UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Ivan Viero Sarturi

ANÁLISE DE VEÍCULOS ELÉTRICOS DE BAIXA POTÊNCIA PARA MOBILIDADE URBANA NO CAMPUS DA UFSM

Santa Maria, RS
2018

Ivan Viero Sarturi

ANÁLISE DE VEÍCULOS ELÉTRICOS DE BAIXA POTÊNCIA PARA MOBILIDADE URBANA NO CAMPUS DA UFSM

Trabalho de Conclusão de Curso ao Curso de Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Engenheiro Eletricista.**

Orientador: Prof. Dr. Geomar Machado Martins

Santa Maria, RS
2018

Ivan Viero Sarturi

ANÁLISE DE VEÍCULOS ELÉTRICOS DE BAIXA POTÊNCIA PARA MOBILIDADE URBANA NO CAMPUS DA UFSM

Trabalho de Conclusão de Curso ao Curso de Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Engenheiro Eletricista.**

Aprovado em 11 de dezembro de 2018:

_____

Geomar Machado Martins, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

_____

Frank Gonzatti, Dr. (UFSM)

_____

Maicon Miotto, Eng. (UFSM)

Santa Maria, RS
2018

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Ivan e Rosa,
pela educação e apoio recebidos.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Santa Maria pela oportunidade e ao professor Geomar Machado Martins que com sabedoria e profissionalismo, orientou e contribuiu para este trabalho.

Aos colegas e amigos de faculdade: Alan Weingartner, Érika Carla Smilgys, Lucas Amorim Bonini, Lucas Rossato Rocha, Jean Dupont Muenchen, José Augusto Thomas, Matheus Righi, Miguel Martins, Ricardo Kazuo Nozaki, Tiago Ribas e Victor Refosco pelo apoio, pelas lições, contribuições e pela amizade durante o período de graduação.

À minha família por me apoiar nas decisões acadêmicas.

RESUMO

ANÁLISE DE VEÍCULOS ELÉTRICOS DE BAIXA POTÊNCIA PARA MOBILIDADE URBANA NO CAMPUS DA UFSM

AUTOR: Ivan Viero Sarturi
ORIENTADOR: Prof. Dr. Geomar Machado Martins

Neste projeto buscou-se determinar se veículos elétricos de baixa potência para transporte urbano são capazes de atingir autonomias capazes de se equiparar a veículos similares a combustão, e, então, de se adotar esses para trânsito de pessoas, similarmente ao que é feito, atualmente, pelo ônibus interno da UFSM. Foram realizadas diversas simulações no *software* FASTsim, analisando-se diferentes variáveis, tais como, peso e chassi, e observando como veículos de baixa potência reagem a modificações dessas. Observou-se, ainda, que não é possível a adoção de veículos elétricos sem que haja mudança de cultura, uma vez que, atualmente, sua autonomia não se equipara a de um veículo a combustão.

Palavras-chave: Veículo. Elétrico. Combustão. Bateria. Autonomia.

ABSTRACT

AN ANALYSIS OF LOW-POWER ELECTRIC VEHICLES FOR URBAN MOBILITY AT THE UFSM CAMPUS

AUTHOR: Ivan Viero Sarturi
ADVISOR: Geomar Machado Martins

The aim of this project was to determine if low-power electric vehicles for urban transportation are capable of achieving autonomies similar to combustion-like vehicles, and then of adopting them for the transport of people, similarly to what is currently done, by the internal bus of UFSM. Several simulations were performed using the FASTsim software, analyzing different variables, such as weight and chassis, and observing how low power vehicles react to such modifications. It was also observed that it is not possible to adopt electric vehicles without a change of culture, since at present moment their autonomy is not comparable to that of a combustion vehicle.

Keywords: Vehicle. Electric. Combustion. Car battery. Autonomy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Características ideias de um motor elétrico..... 16
Figura 2 – (a) superfície de uma máquina de ímãs permanentes, (b) interior de uma máquina de ímãs permanentes.....17
Figura 3 – Características de várias fontes de energia..... 19
Figura 4 – Curva de carregamento de uma bateria comum de lítio-ion..... 20
Figura 5 – Curva de descarregamento de uma bateria comum de lítio-ion.....20
Figura 6 – Vendas de baterias de lítio-ion para aplicações em veículos elétricos e híbridos.....21
Figura 7 – Arrasto por fricção..... 22
Figura 8 – Arrasto por pressão..... 22
Figura 9 – Formas de semi-gota..... 23
Figura 10 – Forma semi-gota modificada..... 23
Figura 11 – Modelo utilizado nos estudos de Lay.....24
Figura 12 – Evolução do coeficiente de arrasto mediante modernização do chassi de veículos..... 25
Figura 13 – Tabela de consumo energético de veículos a combustão fornecida pelo Inmetro.....26
Figura 14 – Taxa de integração entre frenagem por fricção e regenerativa..... 28
Figura 15 – Tempo de parada para diferentes tipos de frenagem.....29
Figura 16 – Aba principal do FASTsim..... 31
Figura 17 – Resultados da simulação..... 32
Figura 18 – Curva velocidade/tempo – simulação UDDS..... 33
Figura 19 – Curva velocidade/tempo – simulação HWFET..... 34
Figura 20 – a) validação UDDS, b) Validação HWFET. Círculo dados oficiais do fabricante, em X dados obtidos pela simulação do *software*.....35
Figura 21 – Selo EPA de um veículo elétrico..... 37
Figura 22 – Renault Zoe..... 39
Figura 23 – Autonomia de veículos completamente abastecidos e carregados.....40
Figura 24 – *Elettro 320CP*..... 41
Figura 25 – *Carryall 700*.....42
Figura 26 – *Carryall 700* customizado com caçamba.....44
Figura 27 – Yamaha *Concierge 6* elétrico.....44
Figura 28 – Ciclo UDDS *Elettro 320CP* – simulação 1.....47
Figura 29 – Ciclo HWY *Elettro 320CP* – simulação 1.....49
Figura 30 – Ciclo UDDS *Carryal 700* – simulação 1..... 51
Figura 31 – Ciclo HWY *Carryall 700* – simulação 1..... 52
Figura 32 – Ciclo UDDS *Carryall 700* a combustão – simulação 1.....54
Figura 33 – Ciclo HWY *Carryall 700* a combustão – simulação 1..... 55
Figura 34 – Ciclo UDDS *Concierge* elétrico – simulação 1..... 56
Figura 35 – Ciclo HWY *Concierge* elétrico – simulação 1.....57
Figura 36 – Ciclo UDDS *Concierge* 6 a combustão – simulação 1..... 59
Figura 37 – Ciclo HWY *Concierge* 6 a combustão – simulação 1..... 60
Figura 38 – Ciclo UDDS *Elettro 320CP* – simulação 2.....62
Figura 39 – Ciclo HWY *Elettro 320CP* – simulação 2.....62
Figura 40 – Ciclo UDDS *Carryall 700* elétrico – simulação 2..... 65
Figura 41 – Ciclo HWY *Carryall 700* elétrico – simulação 2..... 66
Figura 42 – Ciclo UDDS *Carryall 700* combustão – simulação 2.....68
Figura 43 – Ciclo UDDS Carryall 700 combustão – simulação 2..... 69

Figura 44 – Ciclo UDDS *Concierge* elétrico – simulação 2..... 71
Figura 45 – Ciclo HWY *Concierge* elétrico – simulação 2..... 72
Figura 46 – Ciclo UDDS *Concierge* 6 a combustão – simulação 2..... 74
Figura 47 – Ciclo HWY *Concierge* 6 a combustão – simulação 2..... 75
Figura 48 – Ciclo UDDS *Elettro* 320CP – simulação 3.....77
Figura 49 – Ciclo HWY *Elettro* 320CP – simulação 3..... 78
Figura 50 – Ciclo UDDS *Carryall* 700 elétrico – simulação 3..... 80
Figura 51 – Ciclo HWY *Carryall* 700 elétrico – simulação 3..... 81
Figura 52 – Ciclo UDDS *Carryall* 700 combustão – simulação 3.....83
Figura 53 – Ciclo HWY *Carryall* 700 combustão – simulação 3..... 84
Figura 54 – Ciclo UDDS *Concierge* 6 elétrico – simulação 3..... 86
Figura 55 – Ciclo HWY *Concierge* – simulação 3..... 87
Figura 56 – Ciclo UDDS *Concierge* 6 a combustão – simulação 3..... 89
Figura 57 – Ciclo HWY *Concierge* 6 a combustão – simulação 3..... 90
Figura 58 – Ciclo UDDS *Elettro* 320CP – simulação 4.....93
Figura 59 – Ciclo HWY *Elettro* 320CP – simulação 4..... 95
Figura 60 – Ciclo UDDS *Carryall* 700 elétrico – simulação 4..... 96
Figura 61 – Ciclo HWY *Carryall* 700 elétrico – simulação 4..... 98
Figura 62 – Ciclo UDDS *Carryall* 700 combustão – simulação 4..... 99
Figura 63 – Ciclo HWY *Carryall* 700 combustão – simulação 4..... 101
Figura 64 – Ciclo UDDS *Concierge* 6 elétrico – simulação 4..... 102
Figura 65 – Ciclo HWY *Concierge* 6 elétrico – simulação 4..... 104
Figura 66 – Ciclo UDDS *Concierge* 6 a combustão – simulação 4..... 104
Figura 67 – Ciclo HWY *Concierge* 6 a combustão – simulação 4..... 106

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Percentual de perdas em teste UDDS – simulação 1..... 47
Gráfico 2 – Percentual de perdas em teste HWY – simulação 1.....48
Gráfico 3 – Percentual de perdas em teste UDDS – simulação 1..... 50
Gráfico 4 – Percentual de perdas em teste HWY – simulação 1.....51
Gráfico 5 – Percentual de perdas em teste UDDS – simulação 1..... 53
Gráfico 6 – Percentual de perdas em testes HWY – simulação 1..... 54
Gráfico 7 – Percentual de perdas em teste UDDS – simulação 1..... 55
Gráfico 8 – Percentual de perdas em teste HWY – simulação 1.....56
Gráfico 9 – Percentual de perdas em teste UDDS – simulação 1..... 58
Gráfico 10 – Percentual de perdas em testes HWY – simulação 1..... 60
Gráfico 11 – Percentual de perdas em teste UDDS – simulação 2..... 62
Gráfico 12 – Percentual de perdas em teste HWY – simulação 2.....63
Gráfico 13 – Percentual de perdas em teste UDDS – simulação 2..... 64
Gráfico 14 – Percentual de perdas em teste UDDS – simulação 2..... 65
Gráfico 15 – Percentual de perdas em teste UDDS – simulação 2..... 67
Gráfico 16 – Percentual de perdas em teste HWY – simulação 2..... 69
Gráfico 17 – Percentual de perdas em teste UDDS – simulação 2..... 70
Gráfico 18 – Percentual de perdas em teste HWY – simulação 2.....72
Gráfico 19 – Percentual de perdas em teste UDDS – simulação 2..... 74
Gráfico 20 – Percentual de perdas em teste HWY – simulação 2.....75
Gráfico 21 – Percentual de perdas em teste UDDS – simulação 3..... 76
Gráfico 22 – Percentual de perdas em teste HWY – simulação 3.....78
Gráfico 23 – Percentual de perdas em teste UDDS – simulação 3..... 80
Gráfico 24 – Percentual de perdas em teste UDDS – simulação 3..... 81
Gráfico 25 – Percentual de perdas em teste UDDS – simulação 3..... 83
Gráfico 26 – Percentual de perdas em teste HWY – simulação 3.....84
Gráfico 27 – Percentual de perdas em teste UDDS – simulação 3..... 85
Gráfico 28 – Percentual de perdas em teste HWY – simulação 3..... 87
Gráfico 29 – Percentual de perdas em teste UDDS – simulação 3..... 89
Gráfico 30 – Percentual de perdas em teste HWY – simulação 3.....90
Gráfico 31 – Percentual de perdas em teste UDDS – simulação 4..... 92
Gráfico 32 – Percentual de perdas em teste HWY – simulação 4..... 93
Gráfico 33 – Percentual de perdas em teste UDDS – simulação 4..... 95
Gráfico 34 – Percentual de perdas em teste HWY – simulação 4.....96
Gráfico 35 – Percentual de perdas em teste UDDS – simulação 4..... 97
Gráfico 36 – Percentual de perdas em teste HWY – simulação 4.....99
Gráfico 37 – Percentual de perdas em teste UDDS – simulação 4..... 100
Gráfico 38 – Percentual de perdas em teste HWY – simulação 4.....102
Gráfico 39 – Percentual de perdas em teste UDDS – simulação 4..... 104
Gráfico 40 – Percentual de perdas em teste HWY – simulação 4.....105

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coeficiente de arrasto comprimento/modelo.....24
Tabela 2 – Comparativo de eficiência de diferentes motores para diferentes veículos.... 37
Tabela 3 – Especificações *Elettro* 320CP..... 40
Tabela 4 – Especificações *Carryall* 700.....42
Tabela 5 – Especificações Yamaha *Concierge*..... 43
Tabela 6 – Comparativo de autonomia de veículos, obtida na simulação 1 do projeto..... 106
Tabela 7 – Comparativo das simulações 1 e 2 das energias recuperadas em simulação UDDS.....108
Tabela 8 – Evolução da autonomia através da redução do peso de carga..... 109
Tabela 9 – Anomalia proveniente do aumento do arrasto pela redução do peso..... 110
Tabela 10 – Comparativo entre consumo energético por arrasto da segunda e da terceira simulação, ciclo HWY.....112
Tabela 11 – Comparativo entre autonomia da primeira e terceira simulação..... 112
Tabela 12 – Evolução do consumo do motor para os veículos a combustão..... 113
Tabela 13 – Comparativo de desempenho da simulação 1 para simulação 4..... 114
Tabela 14 – Comparativo de consumo energético do veículo Carryall 700 elétrico para a simulação 1 e 4 no ciclo UDDS.....115
Tabela 15 – Consumo energético de todos os componentes para simulação 4 com baterias de níquel-cádmio.....116
Tabela 16 – Comparativo entre diferentes baterias para simulação 4, ciclo UDDS..... 117

