



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP

ESCOLA DE MINAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA



SABRINA YOLE BICALHO BUSATTE

**DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA MOTOR PARA UM VEÍCULO
ELÉTRICO HÍBRIDO DE CONFIGURAÇÃO EM PARALELO PARA
USO EM CICLO DE CONDUÇÃO URBANA**

**OURO PRETO - MG
2018**

SABRINA YOLE BICALHO BUSATTE
sabrinabusatte@gmail.com

**DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA MOTOR PARA UM VEÍCULO
ELÉTRICO HÍBRIDO DE CONFIGURAÇÃO EM PARALELO PARA
USO EM CICLO DE CONDUÇÃO URBANA**

Monografia apresentada ao Curso de
Graduação em Engenharia Mecânica
da Universidade Federal de Ouro Preto
como requisito para a obtenção do
título de Engenheira Mecânica.

Professor orientador: DSc. Luís Antônio Bortolaia

OURO PRETO – MG
2018

B976d

Busatte, Sabrina Yole Bicalho.

Dimensionamento do sistema motor para um veículo elétrico híbrido de configuração em paralelo para uso em ciclo de condução urbana [manuscrito] / Sabrina Yole Bicalho Busatte. - 2018.

72f.: il.: color; grafs; tabs; mapas.

Orientador: Prof. Dr. Luís Antônio Bortolaia.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Dimensionamento. 2. Veículo Elétrico Híbrido. 3. Ciclo de Condução. 4. Consumo. 5. Motor. I. Bortolaia, Luís Antônio. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 621

Catálogo: ficha.sisbin@ufop.edu.br



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ATA DA DEFESA

Aos sete dias do mês de Dezembro de 2018, às 9h 00min, na sala 20, localizada na Escola de Minas – Campus - UFOP, foi realizada a defesa de Monografia da aluna Sabrina Yole Bicalho Busatte, sendo a comissão examinadora constituída pelos professores: Prof. DSc. Luís Antônio Bortolaia, Profª PhD. Elisângela Martins Leal e Prof. DSc. Washington Luís Vieira da Silva. O candidato apresentou o trabalho intitulado: “**Dimensionamento do sistema motor para um veículo elétrico híbrido de configuração em paralelo para uso em ciclo de condução urbana**”, sob orientação do Prof. DSc. Luís Antônio Bortolaia. Após as observações dos avaliadores, em comum acordo os presentes consideram o(a) aluno(a) aprovado.

Ouro Preto, 07 de Dezembro de 2018.

Prof. DSc. Luís Antônio Bortolaia
Professor Orientador

Profª PhD. Elisângela Martins Leal
Professor Avaliador

Prof. DSc. Washington Luís Vieira da Silva
Professor Avaliador

Sabrina Yole Bicalho Busatte

Aluno(a)

Dedico este trabalho à minha mãe, ao meu irmão, a todos os professores que me ensinaram até aqui e àqueles que assim como eu, acreditam que os avanços da ciência e da tecnologia devem tornar o mundo um lugar melhor e mais sustentável.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha mãe Rosália e ao meu irmão Willian pelo amor incondicional, por acreditarem em mim, por incentivarem meus sonhos pessoais e profissionais e por me darem todo o suporte necessário durante a graduação.

Agradeço ao Professor Luís Antônio Bortolaia pela orientação atenta, por sua solicitude, pela paciência e pela disponibilidade durante a realização desta monografia.

Agradeço ao Professor Washington Luís Vieira da Silva pela leitura atenta e correções sugeridas.

Agradeço ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais por me introduzir no universo da mecânica e me preparar para os grandes desafios da engenharia.

Agradeço aos engenheiros, técnicos e estagiários de Planejamento da Manutenção e Operações da CEMIG Geração e Transmissão por confiarem em mim durante o meu primeiro estágio e por me apresentarem ao mundo profissional.

Agradeço aos engenheiros Alãn Teófilo da Silva, Danilo Bernardes, Fabiana Vanzela Reis, Junio de Carvalho Ferreira, Diego Terra e demais colegas de trabalho pelos ensinamentos em meu período de estágio na Danone LTDA e por auxiliarem em meu amadurecimento e aprendizado profissional.

Agradeço a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho, especialmente professores, funcionários da universidade, colegas da Engenharia Mecânica, amigos de Belo Horizonte e amigos que fiz durante minha jornada em Ouro Preto.

Por fim, agradeço imensamente à Escola de Minas e à Universidade Federal de Ouro Preto pelo ensino gratuito e de qualidade que possibilitou o desenvolvimento deste trabalho com excelência e aprofundamento teórico e técnico.

*“I’ve learned that I still have a
lot to learn.”*

Maya Angelou

RESUMO

Este trabalho é pautado no desenvolvimento do dimensionamento de um sistema de motor que compõe um veículo elétrico híbrido onde os motores elétrico e de combustão interna são integrados por uma configuração em paralelo. O sistema motor é composto pelos motores e pela bateria que alimenta o sistema elétrico, além das principais configurações de conexão para atingir o menor consumo de combustível e a maior autonomia possível. O veículo proposto se locomove em um regime de consumo em ciclo de condução urbana baseado na norma americana FTP-75 e na norma da ABNT NBR 6601. O objetivo do estudo é obter a melhor configuração para que o veículo possa se tornar uma opção viável para o consumidor, além de promover a menor emissão de gases poluentes e reduzir o consumo de combustíveis derivados do petróleo. O dimensionamento é focado no cálculo das potências a serem desenvolvidas por cada motor, assim como a capacidade energética necessária para a bateria instalada. Para os cálculos foi considerada a declividade da cidade de Belo Horizonte à fim de estabelecer maior relação com uma situação real das vias de uma capital brasileira. O estudo consiste em uma pesquisa exploratória, quantitativa, de caráter bibliográfico e de estudo de caso teórico. A metodologia empregada está de acordo com o estudo bibliográfico realizado. Foi feita a utilização do software Excel para plotagem de gráficos e confecção de tabelas com base em valores postulados durante a realização do dimensionamento. Os resultados deste trabalho são apresentados de forma objetiva, demonstrando que um veículo elétrico híbrido pode oferecer maior economia e é uma opção mais sustentável em relação à emissão de gases nocivos ao meio ambiente e consumo de combustível. Como resultados do trabalho foi obtida a potência obtida no motor elétrico foi de 71 kW (ou 99,13 cv) com a configuração de construção do tipo relutância variável. A potência obtida para o motor de combustão interna é de 60 kW (ou 82 cv) e o ciclo termodinâmico selecionado para o seu funcionamento é o ciclo Atkinson. A bateria possui potência máxima de 84 kW e tensão de 18,53 kV em uma situação onde a corrente é 4,5 Ampéres e com tempo suposto de 10 horas para sua descarga sem nenhum fornecimento de energia e com uso contínuo e o fator de hibridização do veículo é de 0,54.

Palavras-chave: dimensionamento, veículo elétrico híbrido, ciclo de condução, consumo, motor, potência.

ABSTRACT

This work is based on the development of the sizing of an engine system that makes up a hybrid electric vehicle where the electric and the internal combustion engines are integrated by a parallel configuration. The motor system consists of the motors and the battery that powers the electrical system, in addition to the main connection configurations to achieve the lowest fuel consumption and maximum autonomy. The proposed vehicle moves on an urban driving cycle consumption regime based on the American standard FTP-75 and the standard of ABNT NBR 6601. The aim of the study is to obtain the best configuration so that the vehicle can become a viable option for the consumer, as well as to promote the emission of less polluting gases and reduce the consumption of petroleum derived fuels. The measurement is focused on the calculation of the powers to be developed by each engine, as well as the energy capacity required for the installed battery. For the calculations, it was considered the slope of the city of Belo Horizonte in order to establish greater relation with a real situation of the roads of a Brazilian capital. The study consists of an exploratory, quantitative, of bibliographic character and of theoretical case study. The methodology used is in agreement with the bibliographic study carried out. Excel software was used for plotting charts and making tables based on postulated values during the measurement process. The results of this work are presented in an objective way, demonstrating that a hybrid electric vehicle can offer a great saving and is a good sustainable option in relation to the emission of harmful gases in the environment and fuel consumption. As results of the work was obtained the power obtained in the electric motor was 71 kW (or 99.13 hp) with the construction configuration of the variable reluctance type. The power obtained for the internal combustion engine is 60 kW (or 82 hp) and the thermodynamic cycle selected for its operation is the Atkinson cycle. The battery has a maximum power of 84 kW and a voltage of 18.53 kV in a situation where the current is 4.5 Ampères and with a supposed time of 10 hours for its discharge without any power supply and with continuous use and the hybridization factor is 0.54.

Keywords: sizing, hybrid electric vehicle, driving cycle, consumption, engine, power.

LISTA DE ACRÔNIMOS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira De Normas Técnicas
CRF	<i>Code of Federal Regulations</i> ou Código De Regulações Federais
FTP-75	<i>Federal Test Procedure – 75</i> ou Procedimento de Testes Federais - 75
IEA	<i>International Energy Agency</i> ou Agência Internacional de Energia
NBR	Norma Brasileira
OPEP	Organização dos Países Exportadores de Petróleo
PMI	Ponto Morto Inferior
PMS	Ponto Morto Superior
SOC	<i>State Of Charge</i> ou Estado de carga
VSP	<i>Vehicle Specific Power</i> ou Potência Específica do Veículo

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
°	Graus
A	Ampére
A.h	Ampére-hora
CO ₂	Gás Carbônico
h	Horas
I	Corrente
k.N	Quilo-Newton
kg	Quilo
kg/m ³	Quilo por metro cúbico
km/h	Quilômetro por Hora
km/l	Quilômetro por Litro
kN.m	Quilo-Newton metro
kV	Quilo Volt
kW	Quilo Watts
l	Litro
m	Metros
m/s ²	Metro Por Segundo Quadrado
m ²	Metro Quadrado
mm	Milímetros
Pot	Potência
R\$	Reais
rad	Radianos
rpm	Rotação por Minuto
s	segundos
V	Tensão
W	Watt
Wh.kg ⁻¹	Watt-hora por quilograma
Wh.m ⁻³	Watt-hora por metro cúbico
α	Ângulo de inclinação da via

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: O Preço do Petróleo no Mercado e Alguns Fatos Históricos.....	2
Figura 2: Dados de um Teste de Ciclo De Condução NBR 6601	8
Figura 3: Configuração Do Sistema De Um Veículo Em Série	12
Figura 4: Configuração de Um Sistema de um Veículo Híbrido em Paralelo.	13
Figura 5: Sistema de Um Veículo Híbrido Combinado.	14
Figura 6: Sistema de Transmissão - Sistema em Série.....	15
Figura 7: Transmissão Do Veículo Elétrico Híbrido Em Paralelo Com O Motor Elétrico Funcionando Como Acoplador De Torque E De Velocidade	17
Figura 8: Curva Característica de Um Motor Elétrico	18
Figura 9: Curva Característica de Um Motor Elétrico Genérico.....	20
Figura 10: Diagrama Pressão x Volume Ciclo Atkinson	22
Figura 11: Diagrama Pressão x Volume do Ciclo Otto	23
Figura 12: Circuito Elétrico Simplificado Da Bateria	26
Figura 13: Fluxograma de Método do Trabalho	30
Figura 14: Gráfico de Variação de Potência (kW) <i>versus</i> Velocidade (km/h) no Motor De Combustão Interna.....	41
Figura 15: Gráfico de Potência Requerida x Velocidade (km/h)	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Ciclos Padrões de Condução	7
Tabela 2: Parâmetros Nominais de Uma Bateria Chumbo Ácido	26
Tabela 3: Variáveis do Ciclo de Condução	32
Tabela 4: Variáveis do Motor Elétrico	32
Tabela 5: Variáveis do Motor de Combustão Interna.....	33
Tabela 6: Variáveis da Bateria.....	33
Tabela 7: Variáveis para o Motor Elétrico	37
Tabela 8: Consumo de Combustível de Carros Elétricos Híbridos	38
Tabela 9: Dados do Motor de Combustão Interna.....	39
Tabela 10: Variação de Potências e Velocidades no Motor de Combustão Interna.....	40
Tabela 11: Potências Requeridas Com Variação de Inclinação e Velocidade	45
Tabela 12: Relação Entre VSP e o Funcionamento dos Motores em uma Via Plana	47
Tabela 13: Relação Entre VSP e o Funcionamento dos Motores em uma Via com Inclinação de 5,4°.....	48
Tabela 14: Relação Entre VSP e o Funcionamento dos Motores em uma Via com Inclinação de 9°.....	49
Tabela 15: Investimento em Gasolina do Veículo Elétrico Híbrido em Ciclo de Condução Urbana	50
Tabela 16: Investimento em Gasolina do Veículo Elétrico Híbrido por Distância Percorrida	51
Tabela 17: Investimento em Gasolina em um Veículo de Combustão Interna.	52

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Formulação do Problema.....	1
1.2	Justificativa.....	4
1.3	Objetivos.....	5
1.3.1	Geral	5
1.3.2	Específicos.....	5
1.4	Estrutura do Trabalho	6
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1	Ciclo de Condução.....	7
2.2	Veículo Híbrido	9
2.2.1	Potência Requerida – VSP.....	9
2.3	Sistema Motor do Veículo Elétrico Híbrido.....	10
2.3.1	Sistema Start/Stop	10
2.3.2	Freio Regenerativo	11
2.3.3	Configurações de Veículos Híbridos.....	11
2.3.4	Transmissão	15
2.3.5	Motor/Gerador Elétrico	17
2.3.6	Motor de Combustão Interna.....	21
2.3.7	Fator de Hibridização	25
2.3.8	Bateria.....	25
3	METODOLOGIA.....	29
3.1	Tipos de Pesquisa	29
3.2	Métodos e Materiais	30
3.3	Variáveis E Indicadores.....	31
3.4	Coleta e Tabulação de Dados	34
3.5	Considerações Finais	34
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
4.1	Parâmetros Globais.....	35
4.1.1	Ciclo de Condução	36
4.2	Dimensionamento dos Motores	36
4.2.1	Motor Elétrico	36
4.2.2	Motor a Combustão Interna.....	38

4.3	Cálculo do Fator de Híbridação	42
4.4	Dimensionamento da Bateria.....	42
4.4.1	Cálculo de Capacidade Peukert	42
4.4.2	Cálculo da Potência da Bateria.....	43
4.5	Sistemas Auxiliares	43
4.6	Cálculo da Potência Requerida - VSP	44
4.7	Relação Entre o VSP e o Funcionamento dos Motores.....	46
4.8	Relação do Ciclo de Condução e o Consumo de Combustível	50
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	53
5.1	Conclusões.....	53
5.2	Recomendações	54
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55
7	ANEXOS	58
7.1	ANEXO A – Declividades Médias das Vias de Belo Horizonte.....	58

1 INTRODUÇÃO

Neste primeiro capítulo é realizada uma abordagem teórica sobre a ambientação do uso de veículos na sociedade, o que influencia diretamente o alto consumo de combustíveis fósseis. Em seguida é apresentada a importância do surgimento de novos tipos de veículos como alternativa para a situação energética atual, a salientar os modelos híbridos elétricos que possuem em seu sistema motor a integração de um motor à combustão interna e um motor elétrico, oportunizando a redução da emissão de gases nocivos ao meio ambiente e a redução da utilização de combustíveis derivados do petróleo, como a gasolina e o diesel. Portanto, o capítulo tem a finalidade de apresentar o problema, os motivos de sua origem, a justificativa para a sua realização, os objetivos esperados e a estrutura do trabalho.

1.1 Formulação do Problema

De acordo com PAINEL (2016), o barateamento dos combustíveis provenientes de fontes fósseis foi o grande responsável para o surgimento do primeiro motor de combustão interna, criado pelo inventor belga Étienne Lenoir em 1860. Ao longo dos anos, a tecnologia foi aprimorada e o engenheiro alemão Nicolaus Otto criou, em 1876 um motor de automóvel semelhante aos modelos utilizados em veículos atuais: o motor quatro tempos movido pelo ciclo termodinâmico do tipo Otto, batizado em homenagem ao seu inventor. Esses motores começaram a substituir os motores à vapor, muito utilizados no século XIX, devido a sua maior eficiência, menor peso e dimensões em relação às demais tecnologias disponíveis na época. E nos anos subsequentes, grandes nomes aperfeiçoaram e criaram diversas tecnologias inovadoras baseadas na invenção de Nicolaus Otto, como por exemplo o caso de três engenheiros alemães Gottlieb Daimler, Wilhelm Maybach e Karl Benz responsáveis pela criação do motor de dois tempos e o alemão Rudolf Diesel, responsável pelo motor de ignição espontânea (VARELLA, 2014).

Em contrapartida, como pode-se observar no material de Baran (2012), a partir de 1973, o consumo de petróleo se tornou uma situação crítica em âmbito mundial devido ao aumento da demanda de seus derivados por causa da industrialização crescente e o aumento da frota de veículos em âmbito mundial. Com a alta necessidade de disponibilidade de gasolina, diesel, querosene, entre outros produtos derivados do petróleo em países industrializados, como os Estados Unidos da América, tornou-se expressiva a dependência de fornecedores externos para

suprir a demanda interna. E a busca gradativa por petróleo também influencia à existência de uma alta variação nos preços de venda do barril de petróleo mercado internacional. De acordo com um relatório da IEA (2011), ao analisar as previsões mundiais do consumo de energia, observa-se que a era dos combustíveis fósseis está longe de acabar, mas a sua predominância tende a declinar devido ao fato do petróleo ser um recurso finito.

A Figura 1 apresenta uma série histórica da variação do preço em dólares do barril de petróleo e alguns acontecimentos históricos que tiveram influência direta em sua variação de preço.



Figura 1: O Preço do Petróleo no Mercado e Alguns Fatos Históricos
Fonte: Baran, 2012

Ao avaliar a Figura 1, observa-se a alta volatilidade do preço do petróleo e a sua consequente variação em momentos onde ocorreram marcos históricos. O seu valor não gira exclusivamente em torno de sua demanda no mercado, mas também por acontecimentos que impactaram países fornecedores ou grandes compradores de petróleo, assim como a invasão do Iraque no Kuwait ou o acontecimento do atentado no dia 11 de setembro nos Estados Unidos da América.

