do motor ao longo do tempo

Nas figuras (17) e (18) podemos verificar a oscilação dos sinais de torque e potência oriundos do modelo do motor síncrono utilizado. Os valores obtidos são devido a um carregamento genérico (exemplo qualquer). Como pode ser visto as oscilações obtidas são decorrentes da alimentação do motor, já que a mesma passa pela conversão do sinal DC proveniente da bateria para AC. Essa conversão é feita a partir do PWM do inversor, onde o sinal DC passa a oscilar em torno de um valor médio para gerar o sinal alternado, porém como tal conversão não é perfeita já que o sinal AC gerado apresenta diversos níveis de magnitude durante um intervalo de tempo correspondente ao abrir e fechar das chaves responsáveis pelo fornecimento ou pelo encerramento do sinal para determinado nível de tensão.

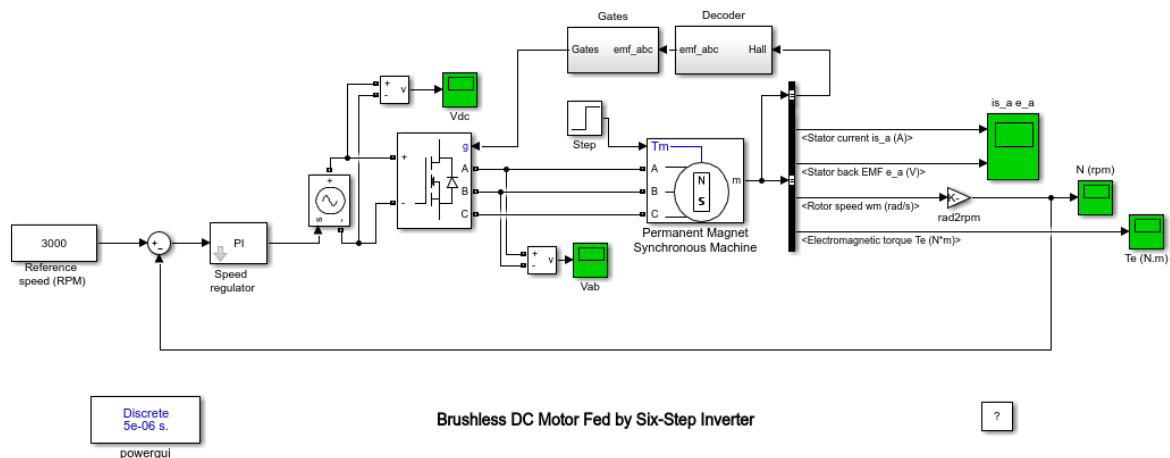


Figura 19 - Modelo do Motor Brushless DC

Na figura (19), podemos ver o modelo utilizado para simular a aplicação do motor brushless DC no veículo. Assim como o motor síncrono AC, este modelo foi obtido através da biblioteca do Matlab/Simulink.

Diferentemente do motor síncrono, a fonte de alimentação motor utilizado é acoplada num transdutor que transforma o sinal do condutor combinado aos parâmetros de saída do motor em sinal elétrico. Esse sinal, por sua vez é responsável pelo controle desempenho e controle do motor. O que torna a estrutura desse sistema mais simples e de menor custo.

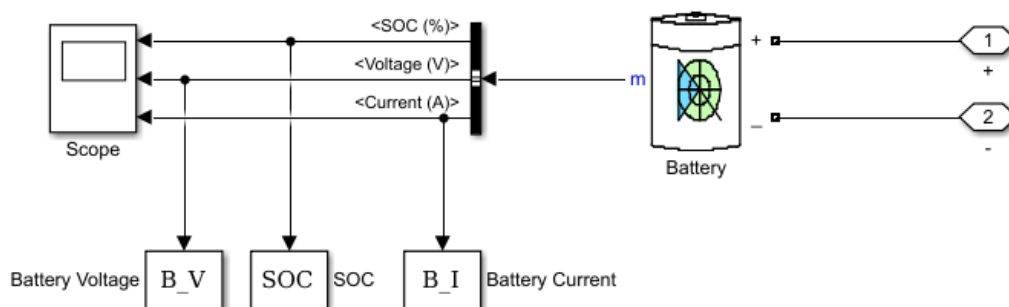


Figura 20 - Modelo da bateria

O modelo da bateria utilizado, figura (20), também está disponível na biblioteca do Matlab/Simulink usa um modelo matemático comum a muitas baterias recarregáveis utilizadas atualmente descrito na equação (5). O modelo possibilita a escolha de diferentes tipos de bateria como a de chumbo-ácido, Níquel-Cádmio, Níquel-hidreto metálico e Íon-Lítio. Atribuindo a elas as respectivas constantes, cabendo ao projetista a escolha da tensão e capacidade da bateria de acordo com sua aplicação no projeto.

A partir da modelagem dos componentes necessários à um VEH deu-se início ao dimensionamento do sistema. Esse dimensionamento visa quantificar os parâmetros necessários para a concepção física do veículo em si. Tais parâmetros estão explicitados na seção de resultados.

Para o dimensionamento dos motores foram considerados a seção dos cabos de alimentação ou como são popularmente conhecidas suas bitolas. Como não foram encontradas normas específicas aplicadas à veículos, disponíveis ao público pelo menos, para a distribuição dos cabos ao longo do veículo e seu dimensionamento foram considerados as normas da ABNT NBR-14639 para instalações elétricas ilustrada na figura (21).

Tabela A.5 - Capacidades de condução de corrente, em ampères condutores e cabos com isolamento de PVC, cobre;
2 e 3 condutores carregados;
temperatura no eletroduto: 70°C;
temperatura ambiente: 30°C para linhas não subterrâneas e 20°C para linhas subterrâneas

Seções nominais mm ²	Maneiras de instalar							
	Eletroduto contido em canaleta fechado		Eletroduto ou calha		Em canaleta aberto ou ventilado		Eletroduto subterrâneo	
	Número de condutores carregados		Número de condutores carregados		Número de condutores carregados		Número de condutores carregados	
	2	3	2	3	2	3	2	3
Cobre								
1,5	14,5	13	17,5	15,5	19,5	17,5	22	18
2,5	19,5	18	24	21	26	24	29	24
4	26	24	32	28	35	32	38	31
6	34	31	41	36	46	41	47	39
10	46	42	57	50	63	57	63	52
16	61	56	76	68	85	76	81	67
25	80	73	101	89	112	98	104	86
35	99	89	125	111	138	119	125	103
50	119	108	151	134	168	144	148	122
70	151	136	192	171	213	184	183	151
95	182	164	232	207	258	223	216	179
120	210	188	269	239	299	259	246	203
150	240	216	307	275	344	294	278	230
185	273	248	353	314	392	341	312	257
240	320	286	415	369	461	403	360	297
300	367	328	472	420	530	464	407	336

Figura 21 - Seção de cabos de acordo com sua capacidade de condução de corrente e instalação

Na figura retirada da norma especificada, está discriminada a faixa almejada para a seção a ser utilizada no cabeamento do motor.