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO ... 13
1.1 OBJETIVO GERAL ... 15
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS ... 15
1.3 RESULTADOS ESPERADOS ... 15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA ... 16
2.1 MÁQUINAS ELÉTRICAS ... 16
2.2 BATERIAS ... 18
2.3 CARACTERÍSTICAS AERODINÂMICAS ... 21
2.4 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA VEICULAR ... 25
2.5 FRENAGEM REGENERATIVA ... 27
2.6 RECARGA DE BATERIA ... 29
2.7 FASTSim ... 30
3 DESENVOLVIMENTO ... 38
3.1 RELAÇÃO PESO E AUTONOMIA ... 38
3.2 VEÍCULOS A PROPOR ... 40
3.2.1 Tramontina Elettro 320cp ... 41
3.2.2 Club Car Carryall 700 ... 42
3.2.3 Yamaha Concierge 6 ... 44
4 METODOLOGIA ... 46
4.1 SIMULAÇÃO 1 ... 47
4.1.1 Tramontina Elettro 320CP ... 47
4.1.2 Carryall 700 elétrico ... 50
4.1.3 Carryall 700 combustão ... 53
4.2 SIMULAÇÃO 2 ... 61
4.2.1 Tramontina *Elettro 320CP* ... 61
4.2.2 *Carryall* 700 elétrico ... 64
4.2.3 *Carryall* 700 combustão ... 68
4.2.4 Yamaha *Concierge* 6 elétrico ... 70
4.2.5 Yamaha *Concierge* 6 a combustão ... 74
4.3 SIMULAÇÃO 3 ... 76
4.3.1 Tramontina *Elettro 320CP* ... 76
4.3.2 *Carryall 700* elétrico ... 80
4.3.3 *Carryall 700* combustão ... 83

4.3.4 Yamaha *Concierge 6* elétrico 85
4.3.5 Yamaha *Concierge 6* a combustão 89
4.4 SIMULAÇÃO 4 91
4.4.1 Tramontina *Elettro 320CP* 91
4.4.2 *Carryall 700* elétrico 95
4.4.3 *Carryall 700* a combustão 98
4.4.4 Yamaha *Concierge 6* elétrico 100
4.4.5 Yamaha *Concierge 6* a combustão 104
5 RESULTADOS 107
6 CONCLUSÃO 120

1 INTRODUÇÃO

A crescente urbanização e aumento da emissão de gases causadores do efeito estufa justifica a busca por meios mais sustentáveis de produção, de transportes e de subsistência. Nesse contexto, um dos principais focos de demanda é por meios de transporte mais sustentáveis e que se adequem a distâncias menores, de características urbanas. Localmente, na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), o ônibus interno tem um importante papel no transporte de funcionários, estudantes, professores, técnicos e comunidade em geral. Apesar de ser uma forma de transporte econômica, se comparado a veículos tradicionais e ter menor impacto no efeito estufa, o veículo não deixa de ser a combustão e, portanto, contribuir para o impacto ambiental.

Com a invenção de motores a vapor, no final do século XVIII, e adoção desses, em barcos comerciais, no início do século XIX, grandes mudanças de paradigma foram ocasionadas culminando na Revolução Industrial. Sendo possível o rápido transporte de elementos antes impossíveis de se transportar devido a condições severas enfrentadas na viagem, como, por exemplo, algodão. Por fim, isso resultou em domínio político global do Império Britânico dos anos 1790 até 1914.

Os mesmos veículos a combustão, presentes hoje no mercado, são os que causaram a percepção do público sobre o que é um automóvel. Assim, a grave ineficiência de propulsores a combustão, tornou-se, de alguma forma, plausível, e exatamente por essa razão, melhoras de eficiência estagnaram. As mudanças vindas do pós-guerra, foram apenas no sentido de melhores materiais na construção do veículo, aumento de potência e de motores.

A adoção de veículos elétricos, da mesma forma que os motores a vapor, será o objeto causador de grandes mudanças sociais, econômicas, políticas e tecnológicas. Alterando a forma de trânsito das pessoas e de maneira mais profunda como as pessoas veem e percebem a forma de transporte. E, ao final do processo, a sociedade como um todo enxergará naturalidade que se enxerga hoje o uso de veículos a combustão e os antigos problemas desses levantaram estranheza e questionamento a respeito de como se utilizou por tanto tempo propulsores a combustíveis fósseis.

Proprietários de veículos elétricos terão a seu dispor liberdades inerentes a esses. Sendo possível a recarga no momento em que julgarem necessário, não dependendo de combustíveis fósseis e de postos para tal tarefa. Assim, podendo, também, conectar o seu veículo na rede e devolver, vendendo no processo, energia para rede. O que acaba por

também ser ato de libertação de nações inteiras, tornando independentes de estrangeiros para fornecimento de combustíveis fósseis.

De acordo com Emadi (2015), a adoção de veículos elétricos acompanhada de grandes avanços de tecnologias forçará os consumidores em um trajeto por um preço baixo, baixa manutenção, segurança, confiabilidade, robustez e naturalmente, sustentável. Já para as empresas, haverá uma busca por fazer estruturas e sistemas modificáveis e adaptáveis, capazes de se adequar a diferentes mercados e rentáveis.

A indústria automobilística vem se adequando a tais demandas. Montadoras tradicionais como Volkswagen, Chevrolet e Ford que possuíam todos os veículos com propulsor a combustão apenas, aderiram de maneira conservadora ao meio termo, de veículos híbridos, onde há dois motores no veículo, um elétrico e um a combustão. De certa forma, assim, introduzindo na sociedade o conceito e fazendo desta forma uma experiência com os consumidores.

Na medida em que houver aceitação por motores elétricos em veículos e melhoras de usabilidade forem atingidas, isso é, veículos de maior autonomia e de menor tempo de recarga com novas tecnologias sendo introduzidas na indústria, muitas já existentes em outros ramos, porém, sendo adotadas também de maneira conservadora. Baterias de níquel-cádmio e chumbo ácido de baixa capacidade foram dando lugar a um meio mais eficiente, o lítio. Motores, uma vez apenas de ímãs permanentes se viram em disputa, resultado da escassez de materiais e custo, como o de relutância variável. O que acabará culminando em veículos totalmente elétricos das mesmas montadoras.

Em busca por atender estes anseios, houve a criação de uma pista multiuso na UFSM, a fim de adequar o trajeto a ciclistas e pedestres. Além disso, bicicletas são disponibilizadas gratuitamente para uso dentro do campus. Porém, ainda é limitado o uso dessas para pessoas com condições físicas para se usar e nem sempre se dispõe do tempo necessitado para se atingir o destino com estas.

Assim, é inevitável a eventual migração para um veículo totalmente elétrico, para uso dentro do campus. Seja a proposta similar às bicicletas, seja a proposta similar ao ônibus, é desejado que o transporte fosse feito de maneira limpa, rápida e eficiente. A proposta aqui estudada se encaixará em um meio termo entre um ônibus e uma bicicleta, isto é, um veículo pequeno, de baixa potência e que seja capaz de transportar pessoas, mais do que uma bicicleta e menos do que o ônibus. Veículos de características similares já são utilizados em outros lugares para o mesmo propósito, como aeroportos e no turismo.

1.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo geral, propor um veículo elétrico para uso dentro do Campus da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Além de justificar o uso desse veículo, em termos econômicos e sustentáveis, comparando soluções encontradas durante a pesquisa para o desenvolvimento desse trabalho com produtos já existentes, tanto com motor a combustão quanto elétricos.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir a partir de cálculos e simulações a eficiência e as vantagens do veículo;
- Atribuir vantagens ao veículo, em contrapartida ao equivalente com motor a combustão;
- Verificar a autonomia prevista ao veículo a partir da análise do estado da arte das baterias;
- Projetar os benefícios em relação à sustentabilidade do uso do veículo.

1.3 RESULTADOS ESPERADOS

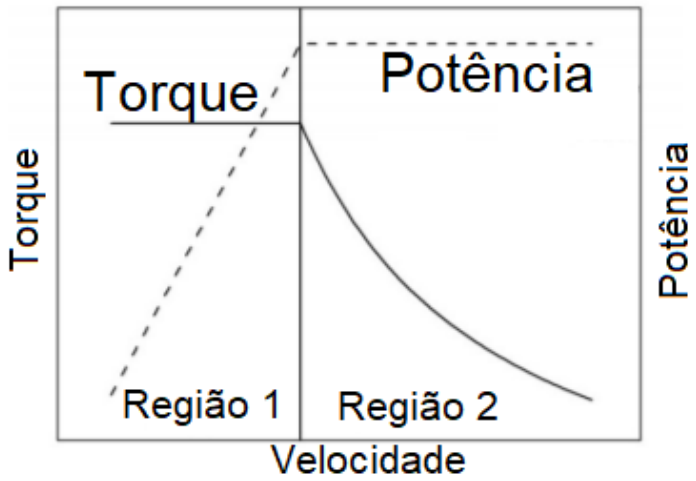
Além de comparar veículos elétricos já existentes no mercado, bem como, classifica-los como alternativas viáveis ou inviáveis; buscou-se propor alternativas e possibilidades para a continuidade do projeto.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MÁQUINAS ELÉTRICAS

Dispositivo capaz de converter energia mecânica em energia elétrica (gerador) e vice-versa (motor). O princípio de funcionamento destas máquinas provém por ação de campo magnético. A figura 1, a seguir, descreve o comportamento ideal de um motor elétrico para ser utilizado em veículos, que pode se dividir em duas regiões distintas (WANG, GAO, 2014).

Figura 1 – Características ideais de um motor elétrico



Fonte: Wang e Gao (adaptado), 2014.

Na região 1, é descrita uma zona de torque constante, onde o veículo está operando sob partidas e frenagens constantes, acelerado e desacelerando. Já a região 2 descreve uma zona onde o veículo já está em altas velocidades. Idealmente um veículo elétrico deve ter alta eficiência em ambas as regiões (WANG, GAO, 2014).

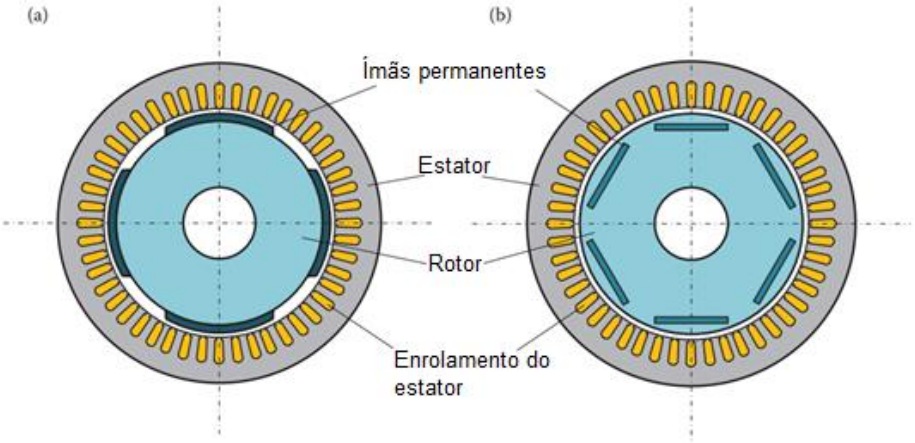
As características desejáveis para um motor elétrico neste projeto são: alta densidade de torque e potência; torque de partida elevado, para arrancada do veículo ou para quando estiver sob algum tipo de inclinação ou elevação do solo; alta eficiência sob as duas operações descritas na figura 1; alta confiança e robustez apropriada para o seu uso. Por fim, é importante salientar a importância de que o motor tenha custo aceitável para viabilizar o projeto (ZHU, HOWE, 2007).

A primeira maneira de operação de um motor elétrico analisada nesse projeto é através de corrente contínua. Uma das grandes vantagens deste motor, especificamente, para esse projeto é que não há necessidade de equipamentos de conversão CC/CA para uso no resto da eletrônica do carro. Dentro da categoria, ainda existem cinco tipos de acionamento (excitação independente, derivação, ímã permanente, série e composto) (CHENG, et al, 2012).

O motor elétrico CC com ímãs permanentes possibilita que esse seja de tamanho reduzido, uma vez que não há enrolamento de campo, ainda, em geral, são mais eficientes e mais simples que os equivalentes anteriormente citados visto que as perdas de cobre no rotor também são insignificantes. Como desvantagem, os ímãs permanentes podem ser desmagnetizados e não conseguem produzir um torque elevado (CHENG, et al, 2012).

Um dos problemas mais comuns do uso de ímãs permanentes é a crescente demanda dos metais de terras raras, acarretando em uma crescente de preço. Uma das principais alternativas a este motor são de indução e o síncrono (WIDMER, MARTIN, KIMIABEIGI, 2015).

Figura 2 – (a) superfície de uma máquina de ímãs permanentes, (b) interior de uma máquina de ímãs permanentes



Fonte: Emadi (adaptado), 2015.

Em contrapartida ao motor CC de ímãs permanentes, há ainda o motor CC sem escovas (*brushless DC motor* ou *BLDCM*), que consegue apresentar um pico de torque maior, o tornando melhor nas situações de arrancada, no entanto, incapaz de mantê-lo contínuo, reduzindo assim a sua eficiência. De modo geral, o motor CC de ímãs permanentes

demonstrou ser o melhor, dentre os dois analisados, até então, pela sua eficiência superior e pelas condições de uso (carga leve, velocidades medianas).

O motor síncrono diferente do explorado até agora, utiliza corrente alternada para alimentar a sua armadura, mas mantém a corrente contínua para alimentar o seu campo. Em contrapartida ao de indução, oferece maior rendimento, permite um entre-ferro maior e em geral são mais baratos (WANG, 2014).

Há, ainda, o motor de relutância alternável (*switched reluctance motor*) que apresenta alta eficiência, robustez e torque elevado e custo reduzido ainda que seja necessário um alto controle de manufatura devido à necessidade de seu entreferro ser pequeno (ZHU, HOWE, 2007), esta opção é a que mais vem se aproximando do motor CC com ímãs permanentes (WIDMER, MARTIN, KIMIABEIGI, 2015).

O SRM, ainda, possui uma série de características que o destacam quanto ao uso em veículos elétricos, fora os já mencionados, apresenta também configurações em que a zona de potência constante (observado na região 2 na figura 1) é extremamente grande, possibilitando elevadas velocidades ao veículo (RAHMAN, et al, 2000). Aumentos de temperatura causam mínimos efeitos ao motor (ZHU, HOWE, 2007). O fator de potência deste motor é baixo, no entanto, observou-se que em altas velocidades esse aumenta. Um dos maiores defeitos deste motor é o elevado *ripple* do torque, que acarreta diretamente em vibração e, portanto, ruídos acústicos, no entanto nenhum desses defeitos compromete fatalmente o motor para uso em veículos elétricos (RAHMAN, et al, 2000).