Em uma análise realizada em um relatório reproduzido pela IEA (2011), o setor que apresenta maior consumo de petróleo em todo o mundo é o de transportes, responsável em 2010 por 61,7% do consumo de petróleo e 23% das emissões de CO₂ no mundo. Este setor foi também o maior responsável pelo crescimento do consumo de petróleo nas últimas décadas.

De acordo com uma análise realizada no estudo de Baran (2012), a ciência encontra-se em busca de soluções alternativas para a questão da dependência do petróleo. Existem soluções baseadas na busca de novos meios de geração de energia, tais como o desenvolvimento de novas fontes, convencionais ou não, como os biocombustíveis e a energia nuclear. Outras soluções buscam priorizar a eficiência do consumo e o uso sustentável e economicamente viável da energia. E entre todas as possíveis alternativas disponíveis, existe a opção da utilização dos transportes urbano e rodoviário desenvolvidos com motores elétricos ou com uma configuração híbrida, o que quebra o paradigma do automóvel convencional, profundamente consolidado na cultura da sociedade moderna.

Vasconcelos (2015) afirma que veículos elétricos possuem motores mecanicamente simples que conseguem atingir até 90% de eficiência durante toda sua gama de velocidade e potência. Diferentemente de um veículo a combustão, sua taxa de emissão de gases na atmosfera é nula. Mas se levarmos em conta que a energia elétrica para abastecer o veículo venha de outra fonte que emita CO₂, a quantidade de gases emitidos equivalente para a alimentação desse veículo chega a ser metade ou um terço da quantidade emitida de um veículo a combustão e isso é devido a alta eficiência dos motores elétricos em relação aos de explosão. E os veículos elétricos ainda possuem a capacidade de converter energia cinética em energia elétrica.

Conforme Marques (2013), um veículo híbrido possui mais de uma fonte de força motriz, como motor à combustão interna e motor elétrico, mas ainda existe a possibilidade de captação de formas de energia, como por exemplo a energia solar. Essas podem ser utilizadas em conjunto ou separadamente e visam sempre a maximização da eficiência energética para garantir o menor consumo de combustível possível com a maior autonomia e menor emissão de poluentes. Essa configuração é vantajosa em relação a veículos puramente elétricos por não limitar o usuário com apenas um tipo de fornecimento energético. Os ciclos termodinâmicos utilizados em motores de veículos híbridos podem variar, onde são possíveis o uso do ciclo Atkinson, ciclo Otto ou do ciclo Miller.

Diante desta ambientação, o foco do trabalho é realizar um dimensionamento de um veículo híbrido de configuração em paralelo e analisar os parâmetros principais para o sistema motor, como a potência dos motores e a capacidade energética da bateria instalada no sistema, objetivando uma compreensão aprofundada desta configuração de veículo. Para compreender melhor a fundamentação deste trabalho, tem-se a definição do termo ‘análise’ apresentada por Enes (2017), que é um estudo sobre como algo é praticável, se pode alcançar bons frutos e se

pode ter êxito. É possível analisar algo sob diversas perspectivas como, por exemplo, econômico-financeira, técnica ou tecnológica, legal, operacional, ambiental, política, fiscal, social, entre outros. Uma análise pode ser feita por diferentes razões e utilizando diversas técnicas para se obter a conclusão final acerca do estudo. E segundo o dicionário Michaelis (2018), dimensionamento pode ser definido por “ato ou efeito de dimensionar, de atribuir ou de fixar as dimensões (tamanho) de algo: dimensionamento de valores.” ou seja, dimensionar consiste em encontrar valores de maneira clara e bem fundamentada para embasar as propostas de um trabalho, considerando seus parâmetros específicos e limitações ou especificidades predeterminadas.

E por fim, pode-se definir que o presente estudo foca em realizar um dimensionamento do sistema motor de um veículo elétrico híbrido com configuração em paralelo em ciclo de condução urbana e assim como compreender seu funcionamento e principais configurações, bem como as principais vantagens e desvantagens de cada. Todos os detalhes técnicos e teóricos deste modelo de veículo são muito importantes para embasar um estudo confiável que fundamente a obtenção de uma conclusão sucinta. Diante disso, surge um problema a ser estudado:

Como dimensionar o sistema motor de um veículo elétrico híbrido de configuração em paralelo para o uso em ciclo de consumo urbano?

1.2 Justificativa

Segundo o relatório anual da IEA (2011), os países industrializados contam com aproximadamente 17% da população mundial e consomem 55% de toda a energia produzida no mundo. Em contrapartida, a procura mundial por disponibilidade energética é prevista para crescer mais de um terço, sendo estimado um aumento de 35% a 46% até 2035 em comparação com a quantidade que é demandada atualmente. E esse crescimento será impulsionado, principalmente, por países emergentes, onde a China, a Índia e o Oriente Médio representarão 60% desse aumento.

Um estudo aprofundado realizado pelo Departamento de Medicina Preventiva da Faculdade de Medicina da Universidade de São Paulo (2004) revelou que, em dias com mais poluição no ar, o número de internações por doenças respiratórias aumenta cerca de 8% e a mortalidade geral aumenta cerca 4% a 6%. Ainda no mesmo estudo, são apresentados os principais afetados

pelas doenças respiratórias advindas da poluição do ar: os idosos e as crianças. Esses dados são relevantes para comprovar que a poluição não é apenas uma questão ambiental, mas também um problema de saúde pública.

O interesse em dimensionar um veículo elétrico híbrido versa na busca para o entendimento de uma tecnologia já existente no mercado, mas ainda pouco utilizada, o que proporciona uma baixa quantidade de modelos disponíveis e alto valor comercial de venda. É uma tecnologia que necessita de estudos mais aprofundados com o intuito de baratear cada vez mais sua utilização, pois além do seu potencial de emitir menos gases poluentes e usar menores quantidades de combustíveis fósseis, ainda pode reduzir os investimentos em combustíveis, se tornando uma opção interessante ao usuário. E por fim, é possível compreender de maneira geral o funcionamento deste tipo de veículo e quais as suas vantagens, o que auxilia a busca por soluções para a mobilidade em ambientes urbanos cada vez mais amigáveis ambientalmente.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Realizar um dimensionamento de um veículo elétrico híbrido de configuração em paralelo para um ciclo de condução urbana, verificando as principais características e as principais vantagens da configuração selecionada para o veículo.

1.3.2 Específicos

- Realizar um dimensionamento teórico baseado em estudos bibliográficos de um veículo elétrico híbrido;
- Descrever a metodologia adotada, apontar as variáveis e indicadores do estudo e apresentar a instrumentação de coleta e tabulação dos dados obtidos;
- Selecionar parâmetros de um veículo genérico do tipo ‘sedã’ de acordo com as informações disponíveis;
- Dimensionar a potência cada motor quantitativamente;
- Dimensionar a capacidade da bateria para o veículo;
- Avaliar as melhores configurações para o funcionamento de um veículo elétrico híbrido em ciclo de condução urbana;

- Realizar os cálculos da potência requerida do veículo e comparar com as potências calculadas para os motores;
- Comparar o consumo do veículo elétrico híbrido com um veículo genérico movido por motor de combustão interna.

1.4 Estrutura do Trabalho

Este trabalho é dividido em cinco capítulos, onde todos estão de acordo com as normas da ABNT e padrões para realização de trabalhos científicos na área de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto, cuja estrutura está descrita a seguir:

No primeiro capítulo são apresentadas as formulações do problema, a justificativa para a realização do trabalho e seus objetivos geral e específicos.

No segundo capítulo é exposta a fundamentação teórica do trabalho, onde há uma breve análise do tipo de veículo abordado, assim como seu funcionamento e suas principais características, componentes e sistemas auxiliares.

A metodologia adotada durante a pesquisa, assim como as ferramentas que são utilizadas para a coleta de dados que fundamentam a obtenção dos resultados, é apresentada no terceiro capítulo.

O quarto capítulo discorre sobre os indicadores pré-selecionados para o estudo e o dimensionamento de parâmetros do sistema motor do veículo, como potência dos motores elétrico, de combustão interna e da bateria, assim como outras variáveis necessárias para o funcionamento pleno do carro. Também são realizados cálculos para a obtenção da potência requerida com o intuito de realizar uma comparação entre os dados calculados de potência para os motores, além da comparação do investimento em combustível entre um veículo elétrico híbrido em relação à um veículo convencional.

O quinto e último capítulo do trabalho compreende a conclusão dos dimensionamentos deste estudo e as recomendações geradas de acordo com os resultados obtidos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A fundamentação teórica para a realização deste trabalho é apresentada neste capítulo. Há a caracterização de ciclos de condução e quais seus principais parâmetros e são apresentadas informações relativas a veículos elétricos híbridos, como os sistemas auxiliares, principais componentes, configuração de funcionamento e sistemas de transmissões utilizáveis, além de informações sobre cada tipo de motor empregado e sobre baterias.

2.1 Ciclo de Condução

Para Maciel Filho (2013), ciclos de condução podem ser definidos como uma sequência de condições de operação de um veículo durante um determinado período de tempo, são consideradas as variações de marcha lenta, aceleração, cruzeiro (velocidade com a relação maior eficiência/menor consumo), desaceleração e paradas. Esses ciclos representam um padrão de condução de uma determinada região e podem ser usados para estudo de emissões de gases poluentes e consumo de combustível.

De acordo com o estudo realizado por Vasconcellos (2011), tem-se uma tabela que ilustra quais os ciclos de condução em cada continente. É importante salientar que os estudos de ciclos de condução ainda são pouco explorados na América do Sul, logo os dados de condução média de um veículo em perímetro urbano não são acessíveis. Na Tabela 1 são explicitados ciclos médios de condução na América do Norte, na Ásia-Pacífico e na Europa.

Tabela 1: Ciclos Padrões de Condução

Região	Ciclo	Tempo em Marcha Lenta ou Parado (%)	Velocidade Máxima (km/h)	Velocidade Média (km/h)	Máxima Aceleração (m/s ²)
Ásia-Pacífico	Urbano	32,4	70	22,7	0,79
Europa	-	27,3	120	32,2	1,04
FTP-75 América do Norte – Cidade	Urbano	19,2	96,2	34	1,60
América do Norte - Rodovia	Rodoviário	0,7	129	77,2	1,43

Fonte: Adaptado de Vasconcellos, 2011

A partir da Tabela 1, é possível observar que os veículos não atingem velocidades maiores que 90 km/h em perímetros urbanos e que a velocidade média desenvolvida não ultrapassa 35 km/h devido aos fatores relativos ao trânsito e congestionamentos em regiões

urbanas. E ainda na análise da tabela, há a evidência da necessidade do sistema Start-Stop que desliga o motor e gera economia de combustível nos momentos de parada do veículo, pois é observado que os carros passam um tempo considerável parados ou em marcha lenta no trânsito, como vê-se o Japão com uma média de parada de 32,4% e a Europa com a média de 27,3%.

Para a consideração de ciclos de condução no Brasil, segundo Daemme *et al* (2015), é adotado como padrão para ensaios em veículos leves o ciclo de condução da legislação americana, o FTP-75 (Federal Test Procedure), regulamentado pelo CFR 40 (Code of Federal Regulations). O ciclo FTP-75 é composto por três seções de teste, uma fase transitória fria, uma fase estabilizada e outra fase transitória quente, que representa as velocidades reais medidas nos EUA em ruas de Los Angeles durante o tráfego durante o período diurno em trânsito usual. E existe a norma brasileira proposta pela ABNT (2012) que é a NBR 6601 responsável por normatizar a realização de ensaios em veículos rodoviários automotores leves para a determinação de hidrocarbonetos, monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio, dióxido de carbono e material particulado no gás de escapamento, onde para a realização de tal ensaio é proposto um ciclo de condução urbano que pode ser observado na Figura 2.

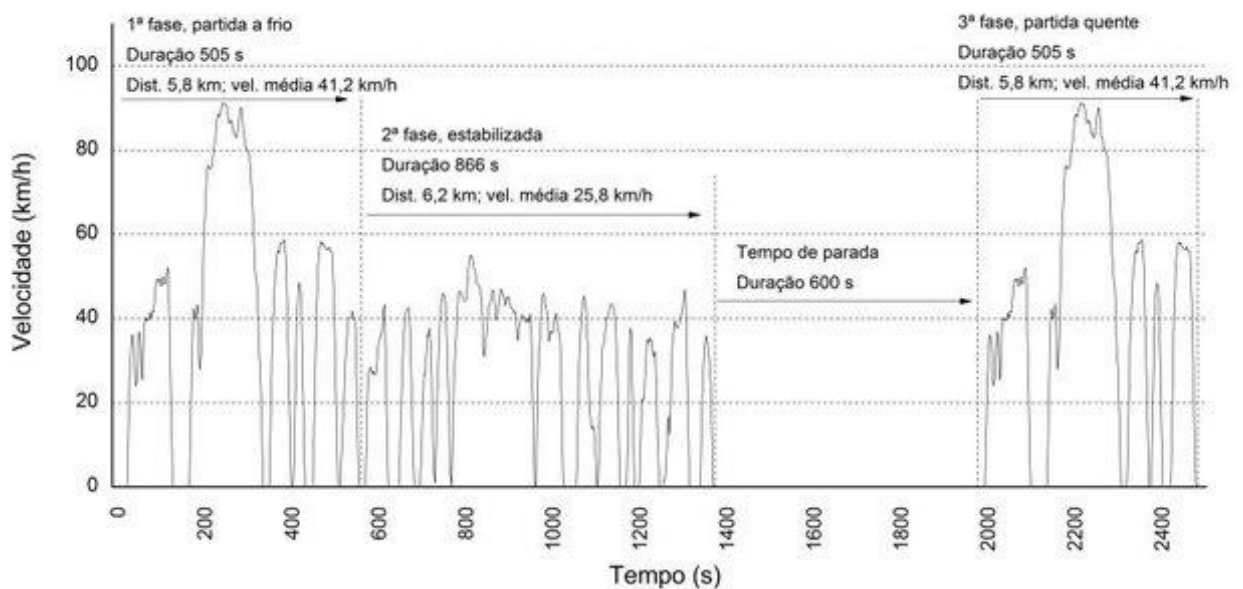


Figura 2: Dados de um Teste de Ciclo De Condução NBR 6601
Fonte: Daemme *et al*, 2015 *apud* NBR 6601.

Pela Figura 2 tem-se a apresentação do ciclo de condução urbano normatizado pela NBR 6601 com suas principais características. O início da primeira fase tem duração de 505 segundos com velocidade média de 41,2 km/h e uma distância percorrida de 5,8km. A segunda fase tem duração de 866 segundos, com velocidade média de 25,8 km/h e uma distância percorrida de

6,2 km. Há um tempo de parada referente a 600 segundos e por fim, a terceira fase tem duração de 505 segundos, velocidade média de 41,2 km/h e distância percorrida de 5,8 km.

2.2 Veículo Híbrido

De acordo com Vasconcellos (2011), os veículos híbridos podem ser definidos como uma classe de transporte onde o sistema de propulsão empregado em seu funcionamento utiliza pelo menos dois tipos diferentes de processo de conversão de energia e dois diferentes tipos de armazenamento de energia. Em sua grande maioria, são utilizados sistemas para 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. Existem outros sistemas de veículos híbridos, como por exemplo veículos que possuem um motor à combustão e aproveitam da luz solar, mas a utilização desse tipo de sistema possui uma escala muito inferior se comparada com a primeira.

Vaz (2016) apresenta um ponto importante, em que os veículos elétricos híbridos não dispõem de nenhuma estrutura para conexão à rede elétrica porque a carga é proveniente apenas do próprio motor a combustão e de mecanismos como frenagem regenerativa. O usuário do veículo deve apenas abastecer o veículo com combustível para que o carro possa permanecer em pleno funcionamento.

Vasconcellos (2011) ainda afirma que veículos híbridos apresentam diversas características positivas em relação à veículos convencionais, como possuir emissão de ruídos inferior à veículos convencionais devido à utilização de motor elétrico, otimização da utilização de matrizes energéticas internas ao aproveitar o melhor de cada motor e baixas emissões de poluentes ao meio ambiente, o que os torna cada vez mais interessantes para a utilização em meio urbano.

2.2.1 Potência Requerida – VSP

O trabalho realizado por Carvalho (2014) apresenta a metodologia “Vehicle Specific Power” (VSP) que é responsável por calcular a potência requisitada ao veículo, agrupando conjuntos de diferentes características e condições de condução, como aceleração, velocidade e inclinação da via.

A Equação 1 fornecida através do trabalho de Carvalho (2014) apresenta os parâmetros para o cálculo da potência requerida VSP.

$$VSP = (V \cdot (1,1 \cdot a + g \cdot \sin(\alpha) + 0,132) + 0,000302 \cdot v^3) \cdot Mv \quad (1)$$

Onde:

- VSP é o Vehicle Specific Power, expresso em W;
- V é a velocidade instantânea do veículo (m/s);
- a é a aceleração instantânea (m/s²);
- α é a inclinação via (rad);
- g é a aceleração da gravidade (m/s²);
- Mv é a massa do veículo
- 0,132 é o coeficiente de resistência de rolamento definido pela equação (adimensional);
- 0,000302 é o coeficiente de resistência aerodinâmica (adimensional).

2.3 Sistema Motor do Veículo Elétrico Híbrido

Através da apresentação feita por Marques (2013), o sistema motor do veículo elétrico híbrido é o sistema principal responsável pelo tracionamento do carro. Seu funcionamento é baseado na combinação de duas formas de geração de energia, onde existe um motor à combustão interna e um motor elétrico/gerador, além de controles eletrônicos, conversor, inversor e bateria. Os dois motores podem funcionar simultaneamente ou de maneira separada. Existem algumas variações de associação entre os motores que serão abordadas adiante no trabalho.

2.3.1 Sistema Start/Stop

Conforme Vasconcellos (2011), o sistema start/stop é um sistema auxiliar em um veículo elétrico híbrido com o foco em um melhor aproveitamento energético na utilização em grandes cidades, onde paradas breves e constantes são um fator recorrente.