Resultados

O dimensionamento do sistema teve início a partir da verificação dos parâmetros dos motores. Como critério inicial para tal escolha foram verificados os parâmetros do motor que atendessem as exigências da dinâmica do sistema como torque, potência e rotação, além dos parâmetros relacionados a parte elétrica, responsáveis pelo dimensionamento dos cabos e da tensão da bateria.

A determinação dos parâmetros foi feita a partir do princípio de engenharia reversa, onde componentes de parâmetros conhecidos são acoplados ao sistema a fim de conferir se o mesmo atende o sistema para que o mesmo tenha o desempenho esperado.

Relação de Transmissão

Para o presente estudo foram considerados apenas o peso do veículo e do condutor. Inicialmente, foram testados para determinados parâmetros do motor a variação da relação para verificar a performance do veículo. Nessa etapa, foi considerado um veículo com apenas um motor AC síncrono, uma vez que o comportamento entre torque e velocidade dos diferentes tipos de motores elétricos é similar.

Tabela 7 - Parâmetros do Motor utilizado na análise de relação

Parâmetro	Símbolo	Unidade	Valor
Potência	P	kW	12
Torque	T_m	Nm	500
Número de polos	p	—	8
Tensão	E	V	480
Resistência do estator	R_s	Ω	4
Indutância da armadura	L_L	H	0,000835