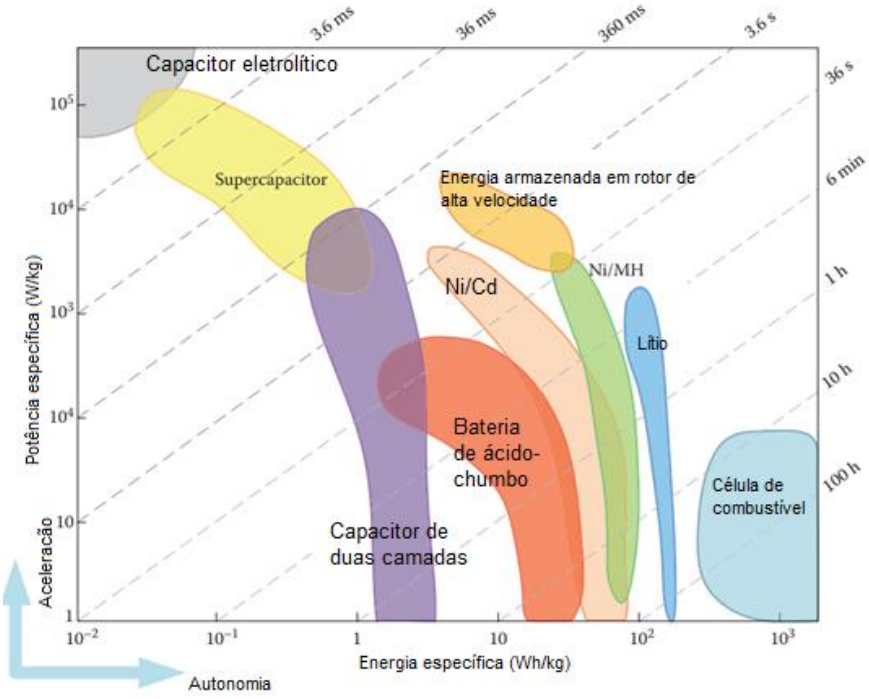
Por fim, ainda existe o motor de indução. Uma das mais maduras no mercado, possui baixo custo, alta eficiência e técnicas de produção já bem definidas. No entanto, para o uso nesse projeto, é necessário que o controle de fluxo seja feito de maneira precisa, assim obtendo alta eficiência no modo de torque constante e no modo de potência constante (ZHU, HOWE, 2007).

2.2 BATERIAS

As fontes de energia são um dos maiores obstáculos, se não o maior, para a aceitação e comercialização de veículos elétricos. Segundo Gomes (2001), o que se deseja em uma bateria, para essa aplicação é que a densidade de energia (Wh/kg) e densidade de potência (W/kg) sejam elevadas, para ter autonomia e aceleração. Ainda, é desejável baixa manutenção, carregamento rápido, baixo custo, alta eficiência, segurança, entre outros.

A figura 3, abaixo, apresenta uma relação entre densidade de potência e de energia, para vários tipos de fontes de energia.

Figura 3 – Características de várias fontes de energia

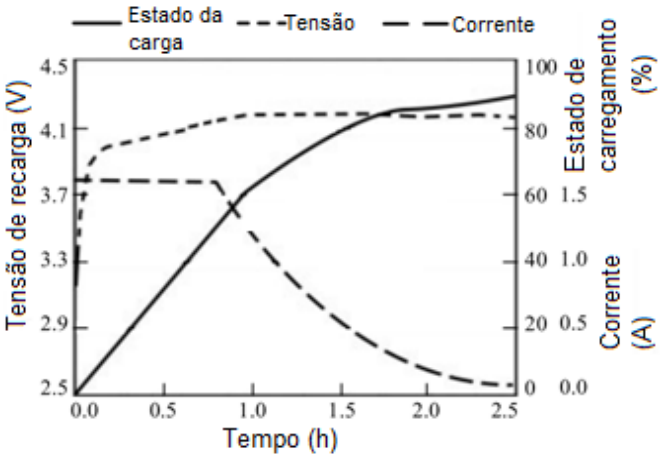


Fonte: Emadi (adaptado), 2015.

As baterias de lítio-ion são, com certeza, uma das que mais se destacam nesse projeto. Isso, pois, apresentam alta densidade de carga, efeito memória reduzido, leveza, larga temperatura de operação, longevidade alta e baixa taxa de descarregamento. E, além disso, são baterias de baixo custo. É válido, ainda, apontar que no processo de produção emitem-se gases do efeito estufa, o que vai de frente contra a proposta desse projeto.

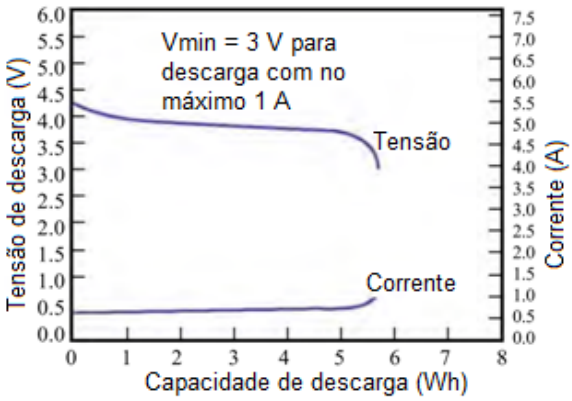
Esse tipo de bateria exige um circuito de complexibilidade considerável para carga e descarga, no entanto, obtém-se um bom resultado, pois quando carregando a tensão da bateria mantém-se estável com a corrente reduzindo-se suavemente, apesar da curva ser exponencial. A mesma suavidade mantém-se durante o processo de descarga, e tanto corrente quanto tensão ficam estáveis, possuindo elevação da corrente e redução da tensão – que se define como tensão de fim de carga – ao fim de sua carga apenas.

Figura 4 – Curva de carregamento de uma bateria comum de lítio-ion



Fonte: Hannan (adaptado), 2018.

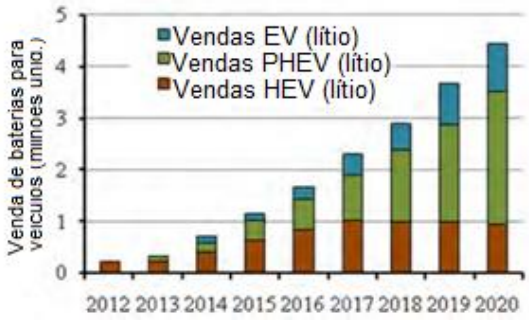
Figura 5 – Curva de descarregamento de uma bateria comum de lítio-ion



Fonte: Hannan (adaptado), 2018.

Por se provar ser uma fonte de energia tão confiável e atendendo a maioria dos requisitos desejáveis a uma bateria, há uma crescente demanda para aplicações veiculares. Portanto, novos estudos vêm sendo feitos, com o propósito de reduzir a emissão de gases causadores do efeito estufa uma vez que essa é muitas vezes uma das razões pela qual leva os consumidores a optar por veículos elétricos (HANNAN, et al, 2018).

Figura 6 – Vendas de baterias de lítio-ion para aplicações em veículos elétricos e híbridos



Fonte: Hannan (adaptado), 2018.

Um dos grandes desafios de veículos elétricos é sua autonomia, dada à alta energia específica da gasolina (cerca de 12.000Wh/Kg), veículos a combustão interna podem facilmente armazenar grandes quantidades de energia com volume e massa reduzidas. Baterias por outro lado possuem capacidade de armazenar energia significativamente menor, 150Wh/Kg para veículos populares e 200Wh/Kg nos modelos da empresa Tesla, grande progresso vem sendo feito recentemente, com baterias envolvendo silício previstas para o ano de 2020 com capacidades de 300Wh/Kg e pesquisas ainda para 2030 com lítio-enxofre e lítio-oxigênio prevendo até 500Wh/Kg.

2.3 CARACTERÍSTICAS AERODINÂMICAS

O arrasto é definido como uma força longitudinal gerada pela resistência aerodinâmica, resistência ao rolamento, resistência a inclinação da pista ou a resistência à própria aceleração do veículo. Pode ser descrito pela fórmula:

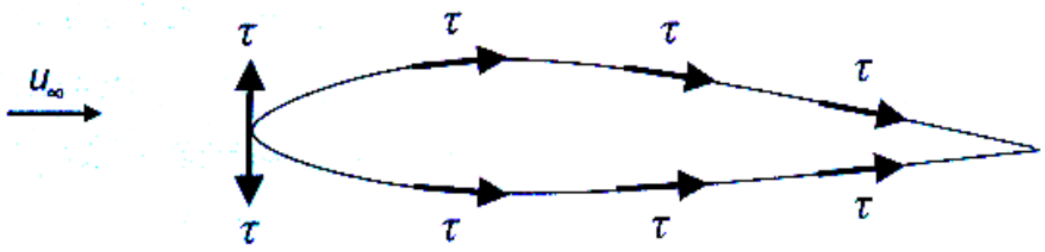
$$F_A = \frac{\rho_{ar} \times A_f \times c_d \times v^2}{2} \quad (1)$$

Onde ρ_{ar} descreve a densidade do ar (1,2kg/m³), A_f a área, para este caso a frontal do carro, c_d o coeficiente de arrasto aerodinâmico (adimensional) e v a velocidade do carro em relação ao ar. Analisando-se a fórmula podem ser feitas algumas observações. A área frontal do veículo é diretamente proporcional a força de arrasto, bem como a velocidade. Desta

forma, indiretamente, estas duas variáveis estão associadas a eficiência do veículo e deverão portanto ser observadas no projeto.

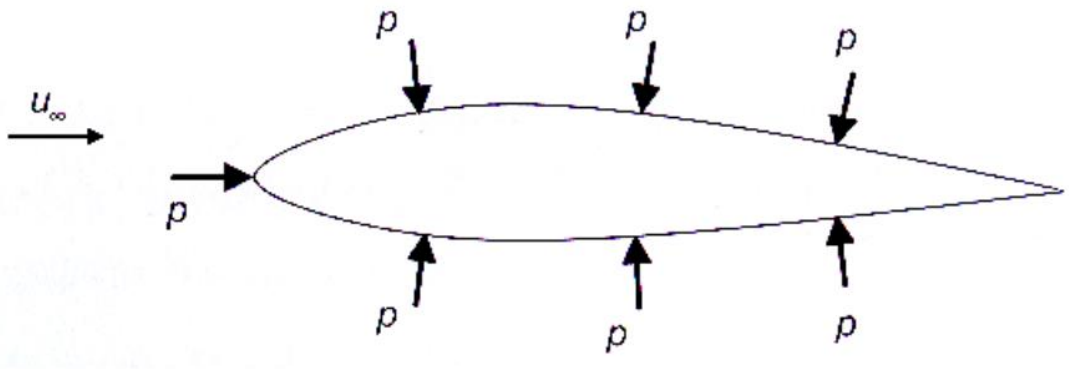
O arrasto aerodinâmico é proveniente da fricção – gerado pelo ar que flui pela carenagem do veículo e a superfície desta carenagem – e da pressão – relacionado à força normal que atua sobre a carenagem do veículo.

Figura 7 – Arrasto por fricção



Fonte: Santin et al, 2007.

Figura 8 – Arrasto por pressão



Fonte: Santin et al., 2007.

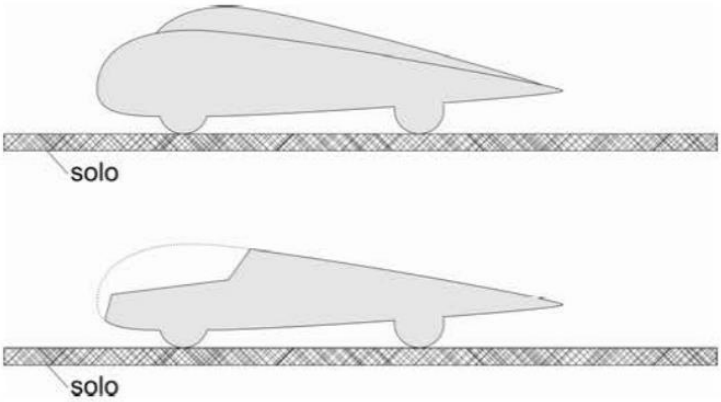
Para esta seção ainda se faz necessário destacar a importância da forma geométrica do veículo, de modo a se evitar formas geométricas complexas. A carenagem deve ser modulada de forma a se reduzir o arrasto aerodinâmico.

Para Cardoso Rosa (2013, p. 53) “O interesse em economia de combustível resultou em importantes incentivos para se chegar a projetos de automóveis que apresentam eficiente desempenho aerodinâmico e ao mesmo tempo formas atraentes”. Apesar de a forma “gota”

ser a que menos oferece arrasto aerodinâmico, esse modelo sofre de bruscas variações de distância ao solo em relação ao seu chassi, interferindo no escoamento do fluxo de ar na parte inferior do veículo e ainda a afixação das rodas é deficiente.

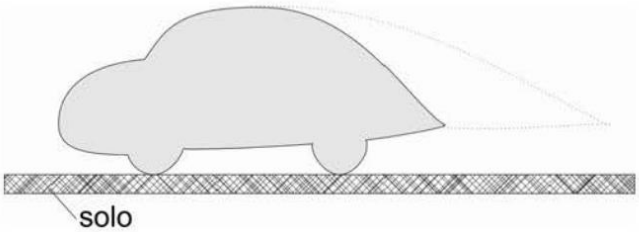
Para resolver os problemas de arrasto e escoamento do fluxo de ar inferior, o design da figura 9 foi proposto por Jaray e para se reduzir o comprimento do veículo, a forma da figura 10 foi projetada que deu origem ao popular *Volkswagen Fusca.*

Figura 9 – Formas de semi-gota



Fonte: Nicolazzi e Rosa, 2001.

Figura 10 – Forma semi-gota modificada

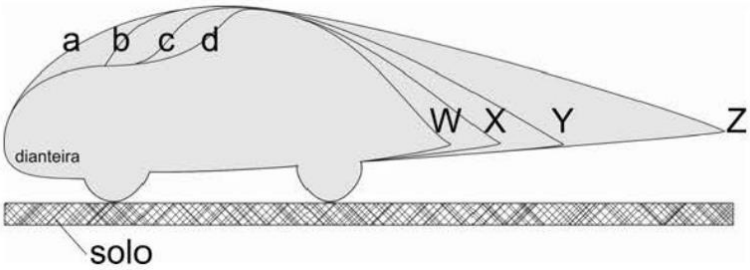


Fonte: Nicolazzi e Rosa, 2001.