E ainda em conformidade com o estudo de Vasconcellos (2011), o sistema start/stop é composto por diversos sensores localizados no pedal de freio do veículo, na embreagem e no ponto morto do câmbio. Esses sensores são responsáveis por enviar sinais para a unidade de

comando que tem como função finalizar o funcionamento do motor ou dar partida automaticamente quando for solicitado pelo motorista. Isso reduz o consumo de combustível de maneira considerável, já que o funcionamento do motor de combustão interna é reduzido consideravelmente.

2.3.2 Freio Regenerativo

O desempenho do veículo no momento de frenagem, seja ela leve ou brusca, é um dos fatores mais importantes para a segurança dos passageiros e da estrutura do carro. Imbasciati (2012) traz em seu estudo que o freio regenerativo é um importante sistema auxiliar de grande importância em um veículo elétrico híbrido, pois além de prover uma frenagem eficiente e segura em qualquer momento durante a direção, é capaz de recuperar a energia cinética proveniente de uma frenagem ou leve desaceleração do carro, o que permite que essa energia seja convertida pelo motor elétrico que funciona como um gerador e é armazenada na bateria do sistema para uso posterior no tracionamento ou em funções secundárias do veículo.

2.3.3 Configurações de Veículos Híbridos

2.3.3.1 Híbrida em Série

Segundo Castel-Branco (2014), um veículo híbrido com configuração série é composto por quatro componentes principais: um motor a combustão interna; um motor e controlador elétrico/gerador e uma bateria. O objetivo do motor de combustão interna, é converter a energia presente no combustível em energia mecânica, mas em vez de esta energia ser fornecida diretamente às rodas (através de uma transmissão) ela é transmitida para um gerador que através do inversor envia a energia para o motor elétrico,

Ainda em conformidade com Castel-Branco (2014), a energia elétrica convertida pelo gerador pode alimentar o motor elétrico na propulsão do veículo ou ser armazenada na bateria. O papel da bateria nesta configuração é o de funcionar como um buffer entre o gerador e o motor elétrico.

A única força motriz nesta configuração é o motor elétrico. A energia que alimenta este motor pode provir da bateria, do gerador, ou de ambos, caso a potência requerida assim o exija. Como o motor de combustão interna não está diretamente ligado às rodas, pode ser programado

para trabalhar no seu ponto ótimo de funcionamento, reduzindo desta forma o consumo de combustível. Isto é possível uma vez que existe a bateria que pode armazenar a energia produzida pelo motor de combustão interna que não é imediatamente usada. A Figura 3 ilustra a estrutura do veículo elétrico híbrido em série de forma simplificada.

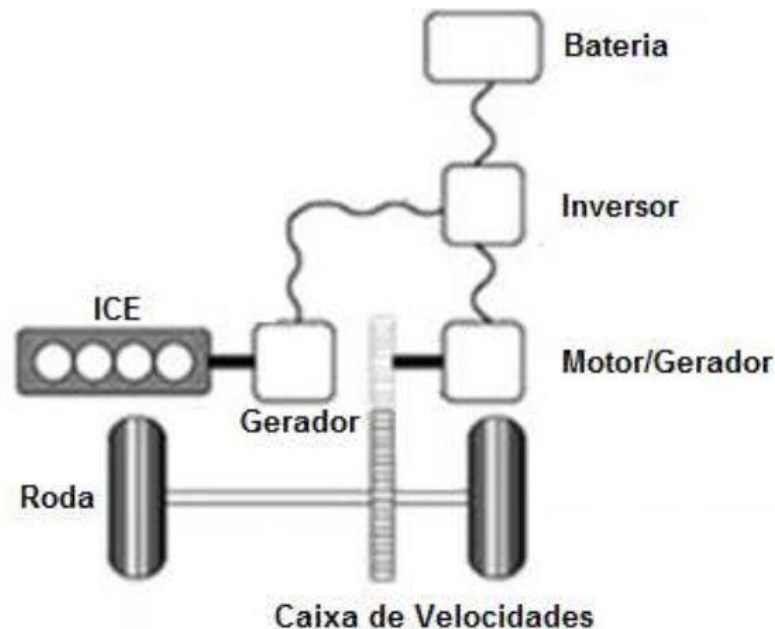


Figura 3: Configuração Do Sistema De Um Veículo Em Série
Fonte: Castel-Branco, 2012.

É possível observar na Figura 3 que nesta configuração do sistema apenas o motor elétrico encontra-se conectado à transmissão de movimento para as rodas, o que o torna o motor principal e o diretamente responsável pelo tracionamento do veículo, enquanto o motor de combustão interna atua como um auxiliar para fornecimento de energia para o sistema.

2.3.3.2 Configuração Híbrida Paralelo

Segundo Li & Williamson (2008) um veículo híbrido com configuração em paralelo, tanto o motor elétrico como o motor de combustão interna podem fornecer potência mecânica às rodas, podendo funcionar cada um individualmente ou em conjunto, como é apresentado pela Figura 4.

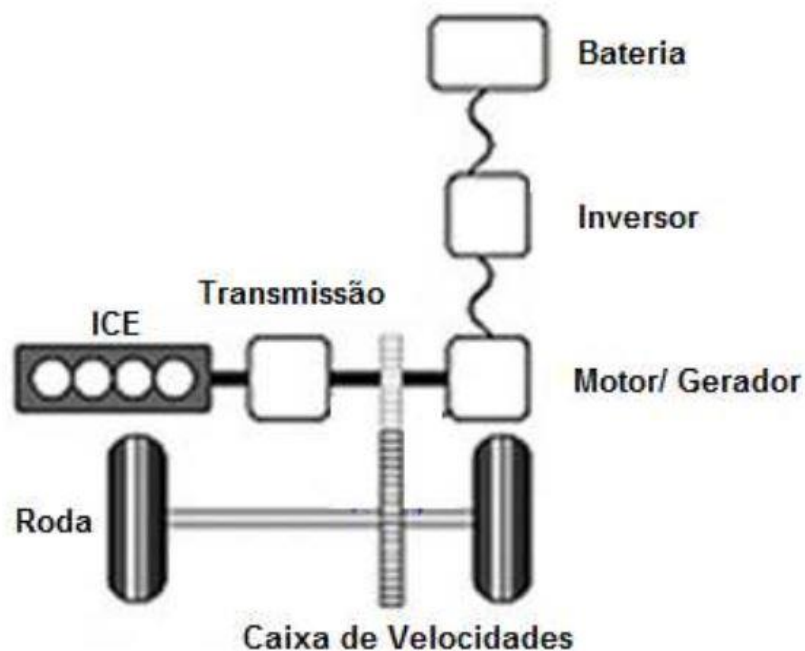


Figura 4: Configuração de Um Sistema de um Veículo Híbrido em Paralelo
 Fonte: Castel-Branco, 2012.

Pela razão da possibilidade de funcionamento dos motores de forma independente ou conjunta, como é possível observar na Figura 4, conseqüentemente, o motor de combustão interna e o motor elétrico podem ter um tamanho e potências relativamente menores que um veículo elétrico híbrido em série. Isso é devido ao fato de ambos os motores estarem ligados à transmissão, logo a eficiência do sistema propulsor é maior em relação à configuração em série.

De acordo com Husain (2011), apesar de permitir diminuir a dimensão dos componentes (motor de combustão interna e motor elétrico), existem desvantagens. O fato de o motor de combustão interna não estar sempre a trabalhar no seu ponto de eficiência máxima, uma vez que o motor está diretamente ligado ao sistema de transmissão, é uma das desvantagens. Além disso, verifica-se ainda, um aumento da complexidade e do peso, associados à adição de uma transmissão mecânica.

2.3.3.3 Configuração Híbrida Combinado

Segundo cita Kasseris e Heywood (2007) o veículo híbrido combinado ou power split procura associar as vantagens da configuração série e paralelo. Nesta configuração a potência do motor pode ser dividida em duas componentes: série e paralelo. Na componente paralelo, a potência fornecida pelo motor de combustão interna é diretamente fornecida às rodas, podendo ser auxiliada com o motor elétrico, caso haja necessidade. Na componente série a potência do

motor de combustão interna é convertida em energia elétrica pelo gerador e depois armazenada pela bateria ou usada pelo motor elétrico. Em alternativa, o gerador pode ser usado como motor sendo a energia fornecida pela bateria.

A gestão de energia e o tipo de componentes usados neste tipo de configuração têm sido alvo de muito estudo e desenvolvimento por parte da indústria automobilística que comercializa este tipo de veículos. (Wang *et al.*, 2014) E através da Figura 5 tem-se a configuração de montagem de um veículo elétrico híbrido combinado.

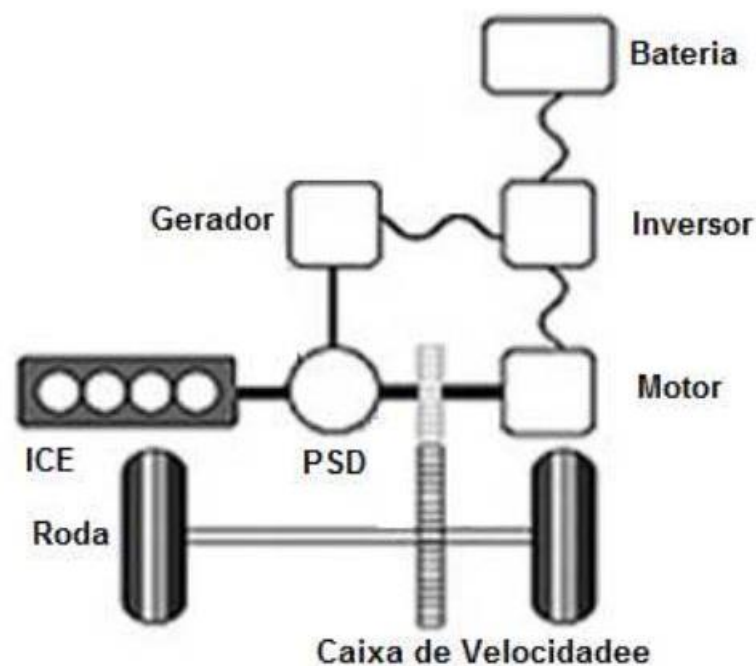


Figura 5: Sistema de Um Veículo Híbrido Combinado
Fonte: Castel-Branco, 2012.

De acordo com a configuração demonstrada pela Figura 5, observa-se a maior complexidade do veículo elétrico híbrido combinado, pois se levarmos em consideração uma comparação entre ela e as configurações apresentadas anteriormente tem-se uma maior quantidade de conexões entre os sistemas, o que eleva a necessidade de compreensão aprofundada e estudo dos seus componentes e tecnologia associada.

2.3.3.4 Configuração Híbrida Plug-In

Conforme Castel-Branco (2012), um veículo Híbrido Plug-In é um tipo de híbrido com a particularidade de a bateria poder ser carregada a partir da rede elétrica, através de tomadas elétricas convencionais ou postos de abastecimento.

Quando usado em curtas distâncias, pode ser usado como um veículo 100% elétrico. E a tecnologia Plug-In pode ser associada a qualquer uma das configurações mencionadas anteriormente, aumentando sua versatilidade.

Existem várias vantagens no uso deste tipo de veículo, devido ao aumento de autonomia elétrica e a redução do consumo de combustível quando comparado às demais configurações de veículos elétricos híbridos. Este fator tem efeitos diretos na redução considerável de produção de gases poluentes a nível local, o que é um efeito benéfico a nível global, à medida que estratégias de implementação de energias renováveis vão sendo tomadas. (Mi *et al.*, 2011)

2.3.4 Transmissão

Vasconcellos (2011) afirma em seu trabalho que veículos elétricos híbridos com configuração em série possuem apenas um tipo de configuração de transmissão, onde o motor elétrico é o responsável por tracionar o veículo e ele encontra-se diretamente ligado à transmissão de movimento para as rodas. A Figura 6 ilustra a conexão de transmissão utilizada para este caso.

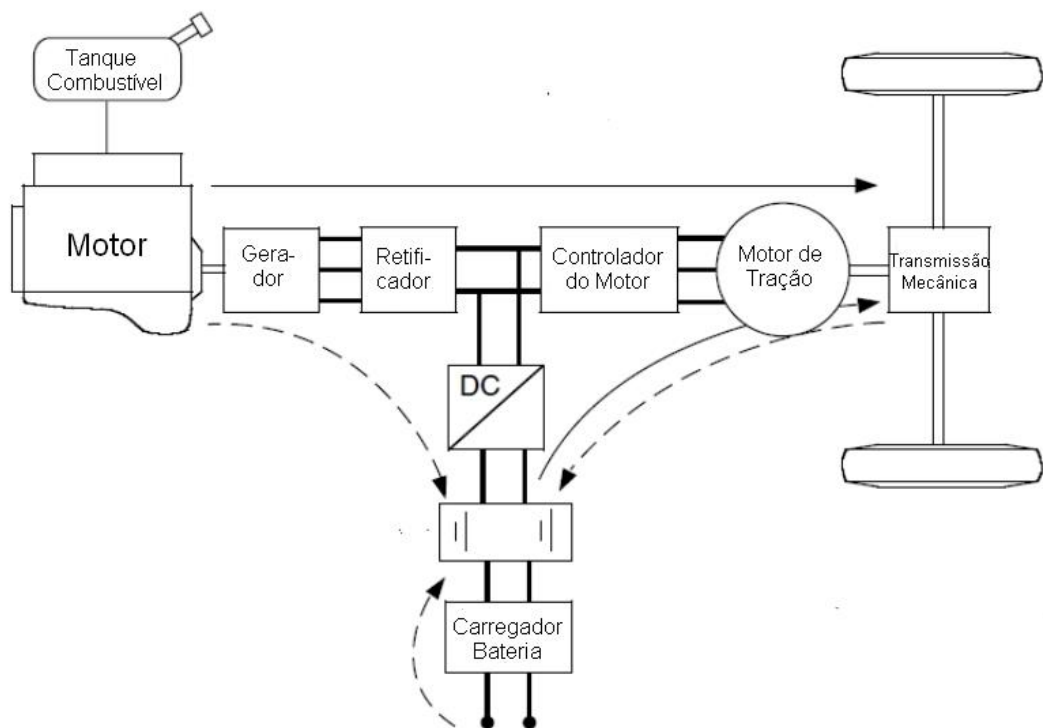


Figura 6: Sistema de Transmissão - Sistema em Série
Fonte: Adaptado de Vasconcellos, 2011

Como é possibilitado através da Figura 6, tem-se uma situação onde a transmissão mecânica está ligada diretamente ao motor de tração e não tem nenhum tipo de interface com o motor de combustão interna.

Para veículos elétricos híbrido com configuração em paralelo existem diversos tipos de configurações para sua transmissão de forças. Ainda segundo Vasconcellos (2011), os principais tipos de transmissão são:

Transmissões com acoplador de torque:

- Configuração de transmissão em paralelo com dois eixos e duas transmissões;
- Transmissão com acoplador de torque paralelo com dois eixos e uma transmissão;
- Configuração de transmissão em paralelo com um eixo e motor elétrico utilizado como acoplador de torque e com uma transmissão após os motores;
- Configuração de transmissão em paralelo com um eixo e motor elétrico utilizado como acoplador de torque e com uma transmissão anterior ao motor de combustão interna;
- Configuração de transmissão em paralelo com dois eixos separados.

Transmissões com acoplador de velocidades:

- Configuração de transmissão em paralelo com engrenagem planetária;
- Configuração de transmissão em paralelo com o motor elétrico sendo utilizado como acoplador de velocidades.

Transmissões com acoplador de velocidades e de torque:

- Configuração de transmissão em paralelo com acoplador de torque e velocidade;
- Configuração de transmissão em paralelo com motor elétrico sendo usado como acoplador de velocidade.

O autor apresenta que a montagem de transmissão mais eficiente num veículo elétrico híbrido é a configuração onde a transmissão tem arquitetura em paralelo com o motor elétrico funcionando como acoplador de torque e de velocidade. A transmissão que está ligada após o motor elétrico deve estar entre o motor de combustão interna e o motor elétrico como mostra a Figura 7.

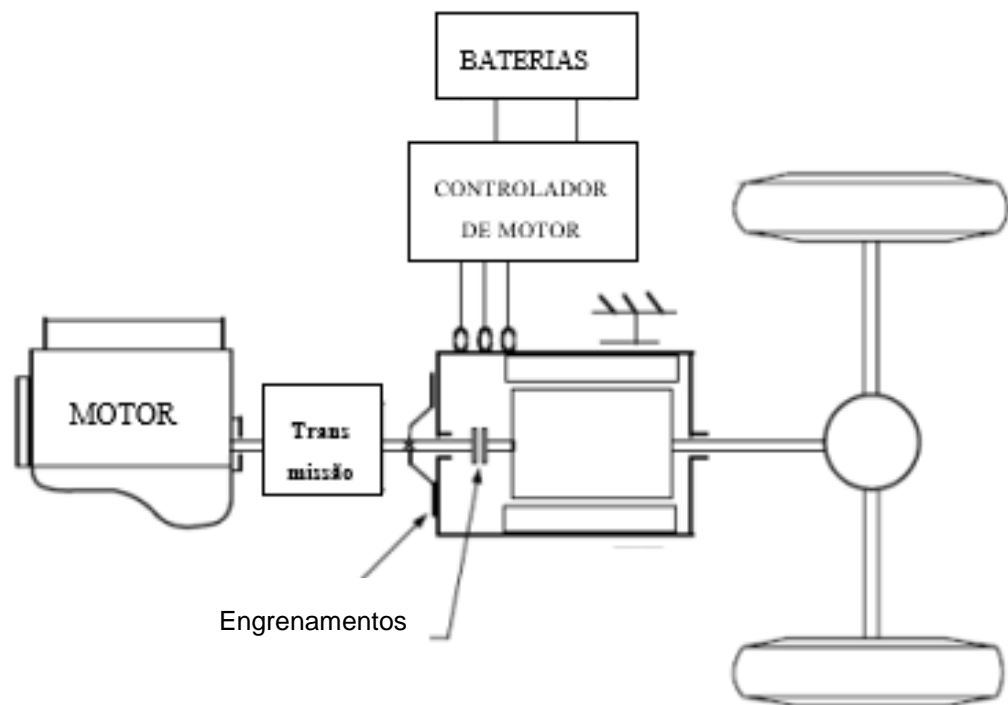


Figura 7: Transmissão Do Veículo Elétrico Híbrido Em Paralelo Com O Motor Elétrico Funcionando Como Acoplador De Torque E De Velocidade

Fonte: Adaptado de Vasconcellos, 2011

Segundo Vasconcellos (2011), a posição da transmissão apresentada pela Figura 7 proporciona que o motor de combustão interna tenha melhor desempenho e eficiência e o motor elétrico não apresenta grandes perdas na transmissão ou na conversão energética.