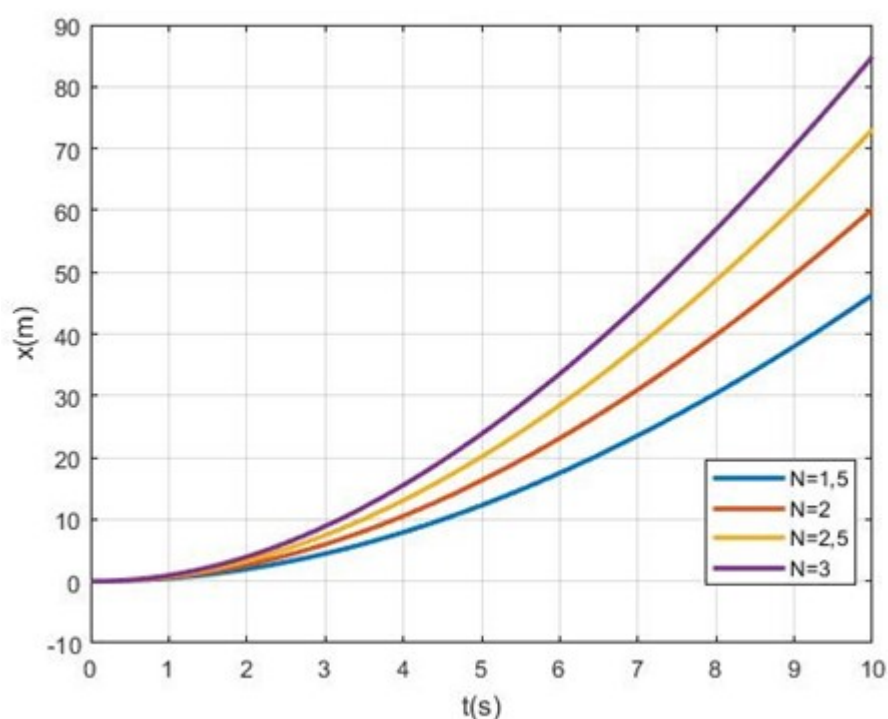


Figura 22 - Distância percorrida pelo veículo ao longo do tempo

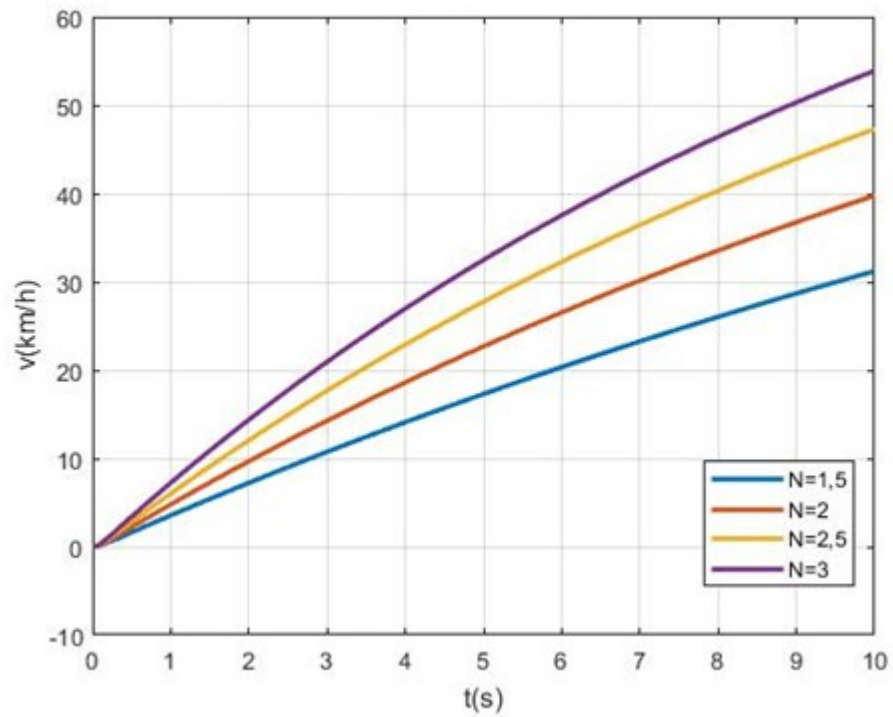


Figura 23 - Velocidade desenvolvida pelo veículo ao longo do tempo

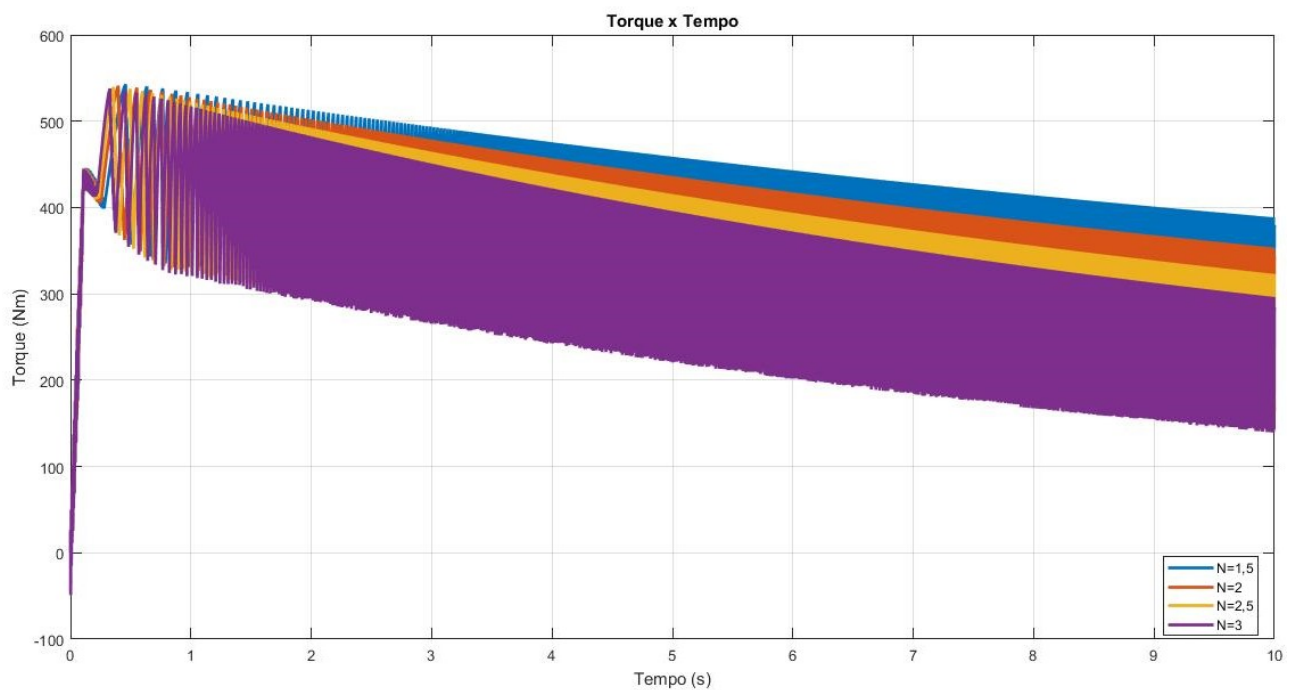


Figura 24 - Torque desenvolvido pelo motor AC ao longo do tempo

Os dados obtidos nos gráficos mostrados nas figuras (21) e (22) são referentes a distância percorrida pelo veículo e sua velocidade ao longo do tempo respectivamente. Os gráficos mostram a variação das relações de transmissão para um sistema com motor AC síncrono alimentado pela mesma bateria e inversores. Como podemos verificar, o veículo desenvolve velocidades maiores percorrendo assim maiores distâncias para maiores relações de transmissão.

Mesmo tendo verificado que, para maiores valores de relação de engrenagens há um aumento de velocidade e de distância percorrida. Para fins de projeto, as dimensões das engrenagens inviabilizam o uso acima dos valores utilizados. Levando também em consideração que a magnitude da carga imposta ao veículo pode não ser suprida por relações de valor superior.

No entanto, podemos perceber no gráfico ilustrado na figura (23) que a medida que há um aumento da relação há um decréscimo no torque entregue pelo motor. Tendo verificado que a maior relação usada atende os requisitos de desempenho do veículo, no caso $N = 3$, foi dado continuidade a análise utilizando esta mesma relação. Podemos notar também que o gráfico do torque apresenta uma oscilação ao longo do período analisado. Esta oscilação percebida na curva do torque é decorrente da utilização do PWM na conversão do sinal AC para DC como explicitado anteriormente no presente trabalho.

A partir da definição da relação com base na análise realizada, foi dado continuidade ao estudo por um veículo utilizando 4 motores. A utilização de 4 motores tem como objetivo a melhora do desempenho associado a uma utilização mais eficiente do sistema de propulsão. Tal escolha visa utilizar motores de menor potência e peso.

Análise da utilização de 4 motores

Utilizando agora 4 motores, foram feitas simulações para ambos os motores Brushless DC e Síncrono AC. Nessa simulação foram considerados os mesmos parâmetros para ambos os motores. Assim como na análise da transmissão, foi considerado um veículo apenas com o condutor.

Para um trecho plano, ou seja, com $\theta = 0^\circ$, foram obtidos os seguintes resultados.

Tabela 8 - Parâmetros do Motor AC Síncrono

<i>Parâmetro</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Unidade</i>	<i>Valor</i>
Potência	P	kW	12
Torque	T_m	Nm	350
Número de polos	p	—	8
Tensão	E	V	720
Resistência do estator	R_s	Ω	4
Indutância da armadura	I_L	H	0,000835

Tabela 9 - Parâmetros do Motor Brushless DC

<i>Parâmetro</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Unidade</i>	<i>Valor</i>
Potência	P	kW	8
Torque	T_m	Nm	350
Número de polos	p	—	8
Tensão	E	V	560
Resistência do estator	R_s	Ω	4
Indutância da armadura	I_L	H	0,000835