Pelos estudos de Lay, é possível verificar correlação entre a eficiência aerodinâmica traseira e dianteira, isto é, caso seja modificada a parte frontal do veículo haverá influência na eficiência da traseira. Assim sendo, a solução ideal é proveniente do trabalho em conjunto entre dianteira e traseira, a fim de reduzir o coeficiente de arraste aerodinâmico. Ainda, comprovou-se que variações de até 45º no vidro não modificam de forma significativa o

arraste aerodinâmico. Na figura 11 e na tabela 1, é possível estabelecer uma relação entre a dianteira e a traseira de melhor coeficiente.

Figura 11 – Modelo utilizado nos estudos de Lay



Fonte: Nicolazzi e Rosa, 2001.

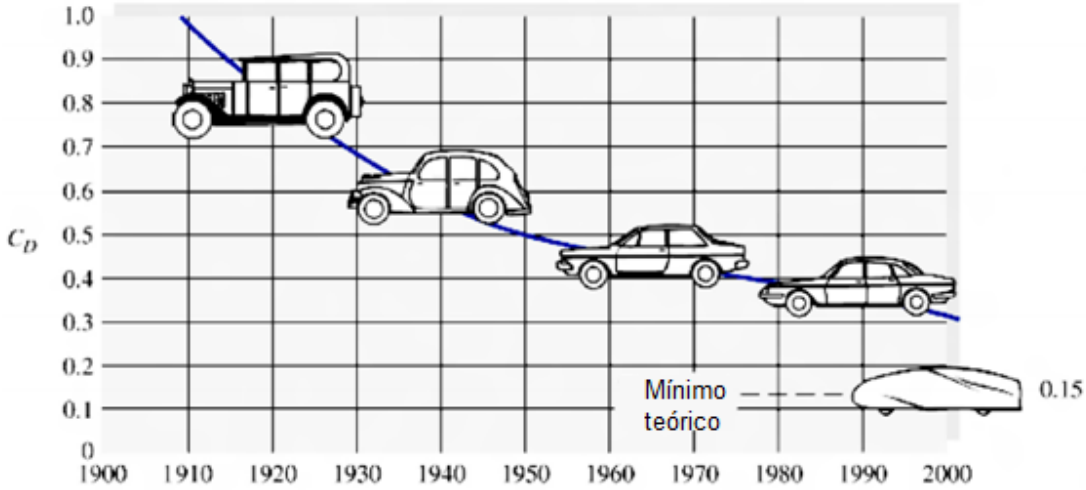
Tabela 1 – Coeficiente de arrasto comprimento/modelo

		Comprimento da traseira			
		W	X	Y	Z
Dianteira do veículo	d	0,35	0,35	0,32	0,24
	c	0,32	0,36	0,25	0,17
	b	0,3	0,23	0,21	0,12
	a	0,3	0,24	0,2	0,12

Fonte: Adaptado de Nicolazzi e Rosa, 2001.

Na figura 12, pode-se observar a evolução dos veículos na busca por um coeficiente de arrasto reduzido. As formas mais retas foram, ao passar dos anos, sendo suavizadas a fim de reduzi-lo.

Figura 12 – Evolução do coeficiente de arrasto mediante modernização do chassi de veículos



Fonte: White (adaptado), 1999.

2.4 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA VEICULAR

Nessa sessão, é importante, primeiramente, definir o conceito de eficiência energética. Para a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), “eficiência significa fazer mais (ou o mesmo) com menos, mantendo conforto e qualidade”. Assim, para energia, eficiência seria obter o mesmo trabalho com menos energia, obter o mesmo resultado com menos recursos naturais.

O Inmetro (Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia) disponibiliza tabelas em seu *website* de produtos averiguando seu desempenho considerando atributos como eficiência energética. Valores de consumo e emissões podem ser consultados para automóveis leves fabricados no Brasil.

Figura 13 – Tabela de consumo energético de veículos a combustão fornecida pelo INMETRO

INMETRO

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA

PROGRAMA BRASILEIRO DE ETIQUETAGEM - PBE

Tabelas de Consumo / Eficiência Energética
Veículos Automotores Leves
Categoria TODOS

PROGRAMA BRASILEIRO DE ETIQUETAGEM

Modelos com classificação PBE para ENCE
Comparação entre modelos participantes

Ano 2018
34 Marcas
1103 Modelos / Versões

Critérios para Classificação 5 Estrelas quanto a Redução da Emissão de Poluentes (NMHC-CO-NOx-CHO) relativa aos Limites do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores - PROCONVE L6

Abaixo dos 60% do limite	A
Entre 60% e 70% do limite	B
Entre 70% e 80% do limite	C
Entre 80% e 90% do limite	D
Entre 90% e o limite	E
o disponível no momento da publicação	ND

IBAMA MMA

Valor de CO_2 da emissão no escapamento referente ao combustível de origem fóssil não renovável.

conpet
programa nacional da racionalização do uso dos derivados do petróleo e do gás natural

Etiqueta Nacional de Conservação de Energia - ENCE

Classificação quanto ao consumo energético	Relativa à Categoria	Absoluta Geral
Menor consumo energético ▶	A	A
	B	B
	C	C
	D	D
Maior consumo energético ▶	E	E

Selo CONPET

Valores em km/l medidos em condições padrão de laboratório (NBR7024) e ajustados para simular condições mais comuns de utilização. Para veículos elétricos, km/l refere-se ao consumo equivalente a gasolina (km/l e). O consumo percebido pelo motorista poderá variar para mais ou para menos, dependendo das condições de uso. Para saber por que, consulte: www.inmetro.gov.br e www.conpet.gov.br

94 Modelos 9%

Categoria	Marca	Modelo	Versão	Motor	Transmissão Velocidades (nº)- Manual (M) Automática (A) Automática-Dupla-Embreagem- (DCT) Automatizada (MTA) Contínua (CVT)	Ar Cond. Sim (S) Não (N)	Direção Assistida Hidráulica (H) Mecânica (M) Elétrica (E) Eletro-hidráulica (E-H)	Combustível Elétrico (E) Gasolina (G) Flex (F) Diesel (D)	Emissões no Escapamento – Poluentes: NMHC (g/km)	CO (g/km)	NOx (g/km)	Redução Relativa ao Limite	Gás Efeito Estufa – Etanol: CO_2 fóssil (g/km)	Gasolina ou Diesel: CO_2 fóssil (g/km)	Quilometragem por Litro – Etanol: Cidade (km/l)	Estrada (km/l)	Gasolina ou Diesel: Cidade (km/l)	Estrada (km/l)	Consumo Energético (MJ/km)	Classificação PBE – Comparação Relativa na Categoria	Comparação Absoluta Geral	Selo CONPET de Eficiência Energética
Compacto	CHEVROLET	Onix (MY18)	1.0MT LS	1.0-8V	M-6	S	E	F	0,031	0,482	0,008	B	0	95	8,8	10,5	12,9	15,3	1,56	A	B	SIM
Compacto	CHEVROLET	Onix (MY18)	1.0MT LT	1.0-8V	M-6	S	E	F	0,031	0,482	0,008	B	0	95	8,8	10,5	12,9	15,3	1,56	A	B	SIM
Compacto	CHEVROLET	Onix Joy (MY18)	10MT JOYE	1.0-8V	M-6	S	E	F	0,031	0,467	0,010	B	0	95	8,8	10,6	12,9	15,3	1,55	A	B	SIM
Compacto	CHEVROLET	Onix (MY18)	1.4MT LT	1.4-8V	M-6	S	E	F	0,020	0,477	0,027	B	0	98	8,6	10,2	12,5	14,9	1,60	B	B	-
Compacto	CHEVROLET	Onix (MY18)	1.4MT LTZ	1.4-8V	M-6	S	E	F	0,020	0,477	0,027	B	0	98	8,6	10,2	12,5	14,9	1,60	B	B	-
Compacto	CHEVROLET	Onix (MY18)	1.4MT EFF	1.4-8V	M-6	S	E	F	0,020	0,477	0,027	B	0	98	8,6	10,2	12,5	14,9	1,60	B	B	-
Compacto	CHEVROLET	Onix (MY18)	1.4AT LT	1.4-8V	A-6	S	E	F	0,021	0,425	0,018	B	0	105	7,9	9,6	11,7	13,9	1,73	C	B	-
Compacto	CHEVROLET	Onix (MY18)	1.4AT LTZ	1.4-8V	A-6	S	E	F	0,021	0,425	0,018	B	0	105	7,9	9,6	11,7	13,9	1,73	C	B	-
Compacto	CHEVROLET	Onix (MY18)	1.4MT ACT	1.4-8V	M-6	S	E	F	0,029	0,549	0,013	B	0	102	8,3	9,4	12,4	13,8	1,68	C	B	-
Compacto	CHEVROLET	Onix (MY18)	1.4AT ACT	1.4-8V	A-6	S	E	F	0,021	0,420	0,019	B	0	114	7,7	8,6	11,2	12,6	1,85	D	C	-

Fonte: INMETRO, 2018.

Pelas definições sugeridas, pode-se analisar a eficiência dos veículos através de uma relação entre distância percorrida pelo consumo de energia.

$$E_{veículo} = \frac{\Delta d}{\Delta W} \tag{2}$$

Na busca pela eficiência, pode-se, então, priorizar-se o aumento da distância percorrida por um mesmo consumo ou ao mesmo tempo pela também redução do consumo energético.

2.5 FRENAGEM REGENERATIVA

Para veículos elétricos, uma das medidas adotadas alinhadas com a definição de eficiência é a frenagem regenerativa, isso é, ao se frear o veículo, parte da energia cinética é recuperada e armazenada em forma de energia elétrica e pode ser reutilizada pelo motor ao invés de ser desperdiçada. Ao passo que veículos a combustão, tipicamente dissipam completamente em calor a energia, mediante frenagem.

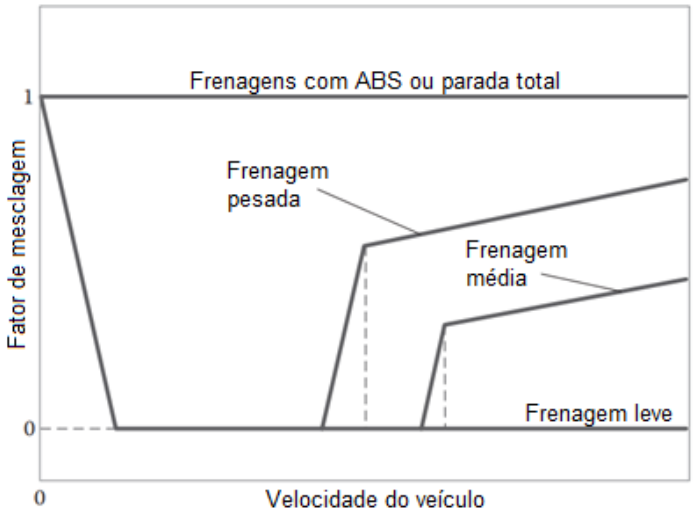
O freio regenerativo implica diretamente em um balanço adequado do freio, necessitando dessa forma adequar o design do propulsor, uma vez que em veículos de alta performance até 80% da força de frenagem é feita no eixo frontal do carro, sendo o local muito mais adequado para recapturar a energia. Assim, não é diretamente aumentada a distância percorrida pelo carro (pois o carro está em processo de desaceleração), mas aumenta-se a distância máxima que o veículo pode percorrer. De acordo com Emadi (2015), a economia gerada por esse sistema varia entre 5% e 12% dependendo do percurso simulado para o veículo.

Dois métodos de frenagem regenerativa são propostos por Emadi (2015), sendo o primeiro o de frenagem totalmente integrada, a de mais complicada execução, mas a de melhor resultado, pois não apenas é a que mais aumenta a eficiência veicular, como também é a que melhor preserva a sensação natural de frenagem e desacelera o carro de acordo com a interpretação do sistema mediante ao uso do pedal do freio pelo condutor. O sistema leva em consideração, não apenas a posição em que o pedal se encontra, mas, também, a velocidade, além de outras variáveis de segurança e mecânicas do veículo. Um sistema típico consegue desacelerar até 0,3 g (onde g é a aceleração da gravidade, aproximadamente 9,81 m/s²). Já a

segunda metodologia, seria a de sobreposição, sendo essa pior do ponto de vista de eficiência energética, porém, de custo reduzido.

A frenagem em um veículo elétrico, para um sistema regenerativo, consiste de duas etapas. A primeira, onde a frenagem é feita pelo condutor, é suave, totalmente regenerativa, isso é, toda energia cinética recupera-se em forma de energia elétrica, assim, o motor atua como gerador, sendo a energia recuperada limitada tanto à capacidade máxima das baterias quanto ao pico de potência suportado pelo inversor. A segunda etapa ocorre quando a frenagem executada é mais brusca, sendo dissipada em calor, assim como, em veículos a combustão. Os desafios atuais da frenagem regenerativa consistem em ter um sistema regenerativo mesmo para frenagens mais fortes, onde as mais recentes proposições mecânicas para atingir este objetivo chegaram a níveis de desaceleração de até 0,4 g.

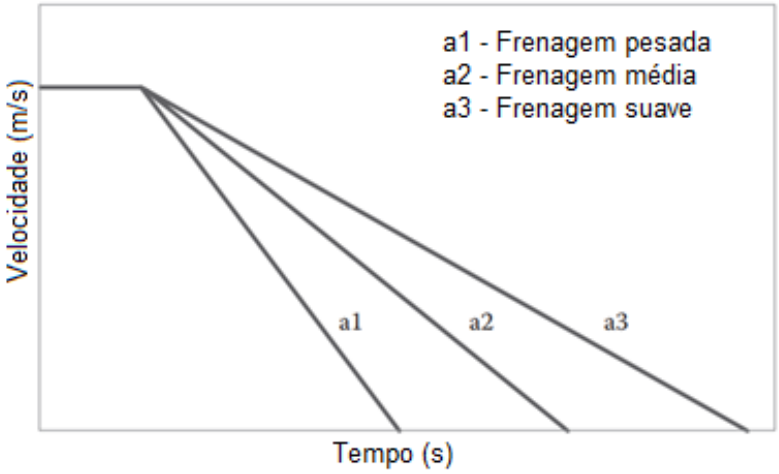
Figura 14 – Taxa de integração entre frenagem por fricção e regenerativa



Fonte: Emadi (adaptado), 2015.

A figura 14 descreve, ao longo da velocidade, a taxa de integração entre os dois tipos de frenagem. Pode-se observar que para frenagens leves, atualmente, é possível ser reaproveitada toda energia cinética em elétrica. Já para frenagens médias e bruscas, é possível analisar que o sistema já passa a utilizar parte da frenagem por fricção para atender as necessidades de desaceleração do conduto. Em baixas velocidades, o veículo fica a mercê de frenagens mecânicas, uma vez que, o torque em máquinas elétricas, operando como gerador, é baixo demais para possibilitar a desaceleração do veículo.