2.3.5 Motor/Gerador Elétrico

Através do estudo realizado por Côrrea (2013), sabem-se que os motores elétricos têm causado um impacto positivo no desenvolvimento industrial, pois eles têm a vantagem de ser tão potentes quanto os motores à combustão, ter maior potência e menor volume. E por não utilizarem diretamente nenhuma matéria prima proveniente do carbono, eles causam menos emissões poluidoras ao ambiente.

Vasconcellos (2011) afirma em seu trabalho que 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 relação aos motores de combustão. É pontuado que o motor elétrico também funciona como gerador em veículos híbridos. São utilizados dois motores elétricos no carro, um que tem como funções

tracionar o carro e recuperar energia em momentos de frenagem, o que conseqüentemente requer uma maior potência e outro que tem como funções ligar o motor a combustão e transformar a energia gerada pelo motor a combustão em energia elétrica, que possui um tamanho consideravelmente menor do que o primeiro.

Ainda segundo o estudo do mesmo autor, o motor elétrico possui alto torque em baixas velocidades e a potência aumenta gradativamente com a velocidade até o ponto em que ela se mantém constante independente da velocidade, enquanto o torque cai exponencialmente. É possível observar na Figura 8 uma curva característica de um motor elétrico que ilustra funcionamento descrito.

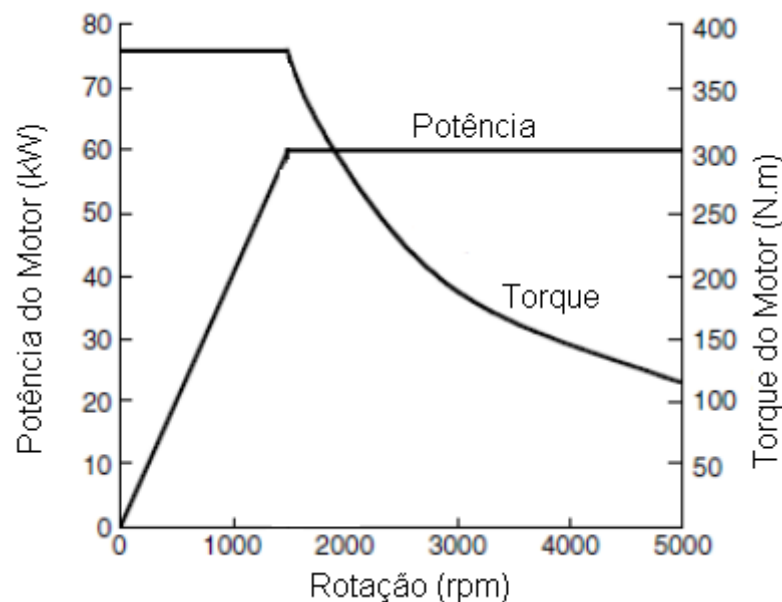


Figura 8 Curva Característica de Um Motor Elétrico
Fonte: Adaptado de Vasconcellos, 2011.

A Figura 8 apresenta as relações entre potência, torque e rotação existentes em um motor elétrico genérico.

Em veículos híbridos podem ser usados três tipos de motores elétricos:

- Motores De Corrente Contínua Com Escovas;
- Motores Por Indução;
- Motores De Relutância Variável.

2.3.5.1 Motor de Corrente Contínua Com Escovas

Na pesquisa realizada por Cantarino (2014) é apresentado que motores de corrente contínua possuem dois polos magnéticos formados por enrolamentos polar, um rotor composto por um núcleo de enrolamento, uma região de entreferro, um comutador e escovas que estão ligadas à uma fonte de energia.

Mediante o estudo realizado por Vasconcellos (2011), 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.

2.3.5.2 Motores de Indução

Motores de indução são amplamente utilizados nos veículos elétricos por ter baixo custo, alta confiabilidade e baixa manutenção. Apesar disso, os métodos de controles convencionais, como tensão variável e frequência variável não proporcionam o desempenho desejado. A maior razão é devido às não-linearidades do seu modelo dinâmico. Portanto, métodos de controle como o vetorial têm se mostrado bastante eficazes para resolver estas não-linearidades. (DELGADO, 2010)

2.3.5.3 Motores com Relutância Variável

De acordo com o trabalho de Vasconcellos (2011), os motores de relutância variável têm o melhor potencial para serem utilizados em veículos elétricos e híbridos. Esses motores possuem uma construção simples, um controle simples e características de torque-velocidade muito boas. Este tipo de motor possui altas velocidades e 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.

2.3.5.4 Potência do Motor Elétrico

De acordo com o estudo de Vasconcellos (2011), é assumido que a resistência ao rolamento e o arrasto aerodinâmico do veículo são vencidos pelo motor a combustão interna, enquanto as cargas dinâmicas (carga inercial na aceleração) são vencidas pelo motor elétrico. Uma curva característica genérica para motores elétricos é demonstrada pela Figura 9.

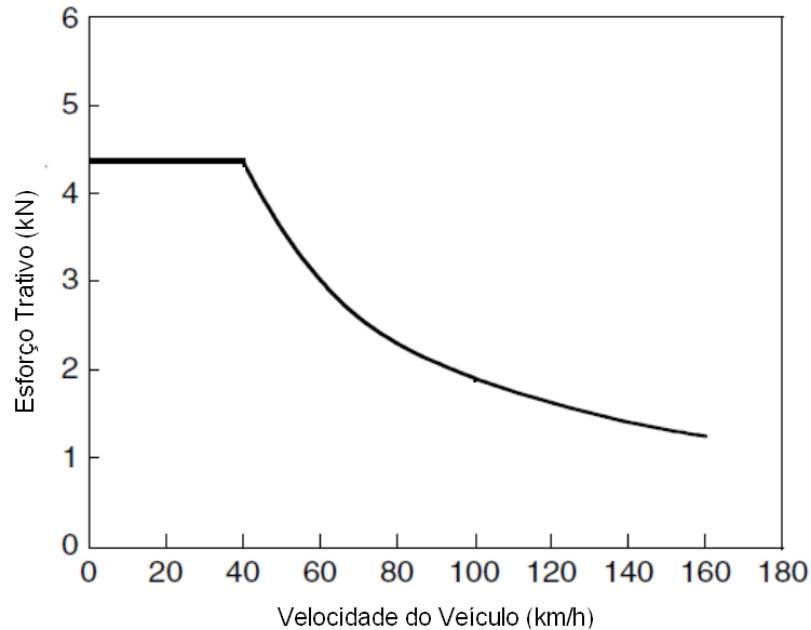


Figura 9: Curva Característica de Um Motor Elétrico Genérico
Fonte: Adaptado Vasconcellos, 2011

Como é possível observar na Figura 9, o motor elétrico possui um esforço trativo constante até a velocidade de 40km/h e depois o esforço decai consideravelmente.

De acordo com a Equação 2 demonstrada por Vasconcellos (2011), é possível realizar uma relação entre variáveis relativas ao veículo e a velocidade executada pelo carro para obter a potência do motor elétrico, usando um tempo de aceleração especificado de zero até a velocidade final. Assim, tem-se a Equação 2 que determina a potência do motor elétrico.

$$P_{elétrico} = \frac{\delta_m \cdot M_v}{2 \cdot t_a} \cdot (V_f^2 + V_b^2) + \frac{2}{3} M_v \cdot g \cdot f_r \cdot V_{f2} + \frac{1}{5} \rho_a \cdot C_D \cdot A_f \cdot V_{f2}^3 \quad (2)$$

Onde:

- M_v é a massa total do veículo (kg);
- δ_m é o fator de massa, considerando a massa equivalente adicionada pelos momentos angulares dos componentes rotativos (adimensional);

- t_a é o tempo esperado de aceleração (s);
- V_f é a velocidade final esperada (m/s);
- V_{f2} é a velocidade até onde o motor elétrico trabalha sem decaimento de esforço trativo (m/s);
- V_b é a velocidade inicial do motor (m/s);
- f_r é a resistência ao rolamento (adimensional);
- ρ_a é a densidade do ar (kg/m³);
- C_D é o coeficiente aerodinâmico (adimensional);
- A_f é a área frontal (m²);
- g é a gravidade (m/s²).

2.3.6 Motor de Combustão Interna

De acordo com Silva *et al* (2015), os motores de combustão interna têm seu funcionamento baseado na queima de combustível no interior do cilindro do motor, utilizando os próprios gases de combustão como fluido de trabalho, que impulsiona os pistões. Estes motores são baseados no princípio da expansão dos gases quando aquecidos. Com o controle da expansão dos gases é possível obter pressão que é utilizada para movimentar os pistões, obtendo dessa maneira a transformação da energia calorífica retirada do combustível em energia mecânica no órgão motor da máquina.

Em geral, os veículos elétricos híbridos têm a versatilidade de possuir o motor de combustão interna composto pelo ciclo termodinâmico do tipo Otto ou do tipo Atkinson.

2.3.6.1 Motor de Combustão Interna Ciclo Atkinson

Conforme com um estudo realizado por Pereira (2017), o ciclo Atkinson é um ciclo com poucas diferenças em relação ao ciclo Otto, onde há uma relação de expansão maior do que a de compressão. A alta relação de expansão permite que seja obtido mais trabalho, o que faz com que esse ciclo tenha uma eficiência maior que a do ciclo Otto.

Khattak (2018) afirma que no ciclo Atkinson há uma diminuição do curso de compressão do motor e um aumento do curso de potência. Isso significou alcançar mais

eficiência. Um diagrama de Pressão *versus* Volume do ciclo ideal de Atkinson é mostrado na Figura 10 para ilustrar de maneira visual este ciclo termodinâmico.

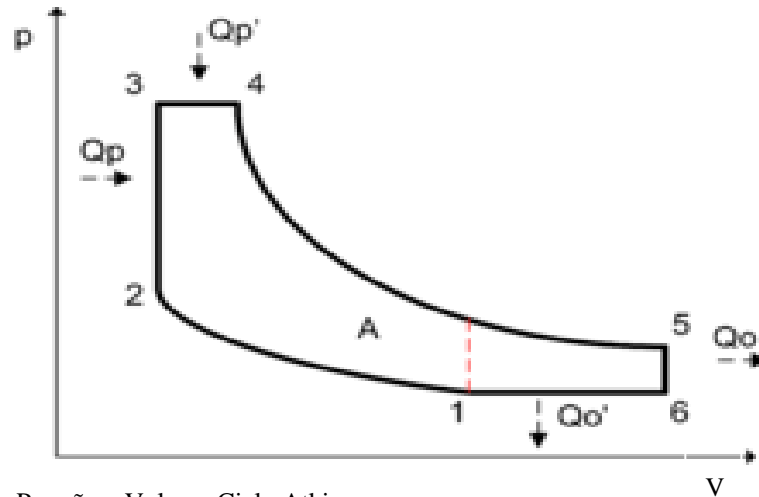


Figura 10: Diagrama Pressão x Volume Ciclo Atkinson
Fonte: Khattak, 2018

Através da Figura 10 tem-se o funcionamento do ciclo termodinâmico Atkinson. Para compreender melhor cada variação do diagrama de Pressão *versus* Volume, pode-se definir as etapas da seguinte maneira.

Nos pontos (1)-(2) ocorre uma compressão adiabática isentrópica ou reversível;

Nos pontos (2)-(3) acontece o aquecimento isocórico dos fluidos do sistema;

Nos pontos (3)-(4) é o momento onde ocorre o aquecimento isobárico;

Nos pontos (4)-(5) acontece uma expansão isentrópica;

Nos pontos (5)-(6) ocorre um resfriamento isocórico;

E por fim, nos pontos (6)-(1) tem-se um resfriamento isobárico e escape do fluido do sistema para o exterior.

E ainda de acordo com Khattak (2018), o curso de compressão tem menos trabalho a fazer para comprimir a mistura e em seguida a faísca incendeia a mistura e o pistão desce até o ponto inferior máximo, o que significa que é utilizada toda a mistura de combustível e ar para produzir energia e obter mais trabalho como saída.

2.3.6.2 Motor de Combustão Interna Ciclo Otto

O estudo apresentado por Vasconcelos (2015) define o ciclo Otto como um ciclo termodinâmico que idealiza o funcionamento de motores à combustão interna de ignição por centelha. O funcionamento é dado pelo percurso do pistão que varia sua posição entre o ponto morto superior (PMS) e o ponto morto inferior (PMI) durante seu funcionamento.

Brunetti (2012) apresenta que os principais aspectos de um diagrama pressão *versus* volume real de um motor movido pelo ciclo termodinâmico do tipo ciclo Otto, o que é representado na Figura 11.

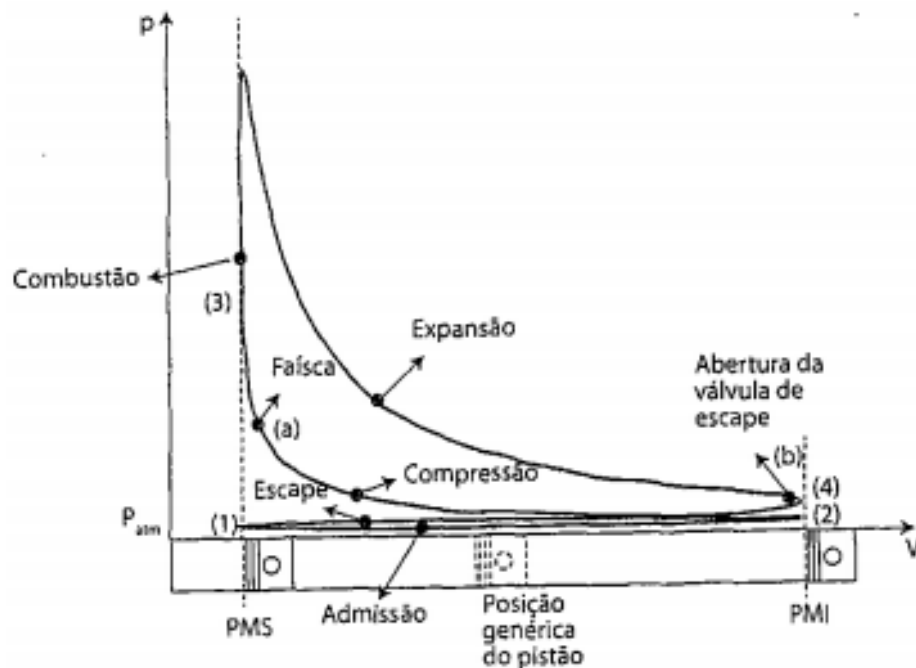


Figura 11: Diagrama Pressão x Volume do Ciclo Otto
Fonte: Brunetti, 2012

A Figura 11 apresenta em seu eixo dos volumes uma representação do cilindro com o pistão nas posições de PMS e PMI, e também há uma posição genérica intermediária do curso, local onde o pistão encontra-se em movimento. A seguir é descrito o significado de cada trecho do ciclo do diagrama.

Através da descrição de Brunetti (2012), sabe-se que o primeiro tempo ocorre entre (1)-(2). Neste momento ocorre a admissão, onde o pistão desloca-se do PMS ao PMI com a válvula de admissão aberta, de tal forma que o cilindro está em contato com o ambiente. A pressão em seu interior mantém-se um pouco menor que a pressão atmosférica, dependendo da perda de carga no sistema de admissão, causada pelo escoamento da mistura combustível-ar (ou apenas ar no caso de injeção direta de combustível) succionada pelo movimento do pistão.

O segundo tempo do motor acontece entre (2)-(3). Neste momento ocorre a compressão: fecha-se a válvula de admissão e a mistura confinada no cilindro é comprimida pelo pistão que se desloca do PMI ao PMS. Nota-se que, antes de se atingir o PMS, há a ignição e a pressão tem um aumento mais rápido do que aquele que aconteceria apenas devido à redução do volume provocada pelo pistão.

No momento entre (3)-(4) ocorre a expansão: ocorre a ignição no ponto (a), a pressão aumenta rapidamente em virtude da combustão da mistura. O pistão, empurrado pela força da pressão dos gases, desloca-se do PMS ao PMI e com esse movimento acontece um aumento de volume com conseqüente redução da pressão. Esse é o tempo do motor que produz um trabalho positivo — tempo útil.

E por fim, entre os pontos (4)-(1) tem-se o escape: no ponto (b), um pouco antes do PMI, abre-se a válvula de escape e os gases, por conta da alta pressão, escapam rapidamente até alcançar uma pressão próxima da atmosférica. O pistão desloca-se do PMI para o PMS expelindo os gases queimados contidos no cilindro, e a pressão mantém-se ligeiramente maior que a atmosférica. Alcançado o PMS reinicia-se o ciclo com o reinício da admissão.

2.3.6.3 Potência do Motor de Combustão Interna

De acordo com Vasconcellos (2011), a potência necessária para este caso pode ser calculada através da Equação 3.

$$P_{comb} = \frac{V}{1000 \cdot \eta_{t,e}} \cdot (M_v \cdot g \cdot f_r + 0,5 \cdot \rho_a \cdot C_D \cdot A_f \cdot V^2 + M_v \cdot g \cdot \text{sen}(\alpha)) \quad (3)$$

Sendo:

- P_{comb} é a potência do motor à combustão (W);
- $\eta_{t,e}$ é a eficiência de transmissão do motor até as rodas movidas (%);
- M_v é a massa total do veículo (kg);
- V é a velocidade desenvolvida (m/s);
- f_r é a resistência ao rolamento (adimensional);
- ρ_a é a densidade do ar (kg/m³);
- C_D é o coeficiente aerodinâmico (adimensional);
- A_f é a área frontal (m²);

- g é a gravidade (m/s²);
- α é a inclinação da via (rad).