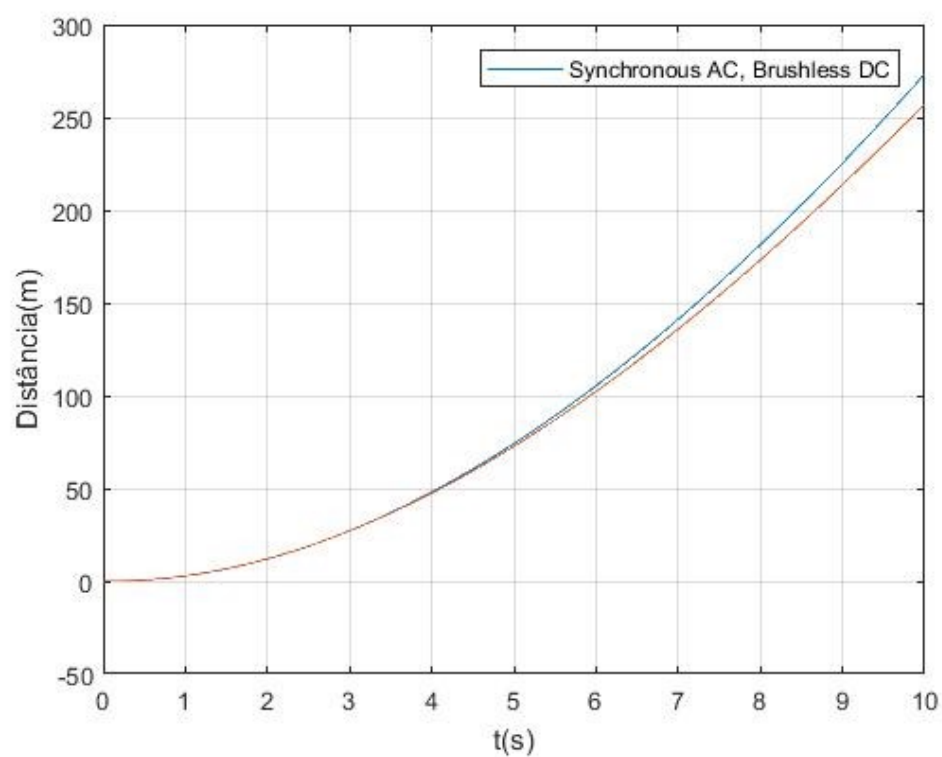


Figura 25 - Distância Percorrida pelos veículos com motores Brushless DC e AC Síncrono

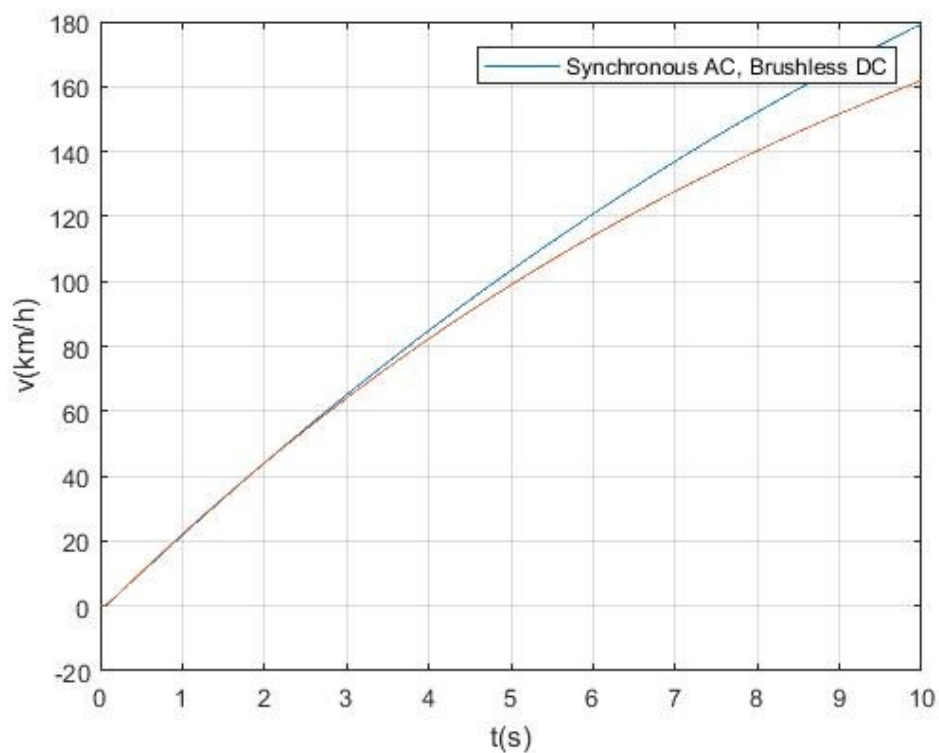


Figura 26 - Velocidade desenvolvida pelo veículo com motores Brushless DC e AC Síncrono