Figura 15 – Tempo de parada para diferentes tipos de frenagem



Fonte: Emadi (adaptado), 2015.

Ainda, pela análise da figura 14 e 15, justifica-se o uso dos dois tipos de frenagem em um mesmo veículo. Isto é, seria possível para um veículo frenar por completo apenas com o propulsor elétrico, no entanto, analisando-se as curvas a1 e a2, percebe-se a necessidade muito mais urgente de frenagem, que necessita de uma potência muito mais elevada, que não seria possível apenas com o motor elétrico (atuando como gerador). Em terrenos escorregadios, frenagens que fazem o uso da tecnologia ABS (*Antilock Braking System*) acarretarão na suspensão da regenerativa, dada a complexibilidade do controle de frenagem. Assim, como o veículo não tem como objetivo atingir altas velocidades, será colocado a prova no desenvolvimento deste projeto, se há a necessidade de ser implementada a frenagem por fricção ou se apenas a frenagem regenerativa já atende, inclusive, aos requisitos de segurança aqui discutidos.

2.6 RECARGA DE BATERIA

Um dos grandes desafios para a aceitação de veículos elétricos é a questão do recarregamento das baterias. Culturalmente, é desejável que o veículo tenha o carregamento extremamente rápido, isto é, para veículos a combustão, é normal que o processo tome minutos para ser executada, ao passo que para a energia elétrica, o processo é muito mais lento e resulta sempre em uma energia total expressivamente menor (vide comparativo feito na seção baterias com gasolina). Por isso, meios que agilizam a transferência de energia vêm sendo estudados. Não apenas isto, pela autonomia dos veículos elétricos ser tão baixa, é

desejável não apenas aumentar a capacidade total das baterias mas também reduzir o tempo de carregamento.

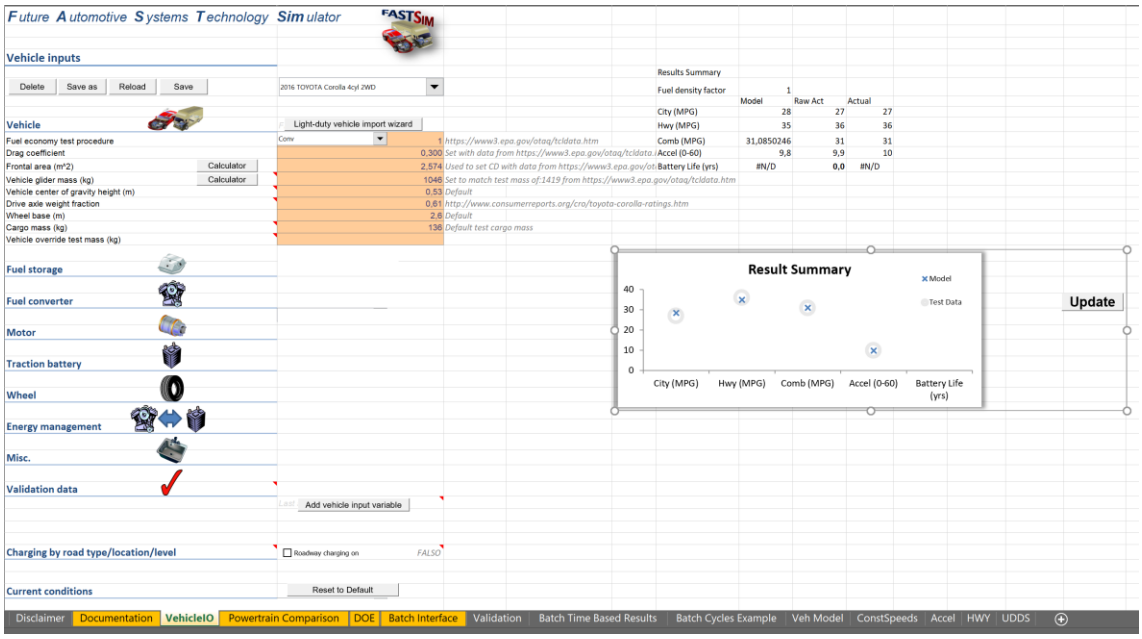
Uma das primeiras alternativas é a de se criar estações de carga, análogas ao que hoje se tem por postos de combustível. Porém, destaca-se aqui que ainda que se tenham altas tensões, corrente e potência elevada, a recarga ainda seria bastante lenta quando comparada ao reabastecimento de gasolina. Outra, trocando-se as baterias descarregadas por totalmente carregadas, assim o tempo seria apenas da troca, igualando-se a sua contra partida.

Todavia, a tecnologia de maior estudo ou de maior interesse é o de recarregamento wireless, conhecido por WPT (W*ireless Power Transfer*). Este se divide em dois tipos: 1) a de campo distante que transfere altas potências por longas distâncias, através do uso de radiação de micro-ondas, no entanto, ainda impossível de ser feito em veículos elétricos, dada a necessidade de se utilizar grandes antenas e sistemas de rastreamento complexos; e 2) a de campo próximo faz uso de campo elétrico, o que tem como benefício de não ser afetado por presença de metal e ainda menor interferência eletromagnética do que por campo magnético, para transferência de média potência por curta distância.

2.7 FASTSim

Este *software* foi utilizado neste trabalho como principal meio de verificar a eficiência e, portanto, a possibilidade da implementação de um veículo elétrico no campus da UFSM. É composto de diversas planilhas (*Excel*), onde o usuário insere dados técnicos do carro (como, por exemplo, capacidade bateria, potencia motor, diâmetro das rodas, entre outros), ou escolhe um carro já cadastrado o aplicativo, escolhe as rotas a serem calculadas, define-se o valor corrente de combustível, eletricidade, entre outros. Os valores simulados são muito próximos, quando não idênticos aos valores fornecidos pelos fabricantes.

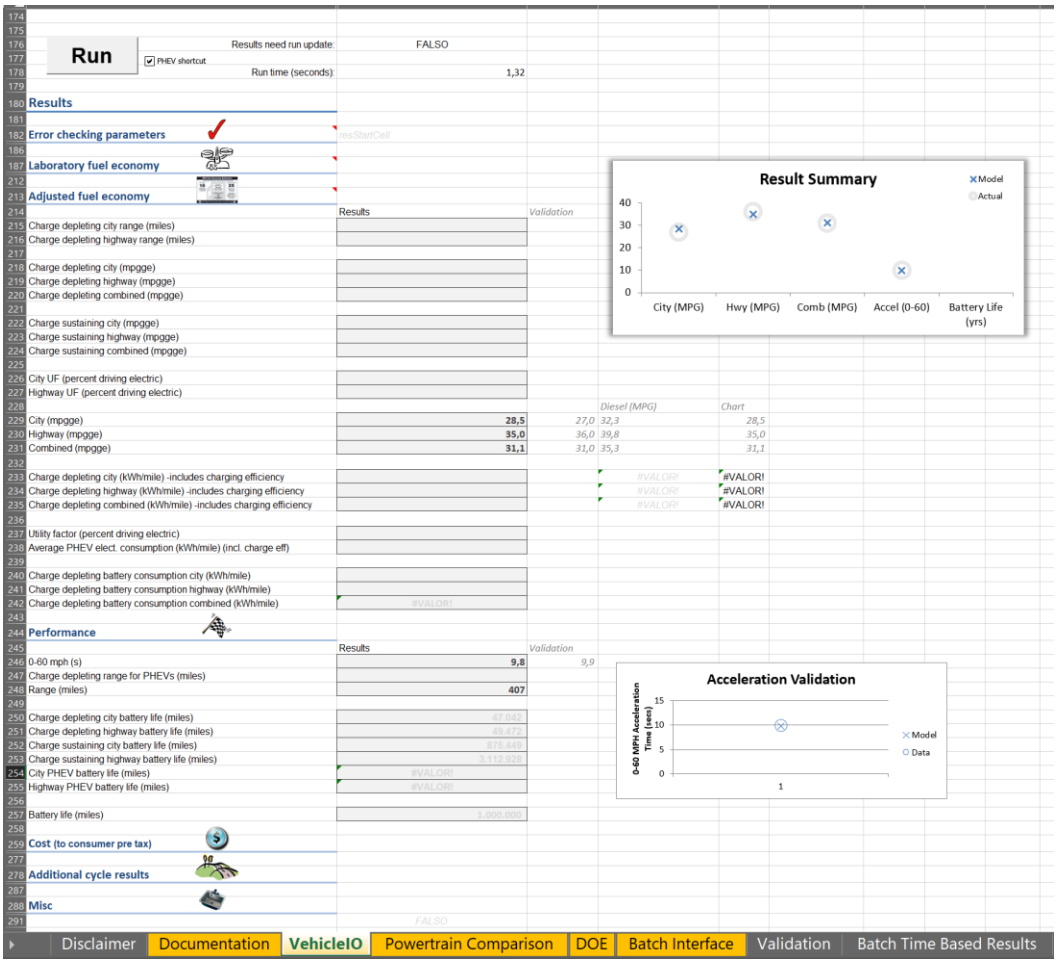
Figura 16 – Aba principal do FASTsim



Fonte: o autor (2018).

Não se limitando apenas a veículos elétricos, mas, também é possível a simulação de veículos a combustão e híbridos, o que é essencial para fazer-se a comparação aqui proposta.

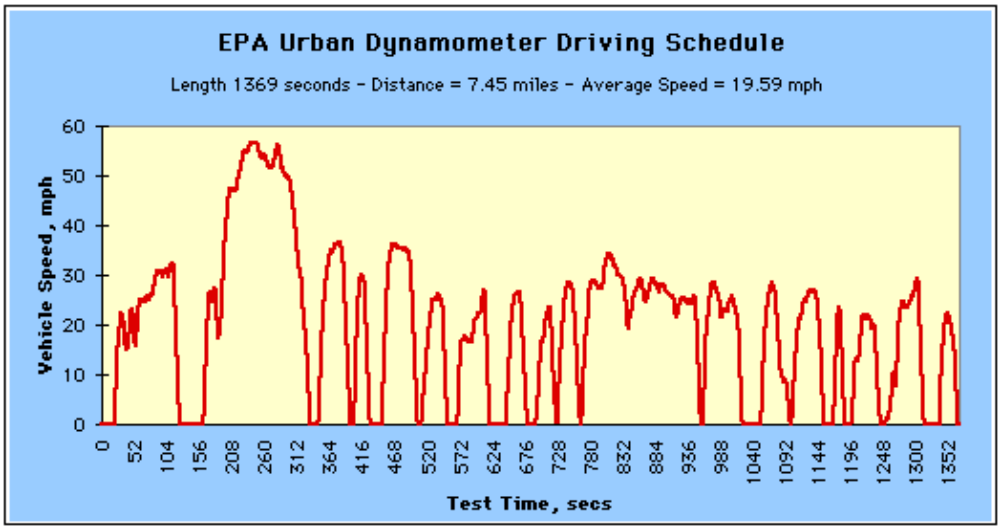
Figura 17 – Resultados da simulação



Fonte: o autor (2018).

As duas principais rotas são padrão da EPA (*Environmental Protection Agency*): UDDS (*Urban Dynamometer Driving Schedule)* e HWFET (*Highway Fuel Economy Driving Schedule*).

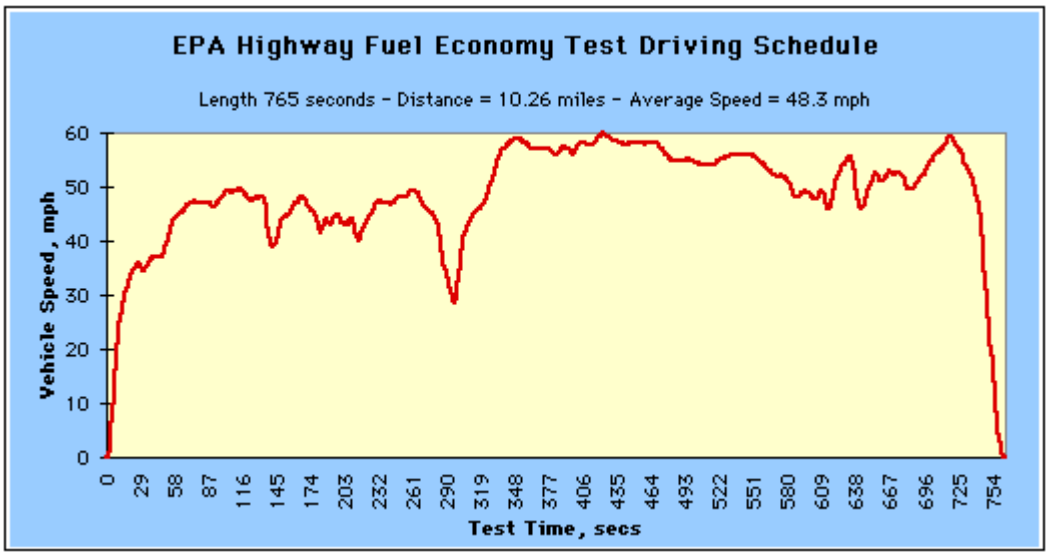
Figura 18 – Curva velocidade/tempo – simulação UDDS, 1369 segundos de duração, distância de 7,45 milhas e velocidade média de 19,59 milhas/h



Fonte: EPA, 2018.

O primeiro refere-se a um teste realizado para se simular a locomoção em uma cidade, se refere a uma modalidade de carga leve e tem características de velocidade de acordo com a figura 19.

Figura 19 – Curva velocidade/tempo – simulação HWFET, 765 segundos de duração, distância de 10,26 milhas e velocidade média de 48,3 milhas

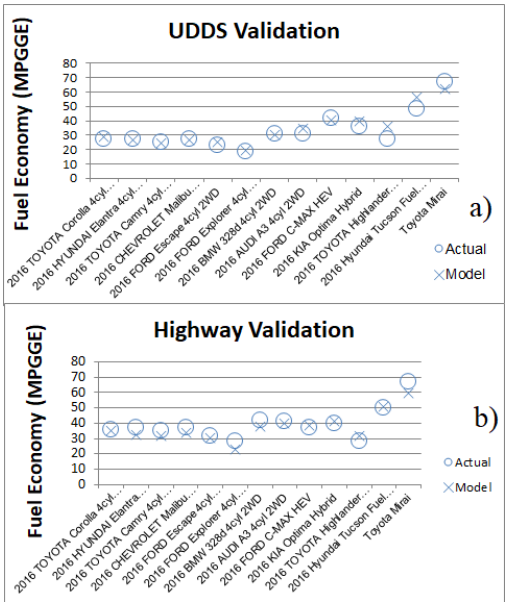


Fonte: EPA, 2018.