2.3.7 Fator de Híbridização

No estudo realizado por Vaz (2016) é explicitado que o fator de híbridização pode ser definido, em linhas gerais, como uma relação entre as proporções do motor elétrico e o motor à combustão interna, onde quanto maior o motor elétrico, alternador e capacidade bateria, menor o motor à combustão.

A Equação 4 apresenta o fator de híbridização, coeficiente que foi proposto no trabalho de Paykani e Shervani-Tabar (2011), onde há a consideração de uma relação entre a potência do motor elétrico e a potência total do veículo elétrico híbrido de configuração em paralelo.

$$F_{Hib} = \frac{P_{elétrico}}{P_{elétrico} + P_{comb}} \quad (4)$$

Queiroz (2006) atesta que a principal característica que define um nível de híbridização é a capacidade de armazenamento da bateria. Isso significa que o custo de instalação aumenta com o aumento da capacidade na bateria. E paralelamente, a capacidade de economia de combustível e emissão de gases aumenta proporcionalmente com a elevação do nível de híbridização.

2.3.8 Bateria

Vasconcellos (2011), cita que 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.

Côrrea (2013) afirma em seu estudo que baterias de chumbo-ácido de grande porte são as ideais para utilização em veículos elétricos híbridos, pois apesar de serem mais caras do que

as baterias de pequeno e médio porte de chumbo-ácido, devido à exigência de maior robustez para suportar os severos ciclos de operação onde são operadas.

Para ilustrar de maneira mais detalhada as informações de uma bateria de chumbo-ácido de grande porte, é utilizada a Tabela 2 que especifica alguns indicadores da bateria.

Tabela 2: Parâmetros Nominais de Uma Bateria Chumbo Ácido

Parâmetro	Valor Médio Usual
Quantidade de Energia	20 – 35 W. h. kg ⁻¹
Densidade de Energia	0,054 – 0,095 W. h. m ⁻³
Eficiência	60%
Auto-Descarga	2% ao dia (sem uso)
Tempo de Recarga Completa	8 horas
Resistência Interna	0,022 Ω por célula de 1 A.h

Fonte: Adaptado de Côrrea apud Revredo (2013)

A Tabela 2 ilustra parâmetros gerais de uma bateria de chumbo-ácido considerada de grande porte que são relevantes para veículos elétricos híbridos.

Ainda de acordo com Côrrea (2013), o circuito elétrico simplificado da bateria pode ser apresentado pela Figura 12, onde E representa a tensão de circuito aberto, R representa a resistência interna e V a tensão entre os terminais da bateria.

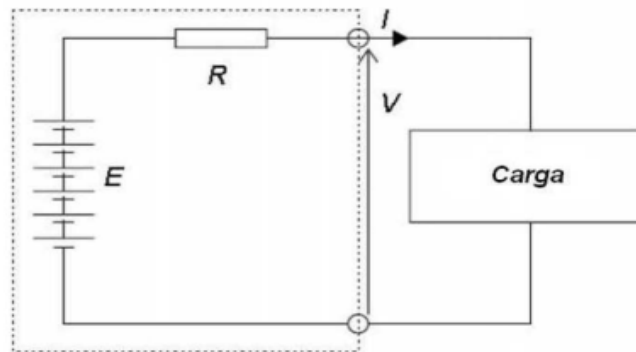


Figura 12: Circuito Elétrico Simplificado Da Bateria

Fonte: Côrrea, 2013

Deve ser salientado que no modelo apresentado na Figura 12 é apresentada uma simplificação da estrutura real de uma bateria de um veículo elétrico híbrido, pois em uma bateria real existem diversos núcleos e sistemas elétricos complexos interligados.

2.3.8.1 Lei de Peukert

Através do material de estudo de Côrrea (2013), deve ser levado como base um tempo de descarga e uma capacidade de carga de referência para os quais uma bateria foi especificada, tornando-se possível calcular o tempo de descarga real da bateria em função da corrente drenada

pela carga (solicitação de potência a bateria) através do cálculo de uma capacidade de carga de referência, que é constante, denominada Capacidade de Peukert e pode ser definida pela Equação 5.

$$C_p = (I_{bat})^k \cdot t \quad (5)$$

Sendo:

- C_p é a Capacidade de Peukert (A.h);
- I_{bat} é a corrente solicitada à bateria (A);
- k é uma constante denominada Coeficiente de Peukert (adimensional);
- t é o tempo de descarga associado à corrente (horas).

Dessa forma, uma vez conhecida a Capacidade de Peukert, que pode ser calculada a partir da capacidade e do tempo de descarga para os quais a bateria foi específica/fabricada, pode-se determinar o tempo de descarga associado a uma solicitação de corrente qualquer.

“Em geral, a constante de Peukert para as baterias de chumbo-ácido varia entre 1,1 e 1,3 e pode ser determinada através de duas descargas completas da bateria à mesma temperatura de referência.” (Noce, 2009, p 35)

2.3.8.2 Potência da Bateria

Segundo Côrrea (2013), durante a utilização do veículo é exigida uma certa potência do motor elétrico, que por sua vez utiliza da carga da bateria para ser suprido energeticamente. Em geral, a potência pode ser dada pela Equação 6.

$$P_{bat} = V_{bat} \cdot I_{bat} \quad (6)$$

Em que:

- P_{bat} é a potência da bateria (kW);
- V_{bat} é a voltagem da bateria (kV);
- I_{bat} é a corrente (A).

E de acordo com Vasconcellos (2011), a potência que a bateria deve fornecer ao motor elétrico deve ser maior que a potência demandada pelo motor elétrico, obtendo a Equação 7.

$$P_{MaxBateria} > \frac{P_{MáxMotor}}{\eta_{motor}} \quad (7)$$

Sendo:

- $P_{MaxBateria}$ é a potência máxima da bateria (kW);
- $P_{MáxMotor}$ é a potência do motor elétrico (kW);
- η_{motor} é o rendimento do motor elétrico (%).

A relação de gasto de Ampéres por hora durante o tempo especificado pela Equação 8.

$$I_{bat} = \frac{Cap_{nom}}{t} \quad (8)$$

Em que:

- I_{bat} é a corrente na bateria (A);
- Cap_{nom} é a capacidade nominal da bateria (A.h);
- t é o tempo total para descarga da bateria (h).

As equações relativas à bateria são consideradas como uma simplificação para o sistema de baterias de um veículo elétrico híbrido, devido à complexidade dos sistemas que as integram, assim como a escassez de informações específicas sobre os seus componentes.

3 METODOLOGIA

Este capítulo tem como finalidade demonstrar as características do desenvolvimento da pesquisa sobre o dimensionamento do sistema motor de um veículo elétrico híbrido de configuração em paralelo que é dirigido em um ciclo de condução urbana. São apresentados o tipo de pesquisas e sua natureza, as variáveis e indicadores utilizados no processo, o instrumento de coleta e a tabulação dos dados.

3.1 Tipos de Pesquisa

Segundo o dicionário Michaelis (2018), pesquisa é "uma série de atividades dedicadas a novas descobertas, abrangendo todas as áreas de conhecimento". E de acordo com Kothari (2004), a pesquisa pode ser definida como uma busca científica e sistemática de informações relevantes sobre um tópico específico. Assim, a pesquisa compreende definir problemas, formular hipóteses, testá-lo com experiências e coletar os resultados, avaliar os dados obtidos e sugerir soluções para o caso. Pode ser interpretada como uma contribuição para a compreensão existente a fim de expandir e torná-la mais clara.

Segundo Prodanov e Freitas (2013, p. 43), define-se especificamente a pesquisa científica como “a realização de um estudo planejado, sendo o método de abordagem do problema o que caracteriza o aspecto científico da investigação” e a pesquisa tem por finalidade “descobrir respostas para questões, mediante a aplicação do método científico”. Pesquisas podem estar classificadas de diferentes maneiras dependendo do sistema adotado. De acordo com Kothari (2004), outros tipos de pesquisa permeiam a pesquisa exploratória e formalizada. A primeira consiste em desenvolver hipóteses ao invés de testá-las enquanto a posterior tem uma hipótese específica a ser testada e uma estrutura substancial. Podem ser pesquisas de campo, de laboratório ou de simulação, dependendo do ambiente em que ele deve ser realizado.

Considerando o significado do verbete ‘dimensionar’ no Dicionário Michaelis (2018), tem-se a seguinte definição: “dimensionar é calcular as dimensões de; preestabelecer determinados valores adequadamente; conferir dimensões”, pode-se estabelecer que este estudo trata-se de um dimensionamento, pois seu objetivo é a obtenção de hipóteses de potência para um veículo elétrico híbrido e todos os possíveis parâmetros determináveis para o sistema motor. Em relação aos procedimentos esta pesquisa é um estudo de caso pois se refere ao estudo minucioso de um sistema, que mesmo genérico ainda compreende novas descobertas de

aspectos não previstos inicialmente. Além disso, busca examinar um fenômeno tecnológico contemporâneo dentro de seu contexto. E por fim, em concordância com Prodanov e Freitas (2013), o estudo consiste numa pesquisa bibliográfica, uma vez que se baseia em livros, teses, dissertações, artigos e internet, com o objetivo de enriquecimento teórico para a realização do estudo proposto.

3.2 Métodos e Materiais

Inicialmente para este trabalho, realiza-se uma revisão da literatura com a finalidade de conceituar veículos elétricos híbridos, bem como seus parâmetros e os fatores que devem ser levados em consideração para seu pleno funcionamento. A partir disso, buscou-se desenvolver o dimensionamento para encontrar a melhor configuração que se encaixaria em condições predeterminadas, com base em estudos e métodos recentes para o cálculo desta tecnologia. Conclui-se o trabalho com a obtenção dos principais parâmetros de funcionamento e quais as vantagens inerentes ao modelo, levando em consideração a principal vantagem de redução do consumo e emissão de gases na atmosfera.

As etapas necessárias para o desenvolvimento deste estudo tais como a revisão bibliográfica, definição do modelo de veículo a ser estudado, equações utilizadas e dados considerados são apresentados nessa primeira parte do trabalho. Realizar os cálculos, assim como a obtenção dos dados e a comparação de todas as variáveis obtidas compõe as últimas etapas do estudo. A Figura 13 demonstra o fluxo de pesquisa realizado durante o trabalho.

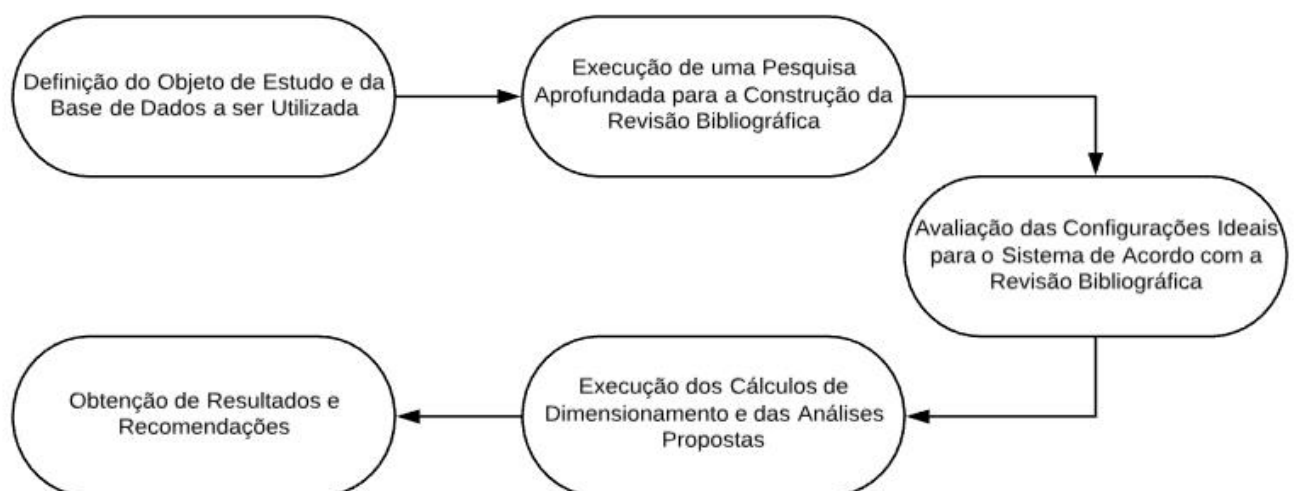


Figura 13: Fluxograma de Método do Trabalho
Fonte: Pesquisa Direta, 2018

A Figura 13 demonstra as etapas do dimensionamento, onde em um momento inicial foi definido o objeto de estudo e a base de dados utilizada para fundamentar o dimensionamento, em seguida foi realizada uma pesquisa para o desenvolvimento da revisão bibliográfica que fundamenta o trabalho de quais equações são necessárias para a obtenção de resultados concisos. Adiante é avaliado de acordo com a bibliografia as configurações ideais para os sistemas do veículo, à fim de compor uma montagem econômica sem perder a potência. Por fim, tem-se a análise dos dados obtidos após a execução das etapas anteriores para a obtenção dos resultados do dimensionamento.

3.3 Variáveis E Indicadores

De acordo com Prodanov e Freitas (2013, p. 92), "variável pode ser considerada uma classificação ou medida; uma quantidade que varia; um conceito operacional que contém ou apresenta valores; aspecto, propriedade ou fator discernível em um objeto de estudo e passível de mensuração". Refere-se às características do fenômeno a ser estudado e existe em todos os tipos de pesquisa. No entanto, eles variam no modo como são tratados durante o processo de investigação.

O foco do estudo é o entendimento aprofundado do sistema motor de um veículo elétrico híbrido, logo as variáveis utilizadas no dimensionamento podem ser separadas de acordo com a sua aplicabilidade, onde pode-se identificar os indicadores relativos aos parâmetros globais, indicadores relativos à potência do motor de combustão interna, indicadores relativos à potência do motor elétrico e, por fim, indicadores relacionados aos cálculos bateria.

Para os parâmetros globais do dimensionamento, há a inclusão dos dados relativos ao ciclo de condução, variáveis predeterminadas relacionadas às propriedades do veículo e valores relativos às considerações iniciais para início do dimensionamento do veículo elétrico híbrido. Todos esses indicadores encontram-se dispostos na Tabela 3.

Tabela 3: Variáveis do Ciclo de Condução

VARIÁVEL	INDICADORES
Parâmetros Globais	Velocidade Máxima (km/h)
	Velocidade Média (km/h)
	Aceleração Máxima (m/s ²)
	Distância Percorrida (km)
	Tempo em Marcha Lenta/Parado (%)
	Capacidade de Passageiros (unidade)
	Volume do Bagageiro (litros)
	Dimensões do Veículo (mm)
	Peso (kg)
	Área Frontal (m ²)
	Coefficiente de Arrasto (adimensional)
	Estado de Carga (%)
	Preço (R\$)

Fonte: Pesquisa Direta, 2018.

A Tabela 3 apresenta o conjunto de indicadores referentes aos parâmetros gerais e todas as variáveis apresentadas são utilizadas durante a execução do dimensionamento.

Para o motor elétrico estão dispostos todos os indicadores utilizados na Tabela 4.

Tabela 4: Variáveis do Motor Elétrico

VARIÁVEL	INDICADORES
Motor Elétrico	Esforço Trativo (kN)
	Velocidade (km/h)
	Massa (kg)
	Fator de Massa (adimensional)
	Tempo de Aceleração (s)
	Velocidade (km/h)
	Rendimento (%)
	Força de Resistência de Rolamento (adimensional)
	Densidade do ar (kg/m ³)
	Área (m ²)
	Coefficiente aerodinâmico (adimensional)
	Aceleração da Gravidade (m/s ²)
	Potência (kW)

Fonte: Pesquisa Direta, 2018.

A Tabela 4 apresenta o núcleo do motor elétrico e as variáveis utilizadas em suas considerações e equacionamentos no estudo.

Para o motor de combustão interna tem-se as variáveis descritas na Tabela 5.

Tabela 5: Variáveis do Motor de Combustão Interna

VARIÁVEL	INDICADORES
Motor de Combustão Interna	Eficiência de Transmissão (%)
	Massa (kg)
	Velocidade (km/h)
	Ângulo de Inclinação da Via (°)
	Velocidade (km/h)
	Força de Resistência de Rolamento (adimensional)
	Densidade do ar (kg/m ³)
	Área (m ²)
	Coefficiente aerodinâmico (adimensional)
	Aceleração da Gravidade (m/s ²)
	Potência (kW)

Fonte: Pesquisa Direta, 2018.

A Tabela 5 apresenta o núcleo do motor de combustão interna e as variáveis utilizadas em suas considerações e equacionamentos propostos no estudo.

Para a bateria tem-se as variáveis descritas na Tabela 6.

Tabela 6: Variáveis da Bateria

VARIÁVEL	INDICADORES
Bateria	Fator de Hibridização (adimensional)
	Tempo de Descarga de Bateria (horas)
	Capacidade de Carga Peukert (Amper-hora)
	Corrente (Ampère)
	Constante de bateria (adimensional)
	Voltagem (kV)
	Eficiência (%)
	Potência (kW)

Fonte: Pesquisa Direta, 2018.

A Tabela 6 apresenta o núcleo da bateria e as variáveis utilizadas em suas considerações e equacionamentos no estudo.

3.4 Coleta e Tabulação de Dados

Nesta fase ocorre a coleta dos dados das variantes do tema abordado para obter os fundamentos necessários que apoiem a pesquisa através da revisão da literatura, observações e cálculos.

Como explicado, esta pesquisa tem caráter bibliográfico com estudo explorativo teórico, quantitativo e explicativo, logo os dados necessários para os estudos serão obtidos através de pesquisa bibliográfica, utilizando livros, teses e tabelas relacionadas ao consumo energético de veículos híbridos. Dessa forma, reunindo dados teóricos e parâmetros genéricos postulados de acordo com as referências e também realizando cálculos necessários com o propósito de dar base para a análise proposta.