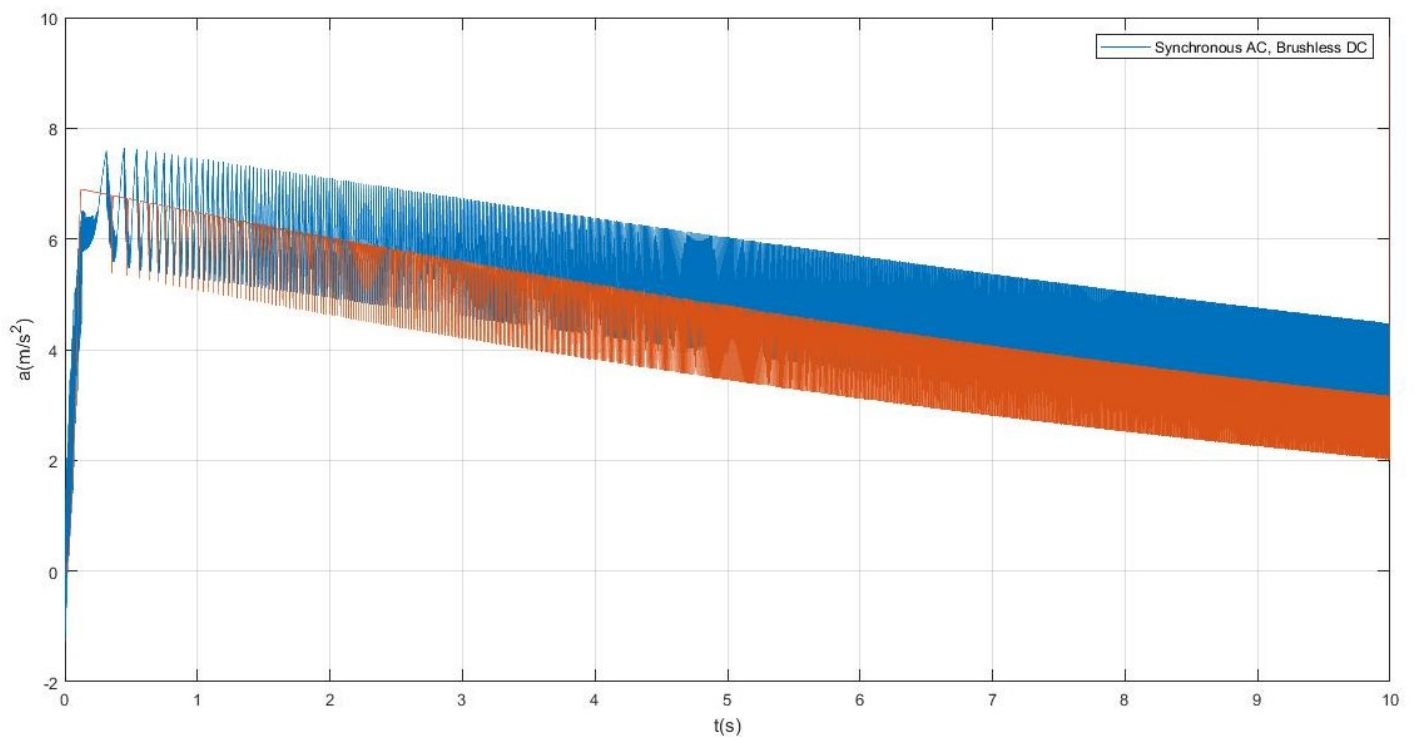


Figura 27 - Aceleração desenvolvida ao longo do tempo pelo veículo com motores Brushless DC e AC Síncrono

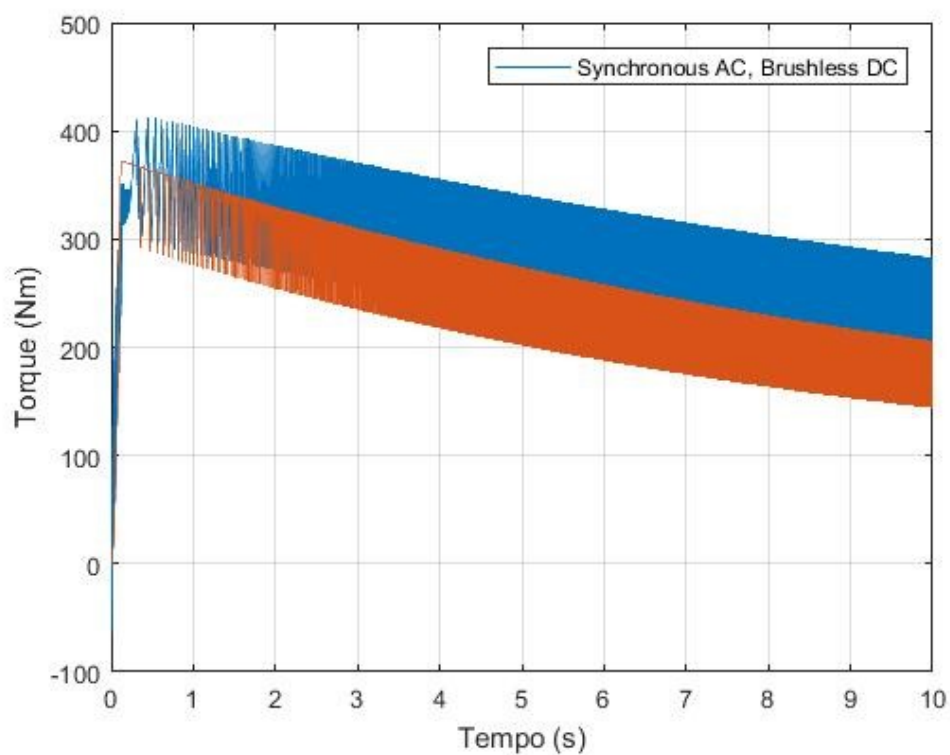


Figura 28 - Torque fornecido pelos motores Brushless DC e AC Síncrono

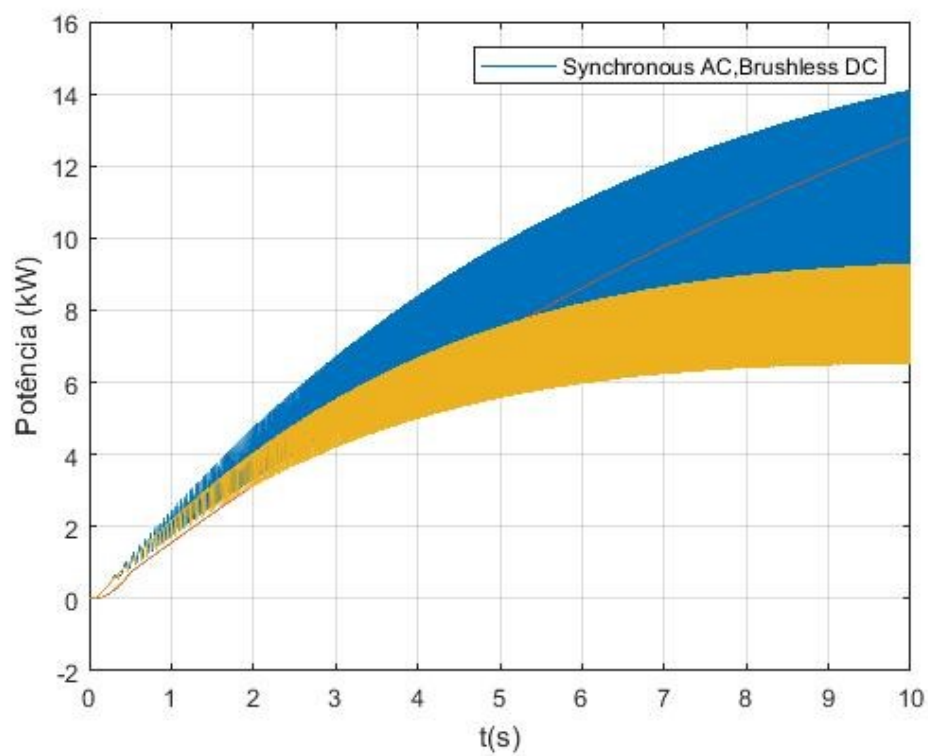


Figura 29 - Potência necessária para cada motor

Os resultados ilustrados entre as figuras (25) a (28) são comuns aos dois tipos de motores, AC e DC. Onde os parâmetros que foram aplicados para cada motor foram determinados a partir de um processo iterativo com foco no desempenho final do veículo. Podemos verificar então que para fins de carregamentos ambos os motores atendem a requisitos de torque e velocidade, porém apresentam dimensões diferentes. Dentre essas dimensões verificou-se a menor dimensão dos motores Brushless DC, ressaltando que foram utilizados 4 motores no veículo analisado.