O segundo descreve o teste de rodovia com velocidade inferior a 60 milhas/hora (96,552 km/h) e tem a curva de velocidade na figura 19.

O FASTsim possui alta confiabilidade, já que resultados obtidos através de suas simulações, são bastante similares aos fornecidos pelos próprios fabricantes. Essas informações possuem uma planilha dedicada dentro do próprio arquivo sob o nome de “validation”.

Figura 20 – a) validação UDDS, b) Validação HWFET. Círculo dados oficiais do fabricante, em X dados obtidos pela simulação do *software*



Fonte: o autor, 2018.

O resultado da autonomia veicular encontrada nos testes é dada pela média dos dois testes (HWFET e UDDS) em milhas e pela autonomia em kWh/milha para veículos elétricos, e em MPGge (*Miles Per Gallon Gasoline Equivalent*), e serão então adaptados para kWh/km e km/l para este projeto.

2.8 MPGGE

Selo que descreve a quantidade de milhas/galão criado pelo órgão estadunidense EPA (*Environmental Protection Agency*), em 1970, de maneira a padronizar a economia, eficiência de veículos e facilitar o entendimento de consumidores, à combustão, na época.

Em 2013 o selo incorporou diversas informações, entre essas:

- Estimativa de quanta energia é necessária para percorrer 100 milhas (160,93 km);
- Estimativa da autonomia e tempo de recarga do veículo;

- Método de comparação de consumo de energia entre veículos a combustão e veículos elétricos (EPA, 2018).

A conversão de eficiência é feita diretamente, isso é, um galão de gasolina norte-americana possui 33,7 kWh logo:

$1\ MPGge = \frac{1\ milha}{33{,}7\ kWh} = \frac{1{,}6093\ km}{33{,}7\ kWh} = \frac{0{,}04775\ km}{1\ kWh} = \frac{0{,}013\ km}{1\ MJ}$ (3) (EPA, 2011).

Assim pode-se analisar para um método mais próximo da realizada no Brasil, isto é, km/l. Se em 3,7854 litros de gasolina há 33,7 kWh de energia a quantidade de energia em 1 litro deve ser:

$$1\ galão = 3{,}7854\ litros\ (4)$$

$$\frac{33{,}7\ kWh}{1\ galão_{gasolina}} = \frac{8{,}9026\ kWh}{1\ litro_{gasolina}}\ (5)$$

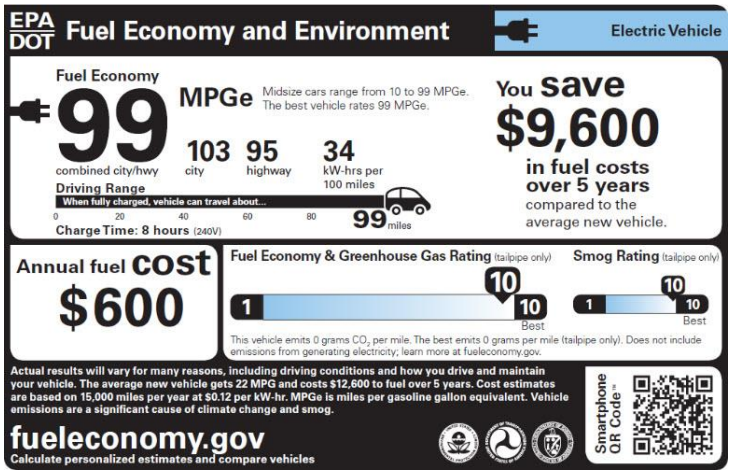
$$1\ MPGge = \frac{0{,}04775\ km}{1\ kWh}$$

Com 8,9026 kWh (um litro de gasolina em CNTP), tem-se que:

$$1\ MPGge = 0{,}4251\ km/l$$

Esta nomenclatura vem para atender a demandas atuais isto é, não só incluir veículos elétricos, mas, também, tornar a nova forma compatível e comparável a original para que seja compreendido facilmente pelo consumidor leigo.

Figura 21 – Selo EPA de um veículo elétrico



Fonte: EPA, 2018.

Na figura 21, é possível visualizar todos os dados do selo já adaptados para um veículo elétrico. Assim, 99 MPGe não descreve, em realidade, o consumo de gasolina ou álcool nos testes, mas sim, o equivalente de energia elétrica proveniente de baterias. Pode-se, então, imediatamente fazer a conversão para melhor entendimento:

$$1\ MPGge = 0{,}4251$$
$$99\ MPGge = Eficiência$$

$$Eficiência = \frac{42{,}0849\ km}{1\ litro - equivalente_{gasolina}}$$

Ainda, é possível ver ao lado, a eficiência do veículo na cidade, na rodovia, o consumo de energia elétrica para se percorrer 100 milhas e abaixo o tempo de recarga da bateria a uma tensão de 240 V de 0% até 100%.

Importante para a análise deste selo é não apenas a conversão para km/l, como, também, a compreensão que a densidade de energia agregada a gasolina aonde o selo foi criado é de 8902,6 Wh ao passo que no Brasil é de 8890 Wh. Não apenas isso, como, também, políticas de aumento da porcentagem do álcool tornaram este dado, para o Brasil, não confiável (VASCONCELOS, 2017).

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 RELAÇÃO PESO E AUTONOMIA

Pelas averiguações do Inmetro, veículos a combustão, popularmente conhecidos como econômicos, tais como o *Volkswagen UP* e o *Fiat Mobi*, por serem compactos, leves e de motores moderados são capazes de atingir eficiências, na casa de 1,4 MJ/km (16,3km/l). Ainda que sejam carros realmente eficazes, ambos estão sujeitos a enormes perdas regulares de veículos que usam combustíveis fósseis para propelir o seu motor, assim vale o comparativo, ainda que não seja objeto de estudo deste projeto, com veículos híbridos (com motor a combustão e elétrico no mesmo veículo).

Tabela 2 – Comparativo de eficiência de diferentes motores para diferentes veículos

Veículo	**Consumo energético (MJ/km)**	**Propulsão**	**Peso (kg)**	**Motor**
Volkswagen up! TSI move (rodas aro 14)	1,4	Combustão	951	1.0(105cv)
Fiat Mobi DRIVE GSR	1,43	Combustão	965	1.0(77cv)
Ford Fusion Hybrid	1,31	Híbrido	1670	2.0 (190cv)
Ford Fusion FWD SEL	2,27	Combustão	1626	2.0 (248cv)
Toyota Prius NGA	1,15	Híbrido	1400	1.8 (98cv)
Renault Zoe NR	0,65	Elétrico	1468	Elétrico (88cv)

Fonte: Adaptado de Inmetro, 2018.

Pode-se observar pela tabela 2, a facilidade de um veículo que tem em seu conjunto um motor elétrico, tem de ser mais eficaz. Isto é, na tabela estão presentes os carros a combustão mais eficientes possíveis, e ainda assim, ficam atrás se comparados ao *Fusion Hybrid*, que é um carro muito mais pesado, com motor muito mais potente.

Ainda, faz-se uma comparação direta entre duas versões do *Fusion*, uma dispõe apenas do motor a combustão (FWD SEL), e outra do conjunto elétrico e combustão (*Hybrid*), nela

pode-se ver que o primeiro consome 73,28% a mais. Certamente, muito da potência é perdida (58cv), mas como o foco deste projeto é trazer um veículo eficiente, leve e de baixa potência, começa-se observar uma tendência, através dessa tabela nos benefícios de balancear-se corretamente eficiência, peso e potência do motor.

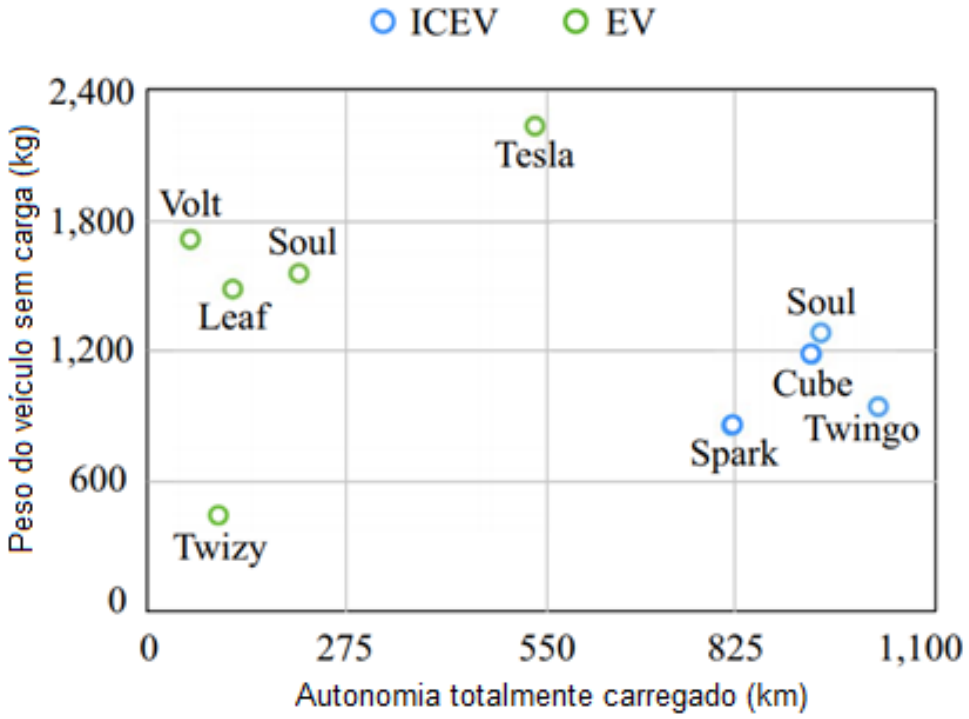
Dentre os dois híbridos presentes, o *Toyota Prius* destaca-se pelo consumo energético reduzido, ao custo de quase metade da potência do *Fusion Hybrid*. Por fim, destaca-se o veículo *Renault Zoe*, como o único veículo totalmente elétrico desta tabela, que obteve um consumo energético expressivamente inferior aos demais carros. Assemelha-se um tanto aos primeiros veículos a combustão da tabela, como pode ser visto nas figura 22. Porém, cerca de 50% mais pesado, o que comprova, não deixando margens para dúvidas, a superioridade deste em termos de consumo energético.

Figura 22 – Renault Zoe

Fonte: Napol, 2016.

Faz-se um comparativo similar ao anterior, mas, ao invés de, se comparar o consumo energético ao peso, comparou-se a autonomia de veículos a combustão com veículos elétricos, traz a tona outro problema, ausente para o primeiro. É evidente a disparidade, dado que às baterias utilizadas atualmente não dispõe de grande densidade de energia.

Figura 23 – Autonomia de veículos completamente abastecidos e carregados



Fonte: Baek, Hong e Chang (adaptado), 2017.

É nesse mesmo contexto que surge um outro problema: pelo medo de ficar sem autonomia, preso na estrada, usuários de veículos elétricos deixam inutilizadas cerca de 30% de suas baterias. Por exemplo, um veículo com autonomia de 180 km dificilmente chegará a percorrer 120 km com uma bateria totalmente carregada, reduzindo ainda mais de certa maneira a autonomia do veículo (BAEK, HONG, CHANG, 2017).

Na figura 23 (em azul à combustão e em verde, elétricos), é possível ver que os veículos elétricos possuem autonomia, significativamente, inferior aos a combustão – cerca de 1/4e ainda assim mais pesados. Mesmo assim, são veículos mais notáveis por dispor de mais autonomia, como os *Tesla,* ainda estão na metade da curva e possuindo muito mais peso de carga.

3.2 VEÍCULOS A PROPOR

Algumas considerações são feitas para elaborar um comparativo adequado a proposta do trabalho:

- Baixa potência: até 20 cv;

- Velocidade máxima: até 40 km/h;
- Capacidade: seis pessoas (motorista + cinco pessoas).

O número mínimo de pessoas segue o padrão da indústria, ao propor assento para seis pessoas, mas, também, de maneira a possibilitar a locomoção de mais pessoas no veículo. Ainda, a seleção do veículo ideal dará preferência àquele que obtiver a melhor autonomia, mas, não necessariamente, haverá uma bateria de capacidade mínima para as primeiras escolhas da mesma maneira que um peso máximo não será definido, apenas preferido.

3.2.1 Tramontina *Elettro 320CP*

Esse é um veículo elétrico de baixa potência da fabricante brasileira *Tramontina*, é produzido, também, no Brasil e é capaz de transportar até seis pessoas, assim como desejado.

Figura 24 - *Elettro 320CP*

Fonte: Tramontina, 2018.

O utilitário ainda tem outras características desejadas como motor e velocidade que estão mais bem detalhados na tabela a seguir. Além disso, a bateria usada é de chumbo-ácido.

Tabela 3 – Especificações *Elettro 320CP*

Motor	6,79293 cv
Velocidade máxima	25 km/h
Capacidade	6 pessoas + 250kg (peso suportado na caçamba)
Peso	680 kg
Bateria	9 KWh
Largura x Altura	1355 mm x 2115 mm
Roda	205/50 – 10”

Fonte: Elaborada a partir de dados da fabricante (Tramontina), 2018.

3.2.2 Club Car *Carryall 700*

Mantendo as especificações citadas anteriormente, esse veículo é fabricado pela empresa americana *Club Car*, e com notável destaque para esse projeto, possui um equivalente, de mesmo modelo, porém com motor a combustão que também será avaliado.

Figura 25 – *Carryall 700*

Fonte: CompactCar, 2018.

As especificações dos veículos podem ser acompanhadas na tabela 5, ademais, é importante frisar que não há suporte para uma caçamba extra como no veículo anterior, limitando a capacidade a seis pessoas, apenas. Apesar do veículo elétrico possuir uma

potência expressivamente menor do que o a gasolina, o chassi é o mesmo, sendo válido para a análise.

Tabela 4 – Especificações *Carryall 700*

	Elétrico	Gasolina
Motor	3,7513 cv	14,1942 cv
Velocidade máxima	27 km/h	27 km/h
Capacidade	6 pessoas	6 pessoas
Peso	630 kg	480 kg
Energia	9 KWh	17,6 L
Largura x Altura	1277 mm x 1795 mm	1277 mm x 1795 mm
Roda	215/50 – 10”	215/50 – 10”

Fonte: Elaborada a partir de dados da fabricante (Clubcar), 2018.