3.5 Considerações Finais

Neste capítulo foi apresentada a metodologia aplicada para o desenvolvimento do presente estudo. Foram definidos quais os tipos de pesquisa serão aplicados durante o desenvolvimento do trabalho, os métodos e técnicas utilizadas para elaboração do estudo e os materiais adotados durante o processo. Foi também apresentada a forma como os dados foram selecionados e como os resultados foram tabulados para uma compreensão clara do estudo. O próximo capítulo consiste nos resultados obtidos após os cálculos para formulação do dimensionamento de veículo elétrico híbrido.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo é apresentado o dimensionamento de um veículo híbrido elétrico de configuração em paralelo para o uso urbano em condição de tráfego pesado. Os parâmetros principais a serem dimensionados no estudo são os componentes de transmissão como potência do motor a combustão, potência do motor elétrico e capacidade energética da bateria.

O dimensionamento irá considerar um veículo elétrico híbrido com alocação para 5 passageiros de um modelo genérico 'sedã', caracterizado por possuir quatro portas e alocação para cinco passageiros, que proporciona um alto grau de conforto por seu espaço interno maior tanto para o porta-malas quanto para quem se acomodar dentro do veículo.

É priorizado no dimensionamento o melhor desempenho possível, além da economia de combustível de origem fóssil e emissão de poluentes, características imprescindíveis para garantir que o carro seja uma boa opção para o consumidor.

4.1 Parâmetros Globais

São considerados alguns parâmetros predeterminados de um veículo genérico neste dimensionamento de acordo com o estudo bibliográfico realizado que traz embasamento necessário para algumas tomadas de decisões.

O primeiro parâmetro a ser definido é o modelo do veículo a ser dimensionado. Para este estudo é considerado um sedã médio com capacidade para 5 ocupantes e bagageiro com capacidade para 400 litros. Este modelo fornece conforto aos ocupantes e possui um tamanho intermediário na categoria na qual se enquadra. É um tipo de veículo ideal para famílias, mas também é interessante para o uso executivo, o que torna o modelo versátil e vantajoso para o dimensionamento.

O peso é postulado como 1700 kg, comprimento de 4800 mm, largura de 1800 mm e altura de 1500 mm. A distância entre eixos é de 2850 mm. A área frontal é de 2,33 m² e o seu coeficiente de arrasto é de 0,28.

A transmissão do veículo terá arquitetura em paralelo com o motor elétrico funcionando como acoplador de torque e de velocidade, como explicitado na revisão bibliográfica. A caixa de velocidades do veículo será considerada como automática. O preço da gasolina no estudo será considerado como R\$4,75.

4.1.1 Ciclo de Condução

Para o dimensionamento serão adotados os valores de Ciclo de Condução da América do Norte FTP-75 em perímetro urbano, onde a velocidade máxima é de 90 km/h, a velocidade média é de 35 km/h e a aceleração média no ciclo urbano é de 1,60 m/s².

A velocidade máxima do veículo será adotada como 110km/h, pois apesar de veículos não atingirem essa velocidade em perímetro urbano, é importante oferecer uma opção compatível com os demais veículos comercializados no mercado. Será assumido que o motor elétrico será o responsável por conduzir o veículo até a velocidade de 40 km/h e que após essa velocidade o motor de combustão interna auxiliará o elétrico, devido ao fato de que o motor elétrico tem a característica de possuir alto torque em baixas rotações, o que garante que ele seja a força motriz do veículo em baixas velocidades.

Para a situação de deslocamento será considerado o perfil de condução urbana utilizado na NBR 6601, onde a consideração a ser feita é a de que um indivíduo percorre no início do dia com seu veículo uma distância de 17,8 km nas fases descritas pela NBR 6601 apresentadas na seção 2.1 da revisão bibliográfica, em um período total de 2400 segundos. E ao final do dia o mesmo ciclo deverá se repetir seguindo os mesmos parâmetros. A ideia é simular o trajeto de deslocamento para o trabalho e do trabalho para a casa em uma cidade onde aconteçam paradas devido a possíveis fatores de trânsito e deslocamentos em diferentes velocidades.

4.2 Dimensionamento dos Motores

A presente sessão visa o cálculo das potências necessárias para os motores do sistema elétrico híbrido do dimensionamento em estudo. A seguir são discutidos diversos parâmetros estabelecidos para o trabalho com o objetivo de analisar situações próximas da realidade de utilização do veículo em um ciclo de condução urbano.

4.2.1 Motor Elétrico

Para o dimensionamento, o motor elétrico a ser utilizado deverá ter baixo custo e boas características relativas à potência e funcionamento, como confiabilidade e resfriamento, além de conseguir operar com altas rotações quando atingida a velocidade máxima.

Com base nos critérios citados e de acordo com a revisão bibliográfica, o motor de relutância variável é a melhor opção de motor elétrico para o veículo, pois ele possui excelente desempenho de aceleração e opera em altas velocidades de rotação.

4.2.1.1 Cálculo da Potência do Motor Elétrico

Os principais fatores a serem levados em consideração no motor elétrico são os relativos à potência e em qual velocidade ele atuará sem o auxílio do motor de combustão interna.

Interpretando a curva de esforço trativo apresentada na Figura 8, é comprovado que o esforço trativo é constante em baixas velocidades e que até 40 km/h o motor elétrico possui força trativa constante, o que garante que haja força suficiente para o motor tracionar o veículo. Depois deste ponto onde a velocidade aumenta, a força trativa reduz significativamente.

As características apresentadas na Tabela 7 foram adotadas para o dimensionamento do motor elétrico.

Tabela 7: Variáveis para o Motor Elétrico

Massa do Veículo (kg)	1700
Fator de Massa (adimensional)	1,05
Tempo de Aceleração (s)	12
Velocidade Final (m/s)	36,56
Velocidade Final do Motor sem decaimento de esforço Trativo (m/s)	11,11
Velocidade Inicial (m/s)	0
Resistência do Rolamento (adimensional)	0,01
Densidade do ar (kg/m ³)	1,205
Coefficiente Aerodinâmico (adimensional)	0,28
Área Frotal (m ²)	2,33
Gravidade (m/s ²)	9,81
Rendimento (%)	85

Fonte: Pesquisa Direta, 2018.

É possível desenvolver a Equação 2 com as características adotadas para encontrar a potência do motor elétrico apresentadas a partir da Tabela 7. Para realizar os cálculos as incógnitas serão substituídas pelos valores postulados.

$$P_{elétrico} = \frac{1,05 \cdot 1700}{2 \cdot 12} \cdot (30,56^2 + 0^2) + \frac{2}{3} \cdot 1700 \cdot 9,81 \cdot 0,01 \cdot 11,11 + \frac{1}{5} \cdot 1,205 \cdot 0,35 \cdot 2,5 \cdot 11,11^3$$

$$P_{elétrico} = 70,89 \text{ kW}$$

Logo, tem-se que a potência do motor elétrico de 70,89 kW supre a demanda para a configuração em paralelo e os requisitos determinados nas condições dos parâmetros adotados. Será considerado o arredondamento para 71 kW ou de 99,13 cv.

4.2.2 Motor a Combustão Interna

Para este dimensionamento foram considerados dois possíveis tipos ciclos termodinâmicos de motores a combustão interna, o ciclo Otto e o ciclo Atkinson.

Para realizar uma análise comparativa foram selecionados dois veículos elétricos híbrido de duas fabricantes distintas, o veículo *Ford Fusion Hybrid* com um motor de combustão interna movido pelo Ciclo Otto e o *Toyota Prius* com o motor de combustão interna movido pelo Ciclo Atkinson. Em uma análise generalista frente aos dois veículos similares com as mesmas potências desenvolvidas, tem-se a comparação realizada pela Tabela 8, onde são apresentados os consumos de combustível para os modelos:

Tabela 8: Consumo de Combustível de Carros Elétricos Híbridos

Toyota Prius 2018		Ford Fusion Hybrid 2018	
Consumo Urbano (km/l)	Consumo Rodoviário (km/l)	Consumo Urbano (km/l)	Consumo Rodoviário (km/l)
18,9	17,0	16,8	15,1

Fonte: Adaptado de Carros na WEB, 2018.

Apesar do consumo ser o resultado de diversas variáveis do sistema do veículo, é possível observar na Tabela 8 que o consumo no veículo elétrico híbrido movido pelo ciclo Atkinson é inferior ao do veículo com o motor de combustão interna movido pelo Ciclo Otto. Por escassez de informações mais aprofundadas sobre a eficiência de cada ciclo em veículos elétricos híbrido, será considerado à título de simplificação para o dimensionamento o ciclo Atkinson para o motor de combustão interna.

Com isso, será considerado para o dimensionamento que o consumo do veículo objeto de estudo terá o consumo urbano de 17,5 km/l. Este tipo de motor possui diversas vantagens frente a um motor de combustão ciclo Otto, como tamanho reduzido e maior eficiência. E apesar de não ser um ciclo muito utilizado atualmente, ele se mostra eficiente para o uso em veículos híbridos.

4.2.2.1 Cálculo da Potência do Motor de Combustão Interna

O motor a combustão deve suprir a demanda de energia a velocidades constantes tanto em via inclinada como em via plana sem o auxílio da potência fornecida pela bateria. E deve ser capaz de fornecer mais potência do que a potência média demandada em um percurso de parada e aceleração.

Realizando a utilização da Equação 3, pode-se definir as seguintes características para o motor de combustão interna deste dimensionamento dispostos na Tabela 9.

Tabela 9: Dados do Motor de Combustão Interna

Massa do Veículo (kg)	1700
Rendimento do Motor (%)	85
Área Frontal (m ²)	2,33
Gravidade (m/s ²)	9,81
Coefficiente Aerodinâmico (adimensional)	0,28
Resistência do Rolamento (adimensional)	0,01
Densidade do Ar (kg/m ³)	1,205
Fator de Massa (adimensional)	1,05

Fonte: Pesquisa Direta, 2018

E para aproximar este estudo com uma situação o mais real possível, foi analisado o Relatório de Declividades da cidade de Belo Horizonte, conforme é possível verificar no “ANEXO A” deste trabalho. (BHTrans/Prodabel, 2017, p. 4) São considerados três valores de inclinação: 0% de declividade para a situação de vias planas e as variações de 12% de declividade e 20% de declividade. Quando se tem 100% de declividade significa que se trata de um ângulo de 45° de inclinação, pois esse é o ângulo com maior alcance de altitude e

deslocamento horizontal (projeção) de forma simultânea. Logo, tem-se para a porcentagem de declividade apresentada os seguintes valores de α :

$$\alpha_{via\ plana} = 0^\circ; \alpha_{12\%} = 5,4^\circ; \alpha_{25\%} = 9^\circ$$

A variação de velocidade do veículo será incremental de 10 km/h até atingir a velocidade de 110 km/h e a velocidade de 35 km/h foi incluída por ser a velocidade final onde o motor elétrico trabalha sem o auxílio do motor à combustão. Os dados para o motor foram considerados em todas as velocidades à título de conhecimento da potência necessária e foi desconsiderado o fato de que ele não irá trabalhar em velocidades inferiores a de 35 km/h. E à fim de gerar um gráfico comparativo de potências do motor de combustão interna para todas as inclinações, é apresentada a Tabela 10, onde através da Equação 3 e dos dados considerados pela Tabela 9, são obtidas as potências para cada situação.

Tabela 10: Variação de Potências e Velocidades no Motor de Combustão Interna

VELOCIDADE (km/h)	VELOCIDADE (m/s)	POTÊNCIA (kW) Via Plana	POTÊNCIA (kW) Inclinação 5,4°	POTÊNCIA (kW) Inclinação 9°
0	0	0	0	0
10	2,78	0,59	3,87	9,65
20	5,56	1,24	7,77	19,36
30	8,33	2,02	11,76	29,19
35	9,72	2,48	13,79	34,18
40	11,11	2,99	15,87	39,22
50	13,89	4,21	20,14	49,49
60	16,67	5,75	24,61	60,09
70	19,44	7,67	29,32	71,06
80	22,22	10,02	34,32	82,48
90	25,00	12,89	39,64	94,40
100	27,78	16,32	45,33	106,89
110	30,56	20,39	51,42	120,01

Fonte: Pesquisa Direta, 2018

Na Tabela 10 tem-se o aumento da potência para maiores velocidades e maiores inclinações. Com a variação de inclinação nas vias, a exigência de potência fornecida pelo motor aumenta consideravelmente, variando de 20,39 na máxima velocidade em uma pista plana para 120,01 na mesma velocidade em uma pista com 9° de inclinação.

De posse dos dados de Tabela 8 para o motor de combustão interna e à fim de ilustrar melhor as variações de potência com a mudança de inclinações nas vias, tem-se a Figura 14 que apresenta os dados de maneira gráfica.

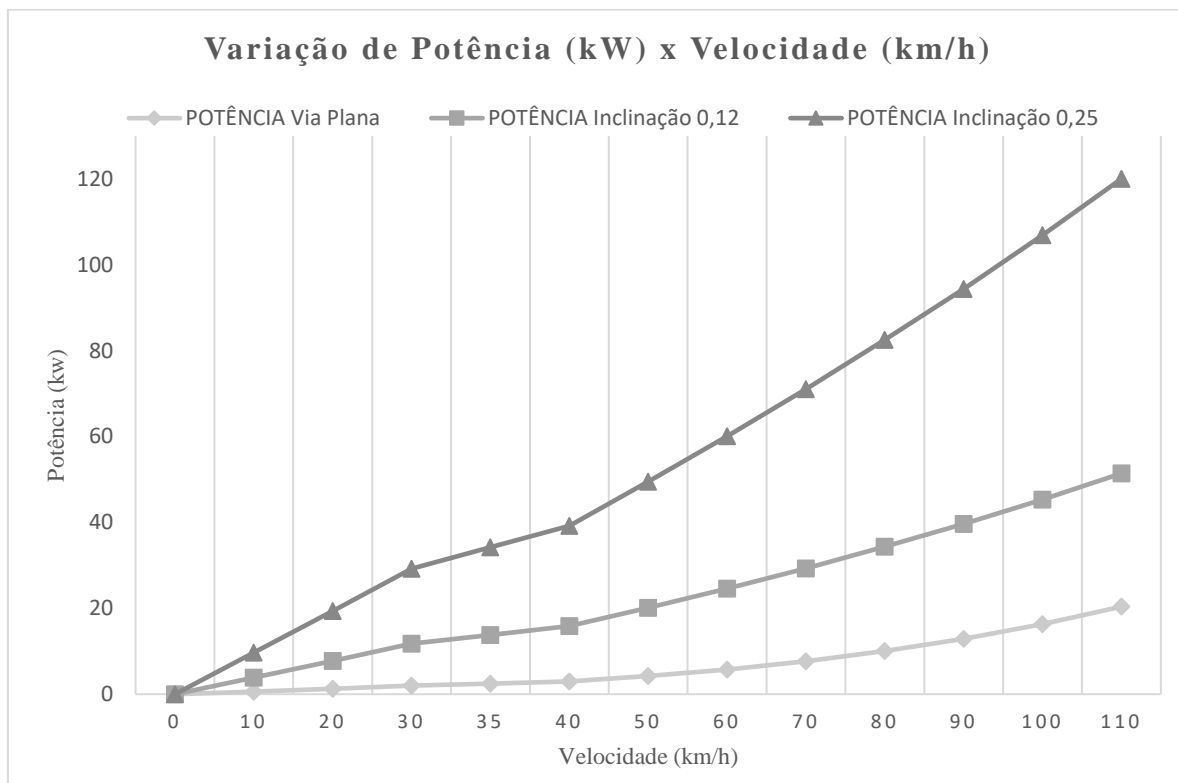


Figura 14: Gráfico de Variação de Potência (kW) *versus* Velocidade (km/h) no Motor De Combustão Interna
Fonte: Pesquisa Direta, 2018.

A Figura 14 apresenta três situações distintas onde é observado que em uma via plana onde o veículo desenvolve a velocidade de máxima proposta no ciclo de condução urbana, é necessária a potência do motor de combustão interna de aproximadamente 20,39 kW. Entretanto, considerando a movimentação do veículo em vias inclinadas, é possível realizar uma análise de que o veículo não desenvolveria a sua velocidade máxima. Através da observação dos dados presentes na Tabela 8, é teoricamente praticável que o veículo consiga se locomover em uma velocidade de 60 km/h em uma via com inclinação de 9°. A potência para essa velocidade é de 60,09 kW.

Portanto, é possível assumir que a potência necessária para o motor de combustão interna é de 60 kW ou 82 cv. E assim, também é postulada a primeira restrição ao veículo, onde em vias com 9° de inclinação sua velocidade máxima é a de 60 km/h.

4.3 Cálculo do Fator de Hibridização

Quanto maior a participação do motor auxiliar no sistema, isto é, maior a capacidade do motor elétrico e sua interface com o motor principal, maior o porte do veículo.

O fator de hibridização é uma relação entre as potências dos motores apresentado pela Equação 4. Substituindo os valores calculados para a potência do motor elétrico e potência do motor de combustão interna, tem-se:

$$F_{Hib} = \frac{71}{71 + 60}$$

$$F_{Hib} = 0,54$$

Logo, no dimensionamento tem-se um veículo com fator de hibridização 0,54, onde o motor elétrico e a bateria possuem uma participação próxima à do motor de combustão interna no tracionamento do veículo.

De acordo com a revisão bibliográfica, quanto maior o fator de hibridização, maior a economia de combustível e menor a emissão de gases poluentes na atmosfera.

4.4 Dimensionamento da Bateria

Para o dimensionamento foi considerada a revisão bibliográfica onde é apresentado o tipo de bateria mais eficiente para o uso em veículos elétricos híbridos, e por esta razão o modelo selecionado é o de baterias do tipo chumbo-ácido.