Alimentação dos motores

Motor AC

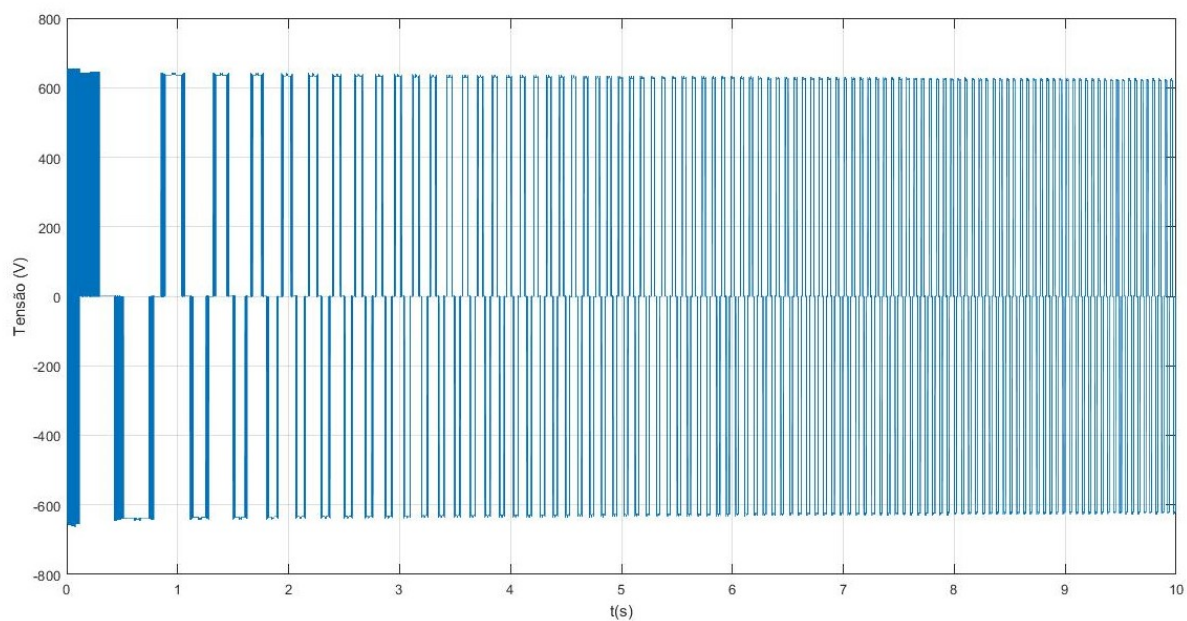


Figura 30 - Tensão entregue ao motor pelo inversor

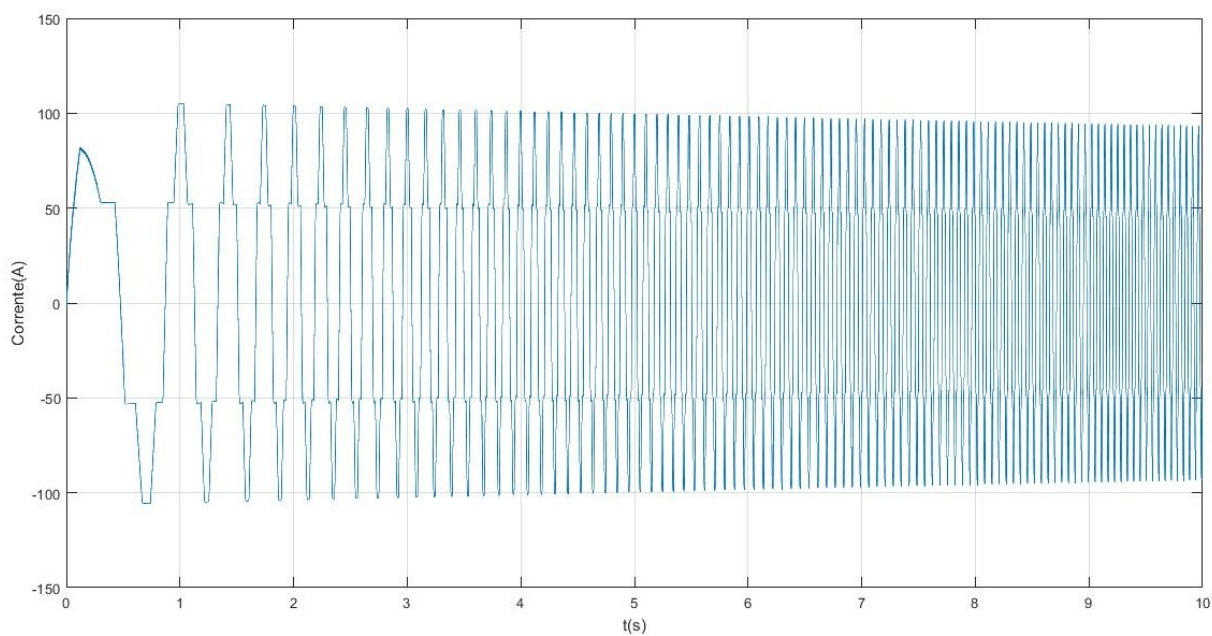


Figura 31 - Corrente necessária para o motor AC

Motor DC

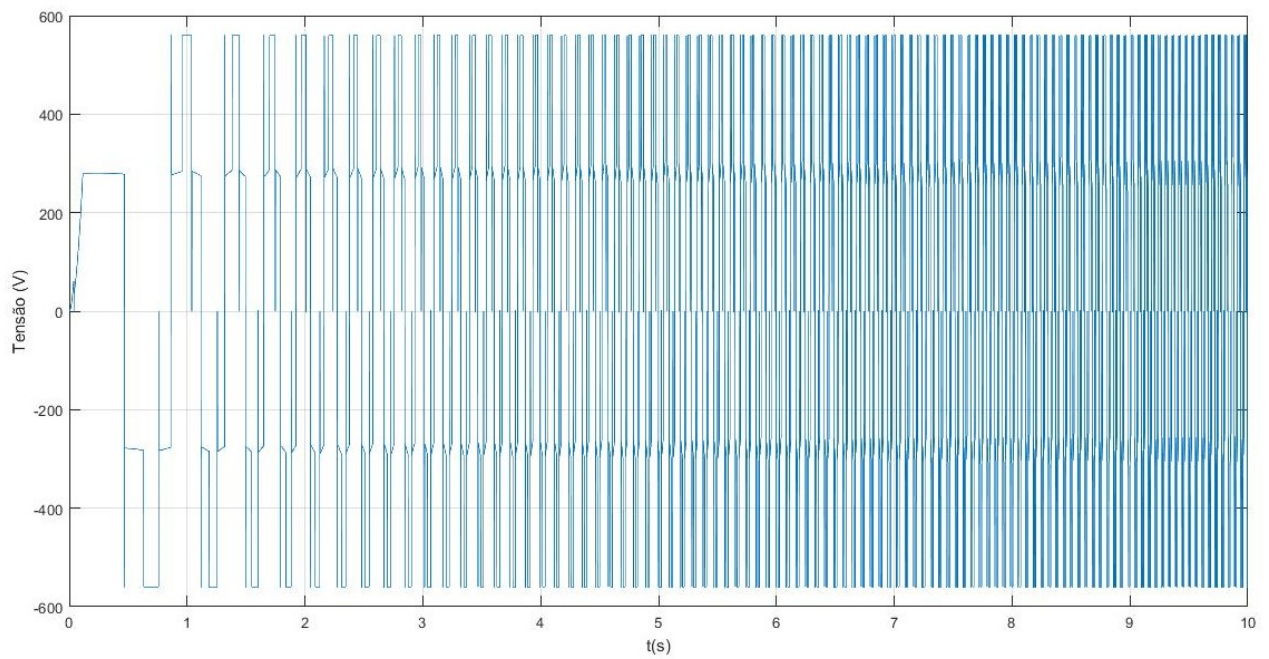


Figura 32 - Tensão entre fases

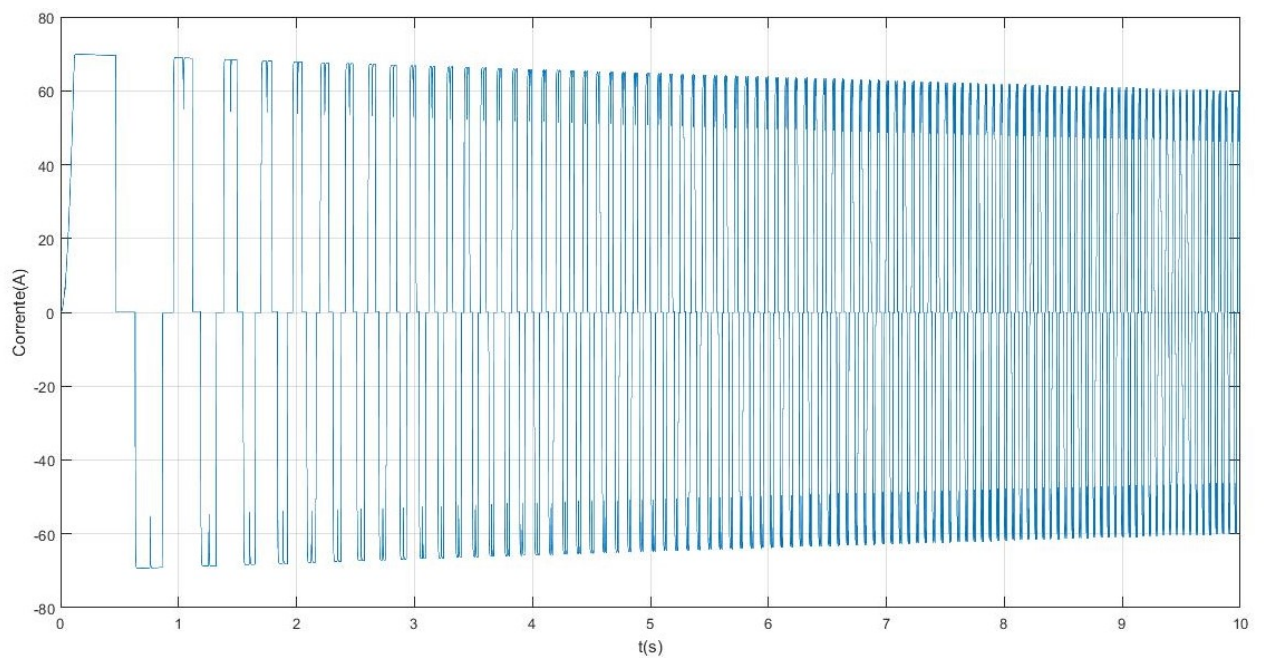


Figura 33 - Corrente necessária para o motor DC

Podemos verificar que apesar de ambos os sistemas contarem com baterias de 560 V, a tensão entregue ao motor AC pelo inversor é maior que a da bateria o que implicaria na utilização de um motor que suportasse essa alimentação evitando assim sobrecargas. Vemos também que o motor DC apresenta magnitudes de corrente inferiores aos do motor AC resultando assim em bobinas de menor dimensão e cabos de seção inferior aos do motor AC.

Como podemos ver nos resultados obtidos, em 10 segundos o veículo percorre aproximadamente 275 m, atingindo 100 km/h em 5 segundos com uma aceleração máxima de aproximadamente 7 m/s^2 o que corresponderia a cerca de 0,71 g. Para fins de comparação algumas pesquisas foram realizadas de modo a avaliar o veículo que está sendo projetado de acordo com o que já existe no mercado.

Tabela 10 - Tempo necessário para atingir a velocidade de 100 km/h por diferentes veículos

Veículo analisado	Fonte:	Tempo (s)
Volvo C30	Website especializado em veículos elétricos Plugin cars	11
Veículo Projetado	-	5
Volvo XC90	Revista Automobilística Motor Trend	5
Tesla S P100D	Revista Automobilística Motor Trend	2,28