É possível, ainda, de se adquirir esse veículo com o pacote de baterias “extended”, aumentando a capacidade máxima para 10,72 KWh. A inclusão do pacote adicional de baterias também implica em um incremento de 11 kg no peso total do veículo.

Além disso, esse veículo é bastante modelável, sendo possível customizá-lo a gosto do consumidor. É possível, por exemplo, substituir assentos por uma caçamba ou colocar vidros ao redor do carro.

Figura 26 – *Carryall 700* customizado com caçamba

Fonte: Clubcar, 2018.

Ainda que, fugindo do escopo do trabalho, pode-se salientar a grande vantagem de um motor mais potente, este sendo o a gasolina para o transporte de cargas mais pesadas.

3.2.3 Yamaha Concierge 6

Veículo para seis pessoas da fabricante japonesa *Yamaha*. Possui todas as demandas solicitadas e ainda um equivalente, de mesmo nome, com motor a combustão.

Figura 27 – *Yamaha Concierge 6* elétrico

Fonte: Yamaha, 2018.

Tabela 5 – Especificações *Yamaha Concierge*

	Elétrico	Gasolina
Motor	6,7929 cv	11,5581cv
Velocidade máxima	31 km/h	31 km/h
Capacidade	6 pessoas	6 pessoas
Peso	690 kg	462 kg
Energia	12,08 KWh	24 L
Largura x Altura	1200 mm x 1910 mm	1200 mm x 1910 mm
Roda	215/60 – 8”	215/60 – 8”

Fonte: Elaborada a partir de dados da fabricante (Yamaha), 2018.

Observa-se um peso consideravelmente inferior ao veículo a gasolina, pela presença de oito baterias de 6V de ácido chumbo a mais no veículo elétrico. Da mesma forma que o veículo anterior, as potências, apesar de divergentes, são para um mesmo chassi.

4 METODOLOGIA

Para as simulações de projeto, foi utilizado o *software* NREL FASTsim. Onde para se obter a autonomia veicular é necessário informar dados de motor, bateria, carcaça e rodas. Nas simulações foram utilizados os valores fornecidos pelo próprio fabricante. De forma a aumentar a confiabilidade dos resultados do consumo alterou-se para todos os testes a faixa de operação do veículo em relação a capacidade da bateria, assim o programa passou a considerar de 90% até 0%, sendo, anteriormente, de 98% a 5%.

Foram feitas quatro simulações independentes para os veículos aqui apresentados. Cada uma com um propósito diferente para a análise de diferentes aspectos que contemplam este projeto. As características da metodologia de cada uma delas são elencadas abaixo:

- Primeira simulação: a mais simples de todas, isto é, o programa não foi alterado além da entrada das características padrões do veículo. O que foi feito de diferente apenas é a mudança da carga veicular padrão de 136 kg para 420 kg, isto é, considerando a completa ocupação dos assentos (seis pessoas, 70 kg cada uma). O principal objeto de estudo deste teste é adequar o veículo ao seu uso (aumento de peso) e compará-lo a outros veículos com selo EPA anteriormente abordado, uma vez que estes não possuem limitação de velocidade nos testes;
- Segunda simulação: similar a primeira simulação, porém alterando-se para 50% da ocupação veicular, 210 kg. Já neste teste, o objeto de estudo passa ser o impacto da redução do peso do veículo na autonomia, isto é, corroborando ou não com o que foi discutido no início desta seção;
- Terceira simulação: feita para atender a demanda deste projeto. Isto é, velocidade de até 40 km/h. Nesta etapa, poderá ser observado o quanto o consumo será afetado, uma vez que a carga sobre o motor será reduzida;
- Quarta simulação: mesmo propósito da terceira, porém, respeitando o limite de velocidade máxima estabelecida pelo fabricante.

As capacidades de baterias foram fidedignas às dos fabricantes, porém, analisar o impacto destas na autonomia, dois testes diferentes adicionais foram elaborados. O primeiro simulou o que aconteceria se fosse utilizada a mesma massa de bateria, porém, para níquel-cadmio. E o segundo para lítio-íon, visto que das baterias vigentes, as que possuem a pior densidade de energia e eficiência são as de ácido-chumbo utilizadas em todos os veículos.

Para que se limite a velocidade no *software* FASTsim, faz-se necessário o ajuste por instante do teste, mudando assim velocidades fixas ao longo do percurso para a velocidade desejada. Requerendo desta maneira um ajuste da rota e não veículo propriamente dito.

Ainda, reduziu-se de 300W para 100W as cargas auxiliares das simulações feitas. O principal elemento desta, o ar condicionado, não está presente nesses veículos, bem como, o rádio. Sendo assim, a carga remanescente descreve apenas as luzes dos veículos, já prevendo o pior caso possível.

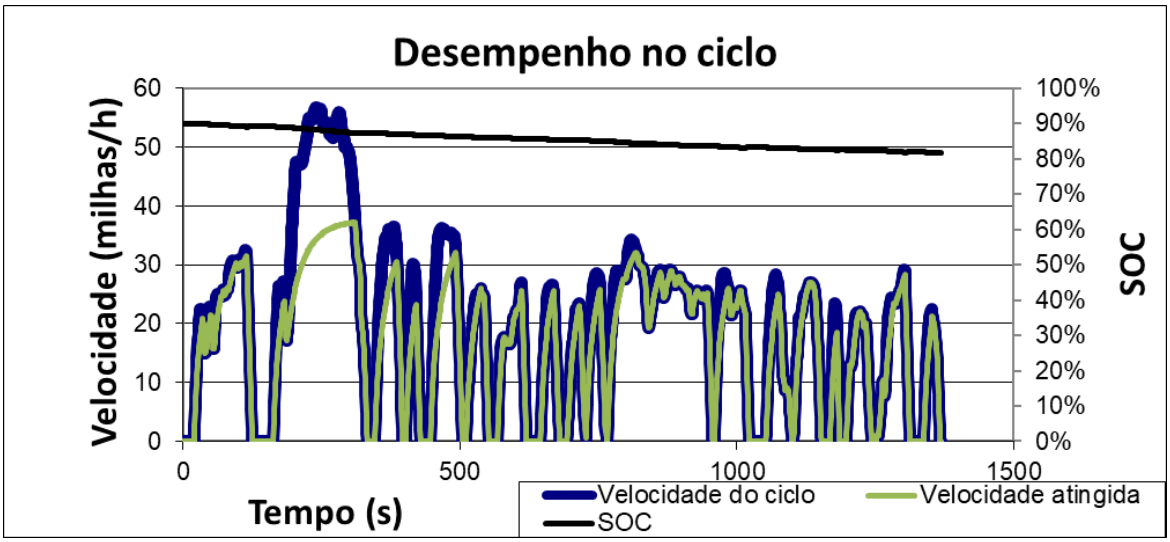
A eficiência de bateria padrão é de 98%, porém, referente a baterias de lítio. Assim, a eficiência considerada em todas as simulações feitas, foi de 75% uma vez que a bateria de todos os veículos é de chumbo-ácido.

4.1 SIMULAÇÃO 1

4.1.1 Tramontina *Elettro 320CP*

Nos testes, para o padronizado EPA, obteve 60,78 km e 60,25 km para os testes UDDS e HWY respectivamente. Pode-se analisar o ciclo na figura 28:

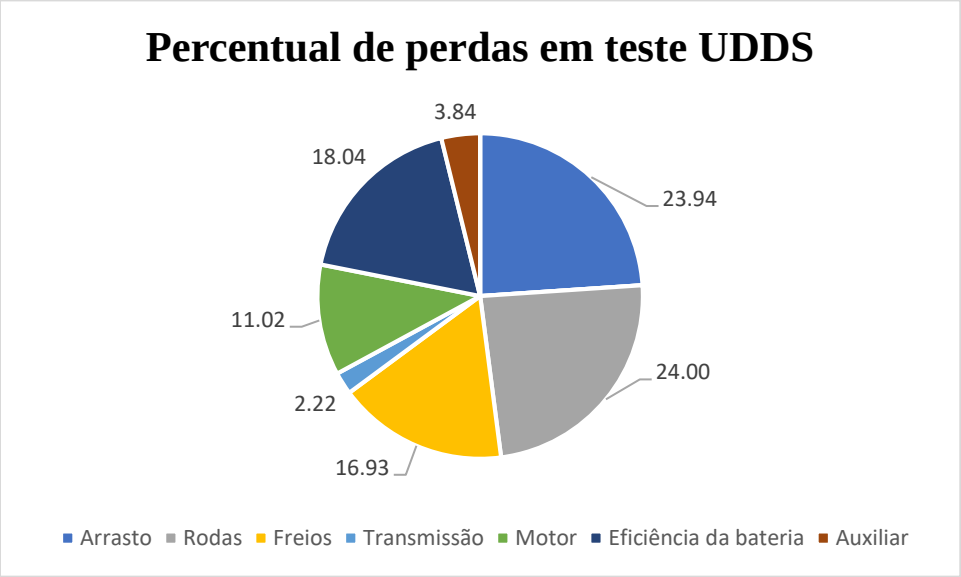
Figura 28 – Ciclo UDDS *Elettro 320CP* – simulação 1



Fonte: o autor (2018).

Destaca-se que o teste padrão (em azul) possui velocidades de até 60 milhas/h o que claramente não foi obtido pelo veículo. As principais limitações observadas são a potência do motor e a potência da bateria. A máxima velocidade atingida foi de 37 milhas/h (60,40 km/h). As perdas do teste foram obtidas de acordo com o gráfico a seguir.

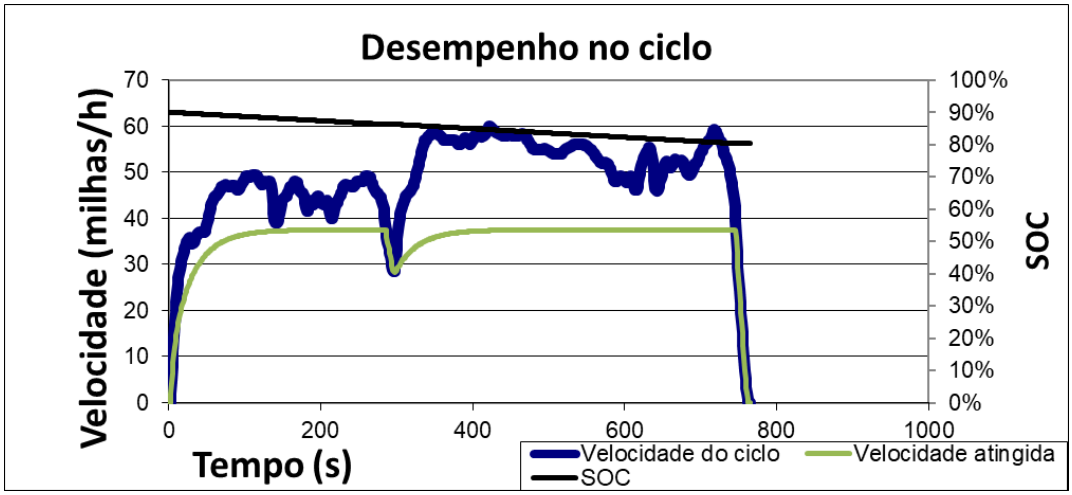
Gráfico 1 – Percentual de perdas em teste UDDS – simulação 1



Fonte: o autor (2018).

As maiores perdas encontradas foram por arrasto – 25,30%, seguidas de rodas – 23,39% e bateria – 18,10%. A mesma limitação foi naturalmente observada no teste em HWY descrito pela figura 29. Foi observado velocidades de até 60,80 km/h.

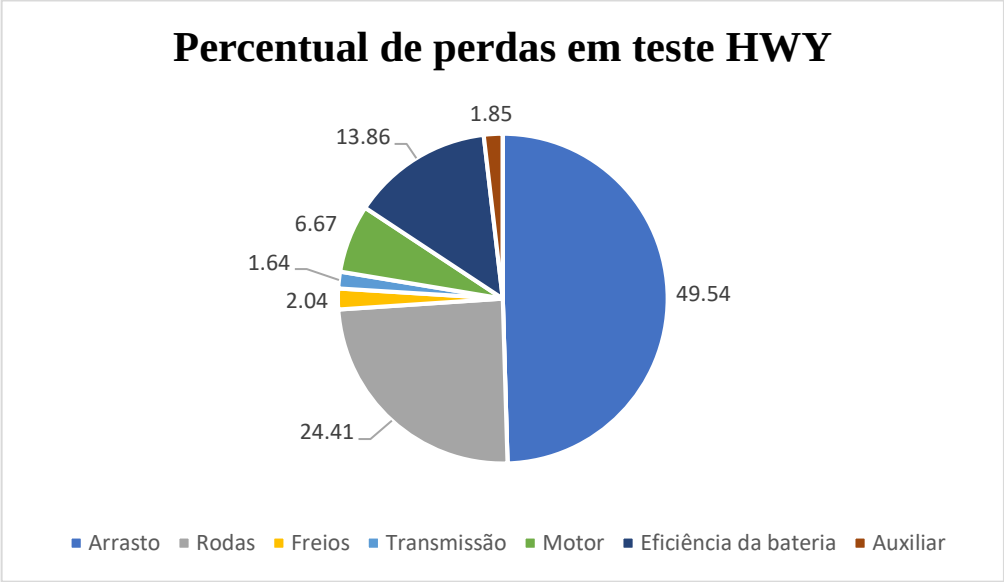
Figura 29 – Ciclo HWY *Elettro 320CP* - simulação 1



Fonte: o autor (2018).

O motor do veículo ainda demonstrou eficiência media de potência de 92,50% para o teste HWY e 91,20% no teste de UDDS. O consumo observado foi de 0,21 kWh/milha ou 0,13 kWh/km (UDDS) e 0,21 kWh/milha ou 0,13kWh/km (HWY). As perdas em rodovia são descritas pelo gráfico a seguir.

Gráfico 2 – Percentual de perdas em teste HWY – simulação 1



Fonte: o autor (2018).