Para a bateria tem-se o estado de carga, que segundo Vasconcellos (2011) é um valor demonstrado pelo veículo através de porcentagem disponível de carga no equipamento. Para o dimensionamento será considerado que a recarga da bateria deverá ser iniciada no ponto de SOC=20% (*State of Charge*) de estado de carga.

4.4.1 Cálculo de Capacidade Peukert

No dimensionamento será suposto que a bateria possua capacidade nominal de 45 A.h especificada para um tempo de 10 horas de descarga, caso não haja fornecimento de nenhum tipo de energia para o motor elétrico. Utilizando a Equação 8 pode-se definir que a corrente na bateria é:

$$I_{bat} = \frac{45}{10} = 4,5 A$$

Considerando $k=1,2$, obtem-se a capacidade de Peukert através da substituição dos valores na Equação 5:

$$C_p = (4,5)^{1,2} \cdot 10 = 60,8 A \cdot h$$

A Capacidade de Peukert possibilita conhecer o tempo de descarga da bateria em casos de solicitação constante e ininterrupta de uma corrente I qualquer, isolando o fator tempo na Equação 5 apresentada anteriormente.

4.4.2 Cálculo da Potência da Bateria

Como foi calculada a potência do motor elétrico e o seu rendimento foi estipulado anteriormente, é possível substituir os valores na Equação 7 e obter a potência da bateria.

$$P_{MaxBateria} > \frac{71 kW}{0,85}$$

$$P_{MaxBateria} > 83,40 kW = 84 kW$$

Em seguida, substituindo o valor de potência da bateria na Equação 6, é possível obter a tensão da bateria obtida. É importante salientar que a corrente pode ser variável, mas nesta situação será calculado para a corrente obtida anteriormente. Assim é possível obter:

$$84 kW = V_b \cdot 4,5 A$$

$$V_b = 18,53 kV$$

Logo a tensão da bateria é de 18,53 kV quando uma corrente de 4,5 Amperes é requisitada ao sistema, onde levaria um tempo de 10 horas para que a bateria consuma completamente sua carga sem nenhum fornecimento energético externo em solicitação constante de energia.

4.5 Sistemas Auxiliares

Além dos itens supracitados, o dimensionamento deverá contar com dois sistemas auxiliares que são de grande importância em um veículo elétrico híbrido:

- Sistema start/stop;
- Sistema de freios regenerativos.

O primeiro sistema é uma tecnologia automotiva que analisa o comportamento de direção do motorista e desligar o motor de combustão interna em momentos de parada breve. Para a continuidade da direção é necessária apenas a retirada de pressão sobre o pedal do freio (considerando o carro com uma caixa de velocidades automática, conforme seção 4.2).

E na busca por eficiência, o sistema de freios regenerativos transforma a energia cinética dissipada no momento da frenagem em energia elétrica através da atuação do motor elétrico como um gerador, além do inversor e do conversor. A energia gerada nesse processo é armazenada na bateria do veículo, aumentando sua autonomia.

Ambos os sistemas são de grande relevância para a redução do consumo de combustível e conseqüente redução da emissão de gases nocivos ao meio ambiente.

4.6 Cálculo da Potência Requerida - VSP

O interesse no cálculo da potência requerida é fundamentado na comprovação de que as potências calculadas para cada motor estão de acordo com o que realmente será exigido do veículo durante seu funcionamento.

Aplicando a Equação 1 para cálculo de VSP com as condições pré-determinadas neste dimensionamento, pode-se calcular qual potência será requerida para que o veículo possa desenvolver a velocidade determinada. Nesta análise são desconsiderados os sistemas auxiliares do veículo elétrico híbrido.

Com a utilização da Equação 1 foi gerada a Tabela 11 que apresenta a variação de valores de VSP de acordo com a variação de velocidades e a variação de inclinação de vias.

Tabela 11: Potências Requeridas Com Variação de Inclinação e Velocidade

VELOCIDADE		POTÊNCIA (kW) REQUERIDA - VSP		
(km/h)	(m/s)	POTÊNCIA (kW) Via Plana	POTÊNCIA (kW) Inclinação 5,4°	POTÊNCIA (kW) Inclinação 9°
0	0	0,00	0,00	0,00
10	2,78	8,95	13,31	16,19
20	5,56	17,96	26,68	32,45
30	8,33	27,10	40,18	48,84
35	9,72	31,74	47,00	57,10
40	11,11	36,44	53,88	65,42
50	13,89	46,05	67,85	82,27
60	16,67	55,98	82,14	99,45
70	19,44	66,32	96,84	-
80	22,22	77,11	111,99	-
90	25,00	88,43	127,67	-
100	27,78	100,35	143,95	-
110	30,56	112,93	160,89	-

Fonte: Pesquisa Direta, 2018.

Com os dados da Tabela 11 é possível plotar um gráfico de potência requerida VSP de acordo com a variação de velocidades segundo a Figura 15. Os dados da tabela foram eliminados a partir dos pontos de restrição formulados na seção 4.2.2.1.

A partir da análise dos dados de potência requerida calculada para as velocidades acima de 80 km/h em vias com inclinação de 5,4°, será imposta uma nova restrição para essa inclinação, onde o veículo terá potência suficiente para se locomover apenas até essa velocidade, devido ao fato da potência requerida na velocidade de 90 km/h ser muito próxima à potência total do veículo e valores após esse ponto serem superiores à soma de potências dos motores calculados.

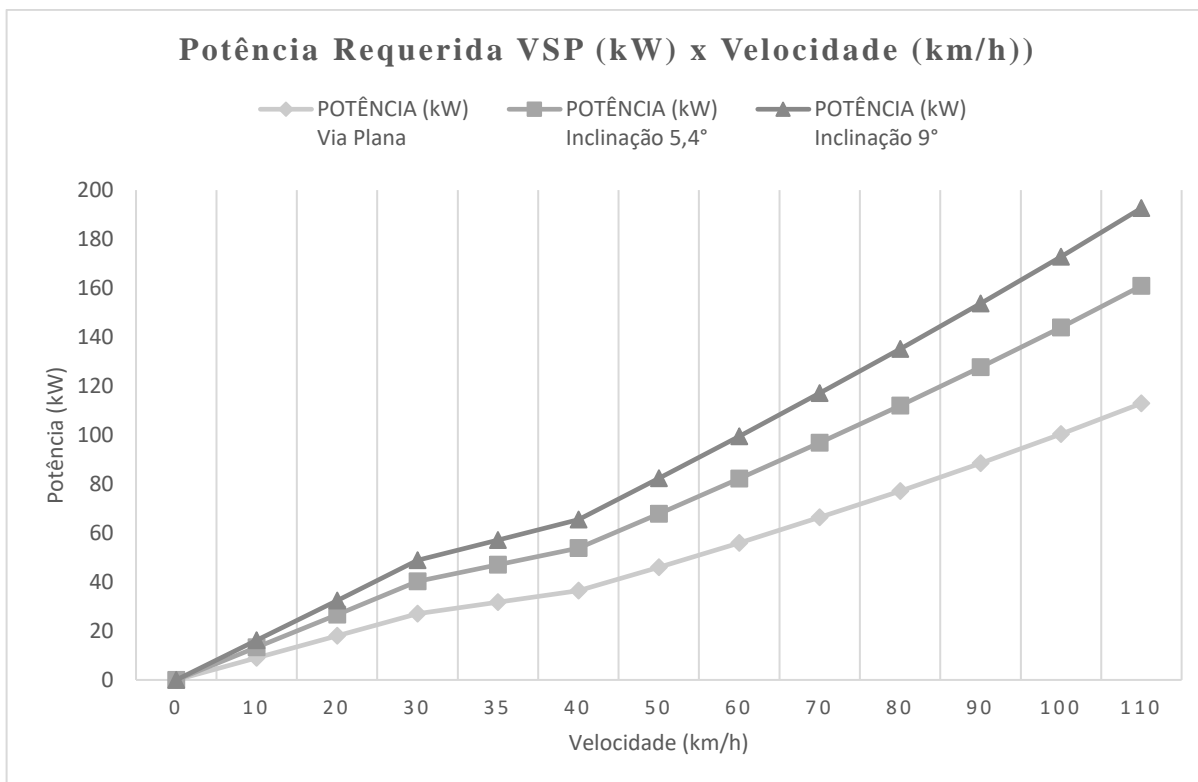


Figura 15: Gráfico de Potência Requerida x Velocidade (km/h)
 Fonte: Pesquisa Direta, 2018

A Figura 15 ilustra as todas as potências requeridas (VSP) calculadas para as variações de inclinação de vias e para as condições determinadas para o dimensionamento do veículo elétrico híbrido.

4.7 Relação Entre o VSP e o Funcionamento dos Motores

Para a comparação entre as potências calculadas para os motores e o VSP, será feita a simplificação de consideração de que após a velocidade de 35 km/h a potência solicitada dos motores será dividida por igual, considerando que cada motor irá contribuir para 50% do trabalho para o tracionamento do veículo. Nesta consideração de integração dos motores, o veículo não desenvolve toda sua potência disponível, mas a consideração tem como objetivo analisar uma situação básica de integração energética de funcionamento de ambos os motores trabalhando em unidade para tracionar o veículo.

Em uma situação real o funcionamento do veículo não acontece dessa forma, mas sim através de comandos eletrônicos que trabalham com a integração de informações do sistema motor e do ciclo de condução do veículo, com o intuito de fornecer o melhor funcionamento entre os motores com melhores rendimentos e autonomias. Entretanto, a simplificação para o

dimensionamento serve para ilustrar um método simples de integração entre os motores elétrico e de combustão interna.

Para a via plana, tem-se a variação de velocidades e as potências requeridas para o tracionamento do veículo ilustradas na Tabela 12. Até a velocidade de 35 km o motor elétrico fornece potência sem o auxílio do motor de combustão interna.

Tabela 12: Relação Entre VSP e o Funcionamento dos Motores em uma Via Plana

Velocidade (km/h)	Via Plana		
	VSP (kW)	Percentual de Funcionamento do Motor Elétrico (%)	Percentual de Funcionamento do Motor Combustão (%)
0	0,00	0	0
10	8,95	12,60	0,00
20	17,96	25,29	0,00
30	27,10	38,17	0,00
35	31,74	44,71	0,00
40	36,44	25,66	27,61
50	46,05	32,43	34,88
60	55,98	39,43	42,41
70	66,32	46,70	50,24
80	77,11	54,30	58,42
90	88,43	62,28	66,99
100	100,35	70,67	76,02
110	112,93	79,52	85,55

Fonte: Pesquisa Direta, 2018

A Tabela 12 apresenta que até a velocidade de 110 km/h, é utilizado 79,52% do motor elétrico e 85,55% do motor de combustão interna para fornecer a potência necessária para o tracionamento do veículo.

Para a via com inclinação de 5,4°, tem-se a variação de velocidade em km/h e a potência requerida para o tracionamento do veículo ilustradas na Tabela 13. Até a velocidade de 35 km/h o motor elétrico fornece potência sem o auxílio do motor de combustão interna.

Tabela 13: Relação Entre VSP e o Funcionamento dos Motores em uma Via com Inclinação de 5,4°

Velocidade	Inclinação 5,4°		
(km/h)	VSP	Percentual de Funcionamento do Motor Elétrico (%)	Percentual de Funcionamento do Motor Combustão (%)
0	0,00	0	0
10	13,31	18,74	0,00
20	26,68	37,57	0,00
30	40,18	56,59	0,00
35	47,00	66,20	0,00
40	53,88	37,95	40,82
50	67,85	47,78	51,40
60	82,14	57,85	62,23
70	96,84	68,19	73,36
80	111,99	78,87	84,84
90	127,67	-	-
100	143,95	-	-
110	160,89	-	-

Fonte: Pesquisa Direta, 2018

A Tabela 13 apresenta que até a velocidade de 80 km, é utilizado 78,87% do motor elétrico e 84,84% do motor de combustão interna para fornecer a potência necessária para o tracionamento do veículo em uma via com inclinação de 5,4°. É importante salientar que na seção 4.6 foi feita a restrição de que com a inclinação citada o veículo apenas poderia se movimentar até a velocidade de 80 km/h, o que faz com que valores posteriores à esta velocidade sejam descartados da tabela.

Para a via com inclinação de 9°, tem-se a variação de velocidade em km/h e a potência requerida para o tracionamento do veículo ilustradas na Tabela 14. Até a velocidade de 35 km o motor elétrico fornece potência sem o auxílio do motor de combustão interna e em seguida ambos motores dividem o fornecimento de potência.

Tabela 14: Relação Entre VSP e o Funcionamento dos Motores em uma Via com Inclinação de 9°

Velocidade (km/h)	Inclinação 9°		
	VSP	Percentual de Funcionamento do Motor Elétrico (%)	Percentual de Funcionamento do Motor Combustão (%)
0	0,00	0	0
10	16,19	22,80	0,00
20	32,45	45,70	0,00
30	48,84	68,78	0,00
35	57,10	80,42	0,00
40	65,42	46,07	49,56
50	82,27	57,94	62,33
60	99,45	70,04	75,34
70	117,03	-	-
80	135,07	-	-
90	153,64	-	-
100	172,80	-	-
110	192,62	-	-

Fonte: Pesquisa Direta, 2018

A Tabela 14 apresenta que, em uma via com inclinação de 9° e até a velocidade de 60 km/h é utilizado 70,4% do motor elétrico e 75,34% do motor de combustão interna para fornecer a potência necessária para o tracionamento do veículo.

Não foram considerados valores posteriores à velocidade de 60 km/h devido ao fato das restrições levantadas durante o dimensionamento da potência do motor de combustão interna, onde foi postulado que o veículo não deveria exercer velocidades maiores à 60 km/h em vias com a inclinação de 9°.

É importante salientar que essa integração energética apresentada nesta seção não corresponde ao funcionamento real de um veículo elétrico híbrido e não contempla 100% do funcionamento de ambos motores, por considerar que cada um deles fornece 50% da potência para suprir o VSP requerido. A análise visa apenas compreender um método de integração básico por um método elementar e simplificado. Existem modos complexos de integração energética entre motores de veículos elétricos híbridos guiados por comandos eletrônicos e programação por softwares específicos, os quais não serão aprofundados neste trabalho.

4.8 Relação do Ciclo de Condução e o Consumo de Combustível

Para o dimensionamento tem-se três fases a serem consideradas no ciclo de condução urbano: A primeira fase tem duração de 505 segundos com velocidade média de 41,2 km/h e uma distância percorrida de 5,8km. A segunda fase tem duração de 866 segundos, com velocidade média de 25,8 km/h e uma distância percorrida de 6,2 km. Há um tempo de parada referente a 600 segundos e por fim, a terceira fase tem duração de 505 segundos, velocidade média de 41,2 km/h e distância percorrida de 5,8 km.

Este ciclo irá acontecer no início do dia, hipoteticamente considerando o deslocamento do veículo no trajeto casa para o trabalho e também acontecerá ao final do dia, no retorno do trabalho para casa. Logo, nos períodos da manhã e da noite o veículo deslocará uma distância de 17,8 km, totalizando um deslocamento diário de 35,6 km.

Como apresentado na seção 4.3.2, o consumo do motor de combustão interna é de 17,5 km/l. E o preço da gasolina é de R\$ 4,75, de acordo com o valor anteriormente determinado na seção 4.2.

Com os dados apresentados, tem-se que o motor de combustão interna irá trabalhar apenas na primeira e na terceira fase do ciclo de condução urbana, onde serão percorridos, em média, um total de 23,2 km por dia. Também será considerado que o percurso será realizado durante 25 dias em todos os meses do ano.

Com as considerações de consumo postuladas, é determinado na Tabela 15 o investimento em gasolina de acordo com diversos períodos de tempo de utilização do veículo.

Tabela 15: Investimento em Gasolina do Veículo Elétrico Híbrido em Ciclo de Condução Urbana

Período de Tempo	Investimento em Gasolina
1 mês	R\$ 159,46
3 meses	R\$ 478,39
6 meses	R\$ 956,79
9 meses	R\$ 1.435,18
1 ano	R\$ 1.913,57
2 anos	R\$ 3.827,14
3 anos	R\$ 5.740,71
4 anos	R\$ 7.654,29
5 anos	R\$ 9.567,86
10 anos	R\$ 19.135,71

Fonte: Pesquisa Direta, 2018.

A Tabela 15 apresenta o investimento financeiro ao longo de diversos períodos de tempo de um veículo elétrico híbrido que mantenha seu funcionamento unicamente em um ciclo de condução urbana. É importante salientar que o consumo para o veículo do estudo só acontece quando o mesmo se desloca em velocidades maiores que 35 km, pois antes disso o motor elétrico traciona o veículo sem o auxílio do motor de combustão interna, o que indica que não há consumo de combustível para a movimentação do carro.

Em uma análise mais generalista, observa-se o investimento em combustível de acordo com a quilometragem percorrida como ilustrado na Tabela 16.

Tabela 16: Investimento em Gasolina do Veículo Elétrico Híbrido por Distância Percorrida

Distância Percorrida (km)	Investimento em Gasolina
100	R\$ 27,14
1.000	R\$ 271,43
2.000	R\$ 542,86
3.000	R\$ 814,29
4000	R\$ 1.085,71
5.000	R\$ 1.357,14
10.000	R\$ 2.714,29
20.000	R\$ 5.428,57
30.000	R\$ 8.142,86
40.000	R\$ 10.857,14
50.000	R\$ 13.571,43
100.000	R\$ 27.142,86

Fonte: Pesquisa Direta, 2018.

A Tabela 16 apresenta o investimento financeiro ao longo de diversos períodos de tempo de um veículo elétrico híbrido de acordo com diversas distâncias percorridas.

Para fins comparativos, será suposto um veículo convencional movido à combustão interna com o consumo de 7 km/l. Utilizando os mesmos parâmetros de preço de gasolina e distância percorrida considerados para o veículo elétrico híbrido, obtém-se o consumo descrito na Tabela 17.

Tabela 17: Investimento em Gasolina em um Veículo de Combustão Interna.