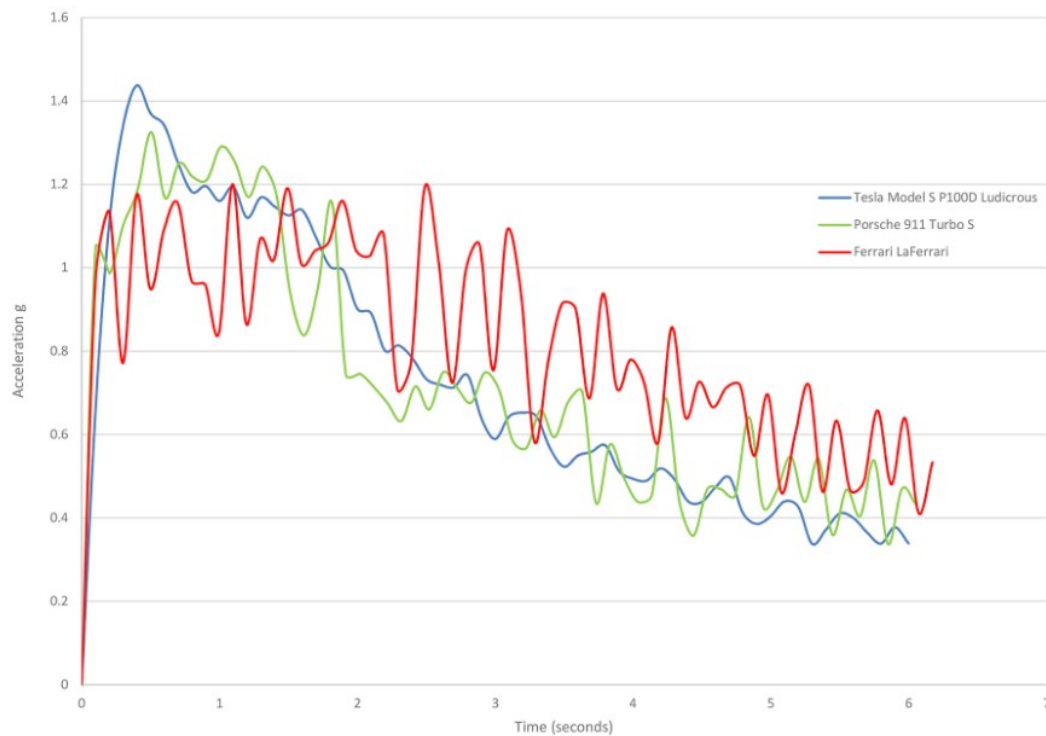


Figura 34 - Aceleração de veículos de auto rendimento

Como podemos notar pela tabela (7), o tempo necessário para o veículo atingir uma velocidade de 100 km/h está dentro dos padrões encontrados no mercado. Paralelamente com a comparação da aceleração desenvolvida pelos veículos ilustrado na figura (40), ressaltando que estas acelerações correspondem a veículos esportivos de alta performance. A aceleração do veículo em desenvolvimento mostrado na figura (26), mostra uma proximidade entre as curvas desses veículos. Notamos também uma grande disparidade do veículo desenvolvido pela marca Tesla, haja visto que o mesmo alcança altas velocidades em curtos intervalos de tempo com acelerações comparáveis a de veículos esportivos que se utilizam de MCI para suas respectivas propulsões.

Conclusão

A partir dos dados acerca da utilização de veículos elétricos, pode-se verificar a crescente demanda por estes. Esta demanda está diretamente ligada aos altos valores intrínsecos aos combustíveis fósseis utilizados como fonte energética em veículos que utilizam MCI como base do seu sistema de propulsão. Outro ponto que impulsiona o crescimento deste mercado está associado as regulamentações ligadas a diminuição da emissão dos gases estufa a fim de diminuir a poluição atmosférica e evitar assim o aquecimento global. Nesse estudo teve como foco o levantamento das diferentes arquiteturas existentes para veículos elétricos híbridos seus respectivos componentes. Foi feita uma análise da dinâmica veicular em combinação com a aplicação de diferentes motores, AC e DC. Verificou se que para carregamentos inerentes a veículos automotivos, ambos obtiveram resultados equivalentes em termos de respostas mecânicas como torque, velocidade e potência. Verificou-se também que os motores brushless tem uma menor exigência de corrente elétrica o que garante à essas máquinas menores dimensões e um maior eficiência em termos de relação torque e rotação, menor peso além do fato de possuírem uma vida útil maior e menor necessidade de manutenção devido ao fato de não possuírem escovas. Foi verificado também que motores brushless apesar de terem um elevado custo em relação a motores AC, não necessitam de sistemas de controle tão sofisticados quanto motores AC, muito menos de conversão de sinal DC para AC, o que viabiliza o investimento nessas máquinas em termos de projeto e desempenho. Já os motores AC síncronos, contam com menor custo, capacidade de converter o torque aplicado a eles em energia elétrica, facilitando assim a recarga da bateria e proporcionando uma maior eficiência energética. Esses motores são capazes também de manter a rotação constante quando há variações de torque. Porém possuem dimensões maiores e a necessidade de utilização de inversores de frequência, que possuem altos custos. Com a análise dos motores noticiou-se a necessidade de tensões relativamente altas para gerar torques maiores. Com isso, a escolha do motor depende diretamente da arquitetura escolhida para o veículo e do desempenho desejado. (2)

Referências Bibliográficas

1. **Dr. Fabian Schüppel, Michael Schlüter, Dr. Jan Gacnik.** Design of battery electric vehicles in accordance with legal standards and manufacturers and customers requirements. *Research Gate*. 2017.
2. **Gomez, Juan, Souza, Adriana e Arruda, Fabiana.** *Análise Comparativa dos Custos dos Veículos de Combustão Interna e Veículos Elétricos: Estudo de Caso dos Correios*. Brasília : UNB, Novembro, 2015.
3. **Freitas, Daniel Zacarias.** Análise de Eficiência e Controle de um Sistema Integrado Roda-Motor Elétrico. *Dissertação de Mestrado*. Rio de Janeiro : PUC-RIO, Abril, 2015.
4. **Sánchez, Fernando Zegarra.** Eficiência Energética de Veículos Elétricos. *Dissertação de Mestrado*. Rio de Janeiro : PUC-Rio, Fevereiro, 2012.
5. **Neto, Mauro Speranza.** Modelagem de Veículos Terrestres com Motores Elétricos. *Sistemas Eletromecânicos*. Rio de Janeiro : PUC-RIO, Abril, 2015.
6. **Rueda, Oscar Antonio Solano.** Controle do Motor de Indução para Veículos Elétricos Mediante o Uso de Duplo Conversor. *Dissertação de Mestrado*. Rio de Janeiro : COPPE UFRJ, Agosto, 2014.
7. **WEG.** *Motores Elétricos Guia de Especificação*. Jaraguá do Sul : s.n., Novembro, 2016.
8. **WEG.** *Motores de Indução Alimentados por Inversores de Frequência PWM*. Jaraguá do Sul : s.n., Janeiro, 2016.