VEÍCULO CONVENCIONAL			
Ciclo de Condução Urbana		Deslocamento por Quilometragem	
Período de Consumo	Investimento em Gasolina	Distância Percorrida (km)	Investimento em Gasolina
1 mês	R\$ 398,66	100	R\$ 67,86
3 meses	R\$ 1.195,98	1.000	R\$ 678,57
6 meses	R\$ 2.391,96	2.000	R\$ 1.357,14
9 meses	R\$ 3.587,95	3.000	R\$ 2.035,71
1 ano	R\$ 4.783,93	4000	R\$ 2.714,29
2 anos	R\$ 9.567,86	5.000	R\$ 3.392,86
3 anos	R\$ 14.351,79	10.000	R\$ 6.785,71
4 anos	R\$ 19.135,71	20.000	R\$ 13.571,43
5 anos	R\$ 23.919,64	30.000	R\$ 20.357,14
10 anos	R\$ 47.839,29	40.000	R\$ 27.142,86
-	-	50.000	R\$ 33.928,57
-	-	100.000	R\$ 67.857,14

Fonte: Pesquisa Direta, 2018

Como é possível observar na Tabela 17, tem-se um maior investimento financeiro em combustível por parte do usuário em situações análogas às propostas ao veículo elétrico híbrido. É importante considerar que o consumo de combustível no elétrico híbrido acontece apenas em velocidades superiores à 35 km/h e no veículo convencional o consumo é constante a partir do início do tracionamento.

É evidente a economia de um veículo elétrico híbrido frente à um veículo convencional movido por um motor de combustão interna. No ciclo de condução urbana padronizado pela NBR 6601, utilizado para a consideração de deslocamento de ambos veículos, tem-se que no período de 1 ano o carro elétrico híbrido exige o investimento de R\$ 1.913,57,00, enquanto o veículo convencional tem o gasto de R\$ 4.783,93. E ao observar o deslocamento por quilometragem, no momento em que o deslocamento total é de 100.000km, tem-se o investimento de R\$ 27.142,86 para o elétrico híbrido e de R\$ 67.857,14 para o veículo convencional. São diferenças expressivas que refletem diretamente no gasto do usuário.

O investimento para a compra de um veículo elétrico híbrido do tipo sedã no Brasil no ano de 2018 gira em torno de 120 a 160 mil reais (CARROS IG, 2018), enquanto um veículo sedã convencional pode chegar 50 mil reais, o que é um fator que impede que a venda desse tipo de modelo se popularize no país. Ainda são necessários mais incentivos fiscais e maiores investimentos por parte das fabricantes de veículos para popularizar os veículos elétricos híbridos para que eles se tornem mais acessíveis.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste capítulo são apresentadas as conclusões obtidas com o dimensionamento do sistema motor de um veículo elétrico híbrido em ciclo de condução urbana. Estão incluídas também recomendações para estudos futuros que aprimorem este trabalho e que contemplem novas perspectivas sobre o tema.

5.1 Conclusões

A indústria automotiva está em busca de novas alternativas para mobilidade de pessoas de forma mais sustentável, para a redução de consumo de combustíveis fósseis e consequentemente a diminuição de emissões de gases poluentes ao meio ambiente. Apesar de veículos movidos a motores de combustão serem utilizados a mais de um século em todo o mundo, alternativas vem sendo desenvolvidas para que novas matrizes energéticas possam ser aproveitadas em veículos no geral.

Recentemente a existência de veículos elétricos híbridos tornou-se uma alternativa interessante, apesar do seu alto custo inicial. Diversas fabricantes automotivas começaram a investir em estudos e desenvolver modelos para a comercialização e, apesar deste novo modelo de veículos permitir a redução considerável do consumo de combustível e da emissão de poluentes, ainda é necessário desenvolver artifícios tecnológicos menos onerosos para que o preço desse tipo de veículo torne-se acessível aos consumidores.

No Brasil existem opções de veículos híbridos disponíveis, como o modelo *'Prius'* da marca japonesa Toyota e o *'Ford Fusion Hybrid'*, ambos com o início de vendas em 2011.

Este trabalho teve como objetivo escolher a configuração e os parâmetros de tal maneira que os mesmos atendessem os dados genéricos de dimensionamento estipulados anteriormente. E dessa maneira selecionada a configuração para o veículo elétrico híbrido ideal, a configuração do ciclo termodinâmico para o motor a combustão interna, assim como sua potência, a configuração do motor elétrico e sua potência de funcionamento e a corrente, tempo de descarga, capacidade Peukert e voltagem da bateria. E complementarmente, foi estabelecida a potência VSP requerida e analisada qual a integração de funcionamento dos motores em determinados ângulos de via e variação de velocidade, além de qual seria o gasto com gasolina de acordo com o ciclo de condução urbano utilizado em testes pela NBR 6601.

De acordo com a revisão bibliográfica, a arquitetura mais vantajosa para a aplicação em veículos híbridos 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.

Para o caso específico proposto, a potência obtida no motor elétrico foi de 71 kW (ou 99,13 cv) com a configuração de construção do tipo relutância variável. A potência obtida para o motor de combustão interna é de 60 kW (ou 82 cv) e o ciclo termodinâmico selecionado para o seu funcionamento é o ciclo Atkinson. A bateria possui potência máxima de 84 kW e voltagem de 18,53 kV em uma situação onde a corrente é 4,5 Amperes e com tempo suposto de 10 horas para sua descarga sem nenhum fornecimento de energia e com uso contínuo. O fator de hibridização do veículo é de 0,54. O investimento em gasolina no ciclo de condução urbana seria de R\$ 159,46 ao mês, considerando que o veículo percorra a distância de 35,6 km por dia, o que totalizaria o percurso de 2 ciclos de condução urbana completos padronizados nos testes propostos pela NBR 6601.

E por questões comparativas, ficou evidenciado que o consumo de um veículo elétrico híbrido é muito inferior ao de um veículo convencional movido por motor de combustão interna, o que pode ser muito vantajoso para o usuário que economiza nos gastos relativos a combustíveis e gera uma consequência positiva, pois há a redução de emissão de gases poluentes e nocivos à saúde.

5.2 Recomendações

Como sugestões para trabalhos futuros na área, pode-se citar a realização de dimensionamentos do sistema motor de um veículo elétrico híbrido com configuração em série, mista e plug-in, além da possibilidade de realização de equacionamentos matemáticos dos componentes de acoplamento e transmissão do sistema do veículo e uma análise de viabilidade econômica comparativa entre os veículos elétricos híbridos e veículos de combustão interna.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Veículos rodoviários automotores leves – Determinação de hidrocarbonetos, monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio, dióxido de carbono e material particulado no gás de escapamento**: NBR 6601. Rio de Janeiro, 2012
- BARAN, Renato. **A Introdução De Veículos Elétricos No Brasil: Avaliação Do Impacto No Consumo De Gasolina E Eletricidade**. Tese de Doutorado COPPE/UFRJ. Setembro de 2012.
- BHTRANS/PRODABEL. **Relatório 1 – Síntese da Correção/Edição Das Declividades Das Vias De Belo Horizonte**. Prefeitura de Belo Horizonte, 2017, p. 4.
- BOSCH, Robert; **Manual de Tecnologia Automotiva**. Tradução da 25ª edição alemã; 2005.
- BRUNETTI, Franco. **Motores de Combustão Interna. Volume 1**. Editora Blucher. São Paulo. 2012.
- CANTARINO, Marcelo. **Modelo Simplificado Para Cálculo De Autonomia De Veículo Elétrico Com Motor De Relutância Variável**. Monografia em Engenharia Automotiva. Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia. São Caetano do Sul, 2014.
- CARRO IG. **Conheça quais são os 7 carros elétricos e híbridos disponíveis no Brasil**. Disponível em: <<https://carros.ig.com.br/2018-05-28/carros-eletricos-hibridos.html>>. Acessado em 11 de novembro de 2018.
- CARROS NA WEB. **Catálogo de Fichas Técnicas**. Disponível em: <<https://www.carrosnaweb.com.br>>. Acessado em 7 de novembro de 2018.
- CARVALHO, Rodrigo Higon. **Metodologia de Cálculo de Consumos de Combustível e Emissões de Poluentes Baseada em Perfis de Condução**. Dissertação de Mestrado Técnico Lisboa. Novembro de 2014.
- CASTEL-BRANCO, António José Pinto da Silva. **Configuração Ótima De Um Veículo Híbrido Com Motor De Combustão Interna**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Outubro de 2014.
- CÔRREA, Fernanda Cristina. **Desenvolvimento e Análise de Estratégias de Gerenciamento de Potência em Veículo Elétrico Híbrido de Configuração em Paralelo**. Campinas, São Paulo, 2013.
- DAEMME, Luiz Carlos. Errera, Marcelo, et al. **Estudo Das Emissões De Material Particulado Em Veículo Leve Com Motor Ciclo Otto De Injeção Direta Flex Fuel**. Universidade Federal Do Paraná, Intitutos Lactec. 2015.
- DELGADO, A. C. **Algoritmo Para Frenagem Regenerativa De Uma Máquina Síncrona De Imã Permanente**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, 2010.
- ENES, M. **O que é análise? - Parte 1**. Projetos e TI, 11 maio 2015. Disponível em: <<http://projetoseti.com.br/o-que-e-viabilidade-parte-1/>>. Acesso em: 24 maio 2018.
- HUSAIN, I., 2011. **Electric And Hybrid Vehicles: Design Fundamentals**, Second Edition, CRC Press. Disponível em <http://books.google.com/books?id=7AAWH_63HuAC&pgis=1>. Acessado em 20 de julho de 2018.
- IEA. International Energy Agency. **Relatório Anual Sobre Os Mercados de Petróleo**. Houston, Texas, 2011.

KASSERIS, E.P. & Heywood, J.B. **Comparative Analysis of Automotive Powertrain Choices for the Next 25 Years**. Society of Automotive Engineers International, 2007.

KHATTAK, Mohid. **Otto vs Atkinson Cycle Engines: What's the difference and their applications**. Parkwheels. Disponível em < <https://www.parkwheels.com/blog/otto-vs-atkinson-cycle-engines/>> Acesso em: 4 de julho de 2018.

KOTHARI, C. R. **Research Methodology Methods and Techniques**. 2ª. ed. Jaipur: New Age International Publishers, 2004.

LI, X. & Williamson, S.S. **Efficiency Analysis Of Hybrid Electric Vehicle (HEV) Traction Motor-Inverter Drive For Varied Driving Load Demands**. In **Conference Proceedings**. IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC. pp. 280–285. 2008.

LIMA, Renato Gavassa. **Evolução Dos Motores A Combustão Interna Ciclo Otto No Brasil**. Centro Paula Souza, Faculdade de Tecnologia FATEC Santo André – SP. 2017.

MACIEL FILHO, Francisco Fernando. **Construção De Ciclos De Condução Para Estimativa De Emissões Veiculares Para Ônibus Urbanos**. Dissertação (mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes. São Paulo, 2013.

MARQUES, Italo Cavalheiro. **Ciclo Atkinson – Razões Para Sua Utilização Em Veículos Híbridos**. Santo André, 2013. Trabalho de conclusão de curso – FATEC- Santo André. Curso de Eletrônica Automotiva, 2013

MARTINELLI, Luiz Carlos. **Motores De Combustão Interna - Conceitos Básicos**. UNIJUI – Campus Panambi. 2010.

MI, C., Masrur, M.A. & Gao, D.W. **Hybrid Electric Vehicles: Principles And Applications With Practical Perspectives**. 2011.

MICHAELIS. **Moderno Dicionário da Língua Portuguesa**. Disponível em: < <http://michaelis.uol.com.br>> Acesso em: 29 de maio de 2018.

NOCE, Toshizaemom. **Estudo Do Funcionamento De Veículos Elétricos E Contribuições Ao Seu Aperfeiçoamento**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2009.

PAYKANI, Amin. Shervani-Tabar, Mohammad. **A comparative study of hybrid electric vehicle fuel consumption over diverse driving cycles**. Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz. 2011.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. D. **Metodologia do Trabalho Científico: Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico**. 2ª. ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013. p.276

QUEIROZ, Juliana De Freitas. **Introdução Do Veículo Híbrido No Brasil: Evolução Tecnológica Aliada À Qualidade De Vida**. Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do Título de Mestre em Engenharia. São Paulo, 2006.

REVISTA PAINEL, **A História e a Genialidade dos Automóveis**. Ano IX, nº250. Associação de Engenharia, Arquitetura e Agronomia de Ribeirão Preto. Janeiro de 2016.

SILVA, Eduardo Miranda et al. **Motores De Combustão Interna**. Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica. Faculdade de Engenharia Universidade de Porto 2014.

TOYOSHIMA, Marcos Tadashi Kakitani. ITO, Gláucia Munemasa. GOUVEIA, Nelson. **Morbidade Por Doenças Respiratórias Em Pacientes Hospitalizados Em São Paulo/SP**.

Medicina Preventiva da Faculdade de Medicina da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP. 2004.

VARELLA, Carlos Alberto Alves. **Princípios De Funcionamento Dos Motores De Combustão Interna**, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2014.

VASCONCELLOS, Raphael Halfeld. **Projeto De Um Veículo Híbrido Para Uso Urbano**. Monografia – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica. São Paulo, 2011.

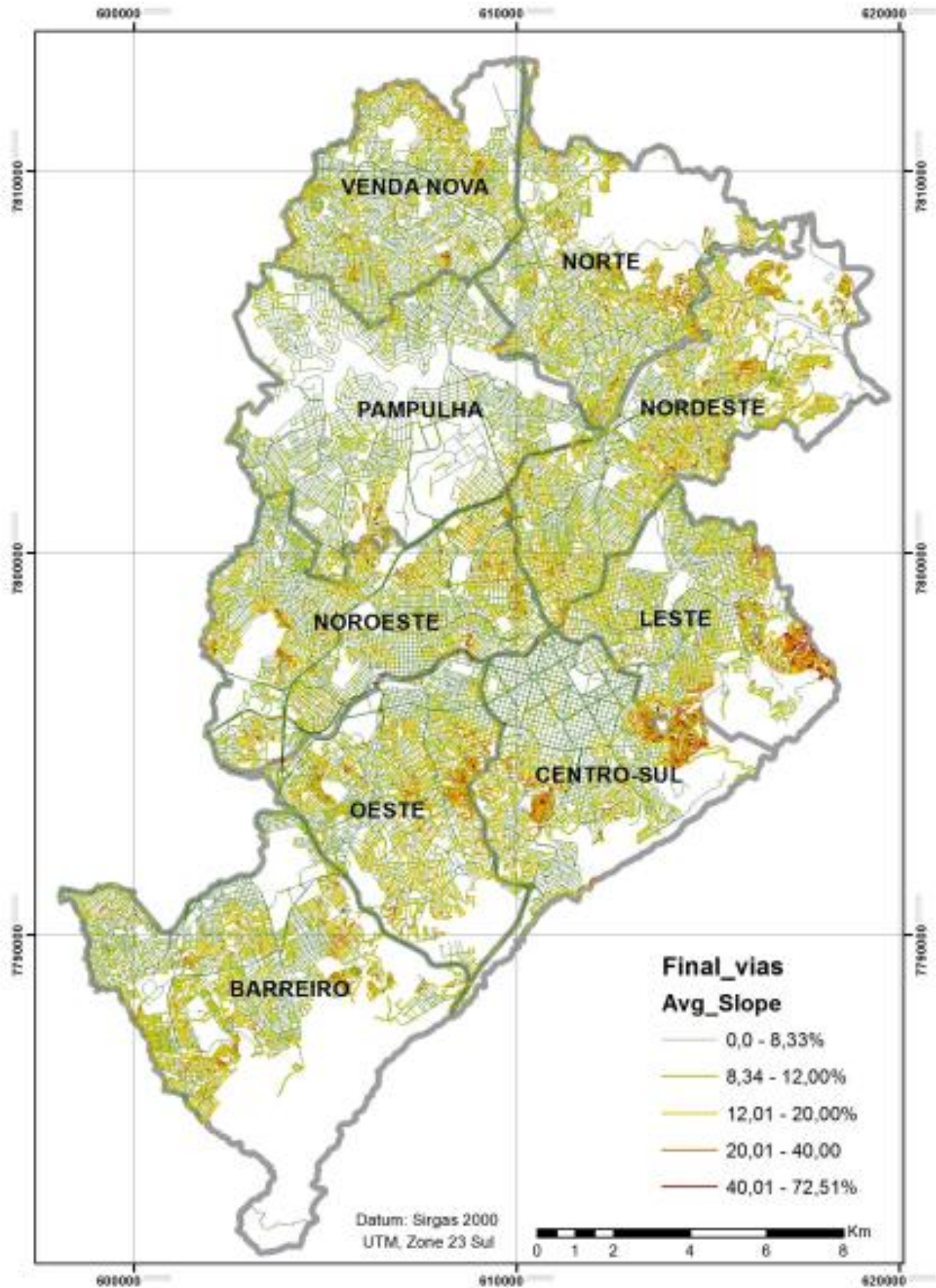
VASCONCELOS, Paulo Salim Daher. **Estudo De Viabilidade Técnica E Econômica De Um Veículo Urbano De Carga**. Monografia – Universidade Federal do Ceará. Departamento de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2015.

VAZ, Luis Felipe Hupsel. **Veículos Híbridos e Elétricos: Sugestões de Políticas Públicas Para o Segmento**. BNDES Setorial Automotivo, 2015, p. 4.

WANG, W. et al. **Analysis On Compound-Split Configuration Of Power-Split Hybrid Electric Vehicle. Mechanism And Machine Theory**, 2014.

7 ANEXOS

7.1 ANEXO A – Declividades Médias das Vias de Belo Horizonte





UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA



DECLARAÇÃO

Certifico que a aluna **Sabrina Yole Bicalho Busatte**, autora do trabalho de conclusão de curso intitulado “**Dimensionamento do sistema motor para um veículo elétrico híbrido de configuração em paralelo para uso em ciclo de condução urbana**” efetuou as correções sugeridas pela banca examinadora e que estou de acordo com a versão final do trabalho.

Ouro Preto, 18 de dezembro de 2018.

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Luis Bortolaia", is written over a horizontal line.

Prof. DSc. Luís Antônio Bortolaia

Orientador