É notável a dominância de perdas pelo arrasto, sendo menos da metade desta o segundo lugar, por rodas. A eficiência do automóvel UDDS pode ser dada por 1:

$$E_{veículo-UDDS} = \frac{\Delta d}{\Delta W} = \frac{60{,}78\ \text{km}}{0{,}9 * 9\text{kWh}} = 7{,}50\,\frac{km}{kWh}\,ou\ 157{,}15\ MPGge$$

E HWY, por:

$$E_{veículo-HWY} = \frac{\Delta d}{\Delta W} = \frac{60{,}25\ \text{km}}{0{,}9 * 9\text{kWh}} = 7{,}43\,\frac{km}{kWh}\,ou\ 155{,}78\ MPGge$$

Sendo, portanto, o *score* combinado:

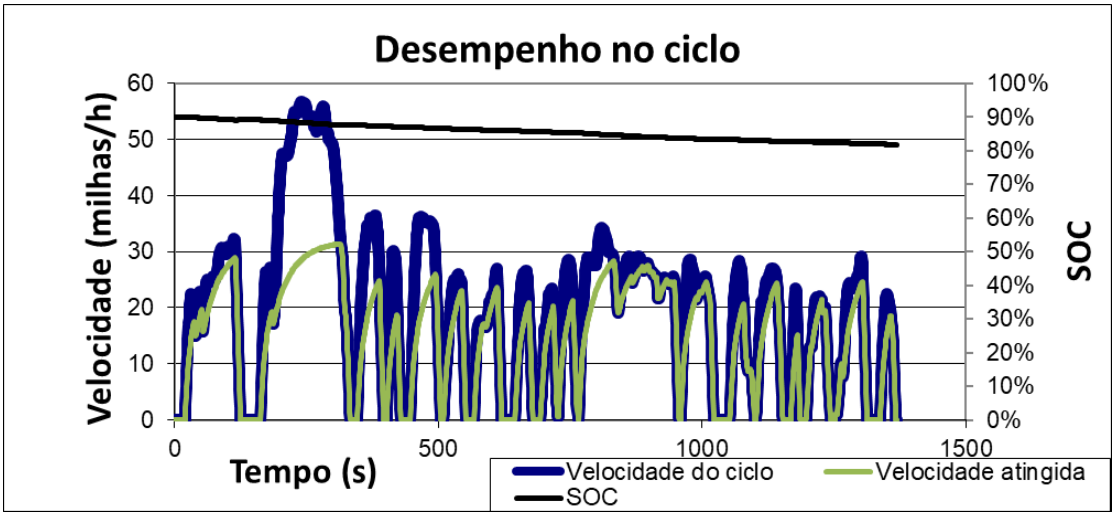
$$E_{veículo} = 0{,}55 * E_{veículo-UDDS} + 0{,}45 * E_{veículo-HWY} = \ 156{,}54\ MPGge$$

A energia recuperada pelo freio regenerativo foi de 1,75 kWh no teste UDDS e 167,76 Wh no HWY.

4.1.2 *Carryall 700* elétrico

No teste UDDS o veículo obteve autonomia superior ao *Elettro 320CP* testado anteriormente. Justificado pela redução de potência de motor e chassi de menores dimensões, obteve 69,67 km e consumo de 0,11 kWh/km. A figura 30 ajuda a compreender o impacto do motor neste teste, sendo bem menos capaz de atender as velocidades que o primeiro, obtendo velocidade máxima de 50,52 km/h. A energia recuperada pela frenagem regenerativa foi de 1,15 kWh com eficiência do motor média de 91,80 %.

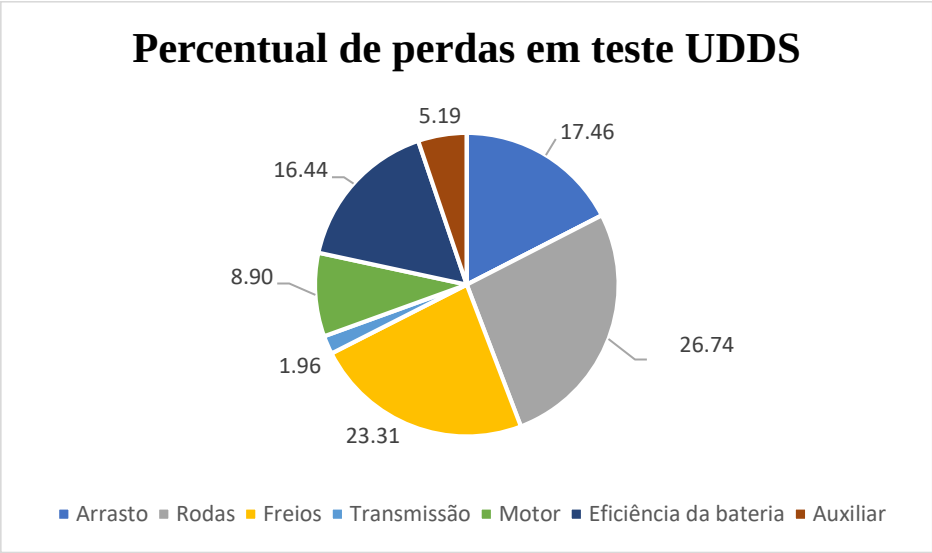
Figura 30 – Ciclo UDDS *Carryal 700* – simulação 1



Fonte: o autor (2018).

Verificam-se ainda as perdas no teste pelo gráfico a seguir.

Gráfico 3 – Percentual de perdas em teste UDDS - simulação 1

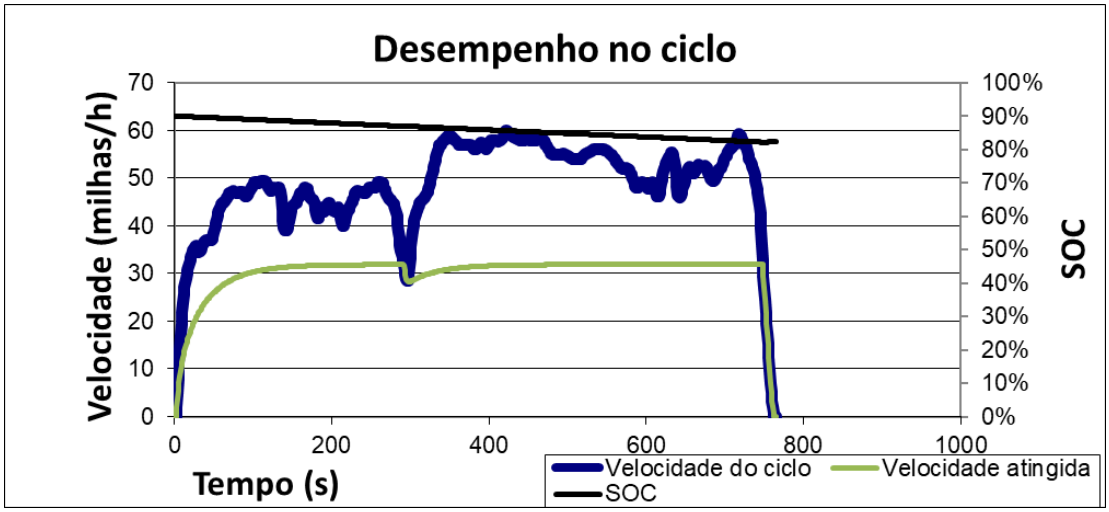


Fonte: o autor (2018).

O maior impacto de consumo é proveniente das rodas, seguido de freios e arrasto. Mostrando, assim, o benefício trazido por um chassi de menores dimensões. Para o teste

HWY, obteve autonomia de 83,44km e consumo de 0,09 kWh/km, o resultado do ciclo pode ser visto abaixo na figura 31.

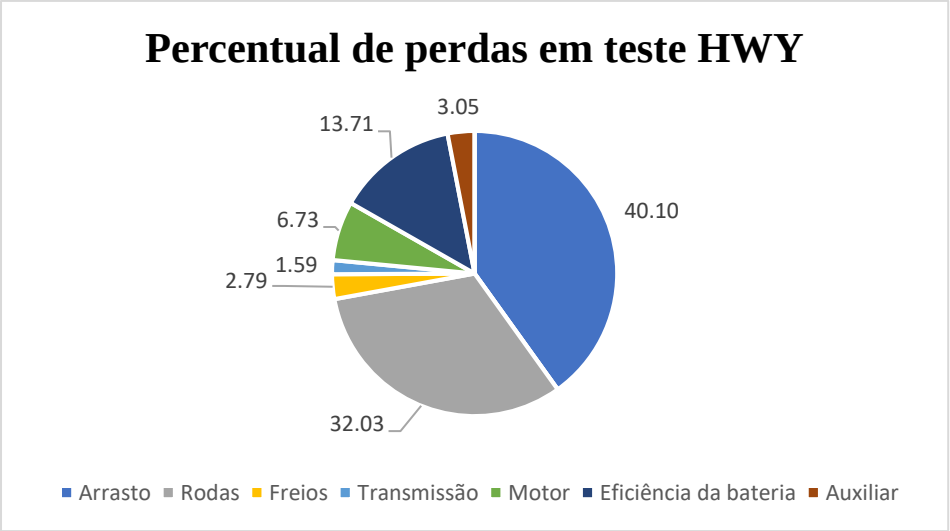
Figura 31 – Ciclo HWY *Carryall 700* – simulação 1



Fonte: o autor (2018).

Apresentou velocidade máxima de 51,28 km/h e recuperação por frenagem regenerativa de 119,39 Wh com eficiência de motor de 92,20 %. As perdas do veículo são vistas no gráfico abaixo:

Gráfico 4 – Percentual de perdas em teste HWY – simulação 1



Fonte: o autor (2018).

Há a dominância de perdas por arrasto, seguida de perdas na roda e em último lugar perdas de eficiência da bateria. A eficiência do automóvel UDDS pode ser dada por 1:

$$E_{veículo-UDDS} = \frac{\Delta d}{\Delta W} = \frac{69{,}67\ \text{km}}{0{,}9 * 9\text{kWh}} = 8{,}60\,\frac{km}{kWh}\,ou\ 180{,}13\ MPGge$$

E HWY, por:

$$E_{veículo-HWY} = \frac{\Delta d}{\Delta W} = \frac{83{,}44\ \text{km}}{0{,}9 * 9\text{kWh}} = 10{,}30\,\frac{km}{kWh}\,ou\ 215{,}74\ MPGge$$

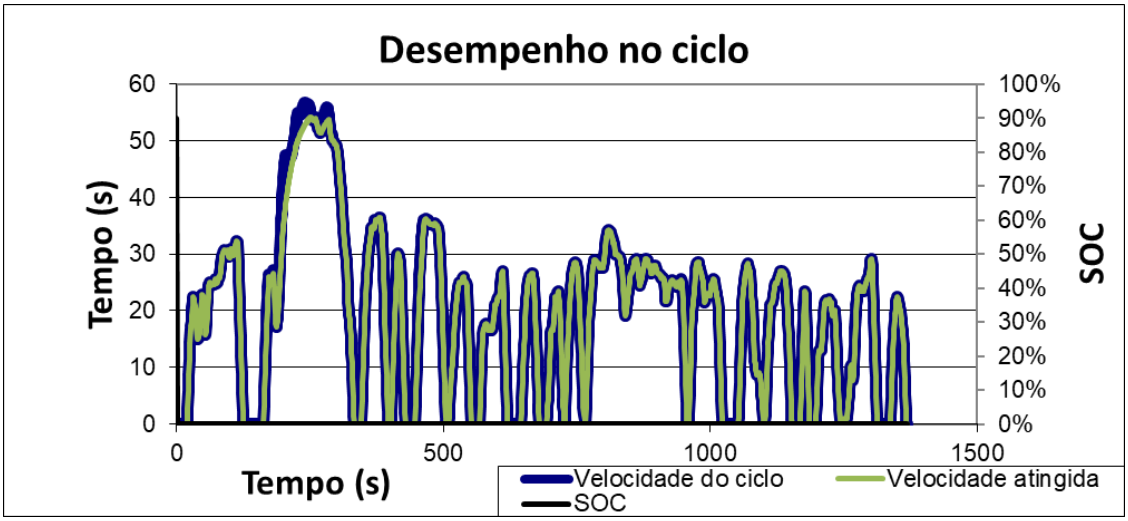
Sendo, portanto, o *score* combinado:

$$E_{veículo} = 0{,}55 * E_{veículo-UDDS} + 0{,}45 * E_{veículo-HWY} = 196{,}15\ MPGge$$

4.1.3 *Carryall 700* a combustão

O veículo a combustão obteve 398,52 km de autonomia em ciclo urbano e 338,12 em ciclo rodoviário. Demonstrando assim excelentes autonomias em relação ao seu equivalente elétrico.

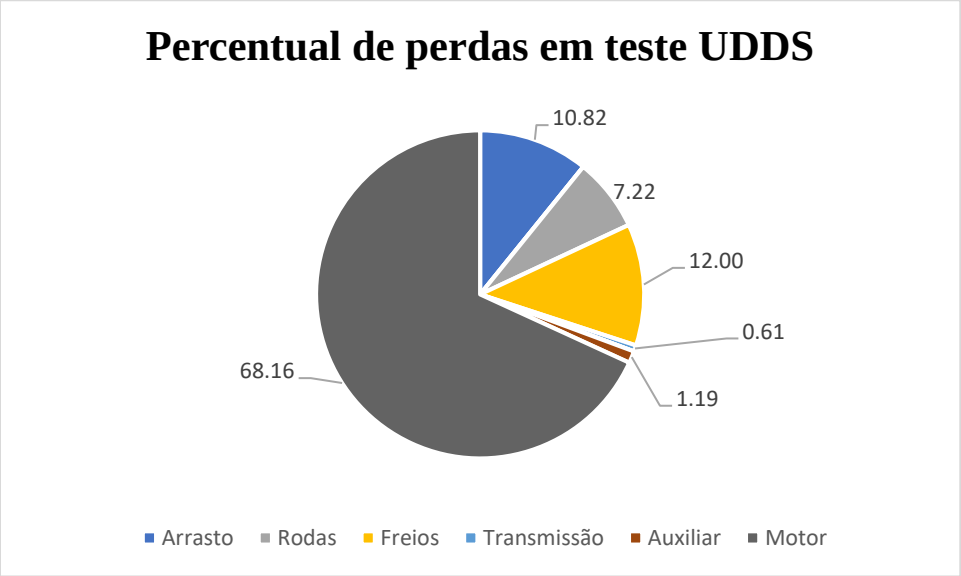
Figura 32 – Ciclo UDDS *Carryall 700* a combustão – simulação 1



Fonte: o autor (2018).

O ciclo urbano, figura 32, se demonstrou bastante digno a curva real do teste, apenas não atingindo exatamente a velocidade máxima do teste, no entanto, chegando muito próxima a ela – 87,26 km/h, obtendo eficiência de motor de 31,80% e 53,80 MPG ou 22,88 km/l, comparativamente alta a carros populares, porém justificado por sua potência baixa de motor e peso baixo. As perdas no teste são descritas no gráfico a seguir:

Gráfico 5 – Percentual de perdas em teste UDDS – simulação 1

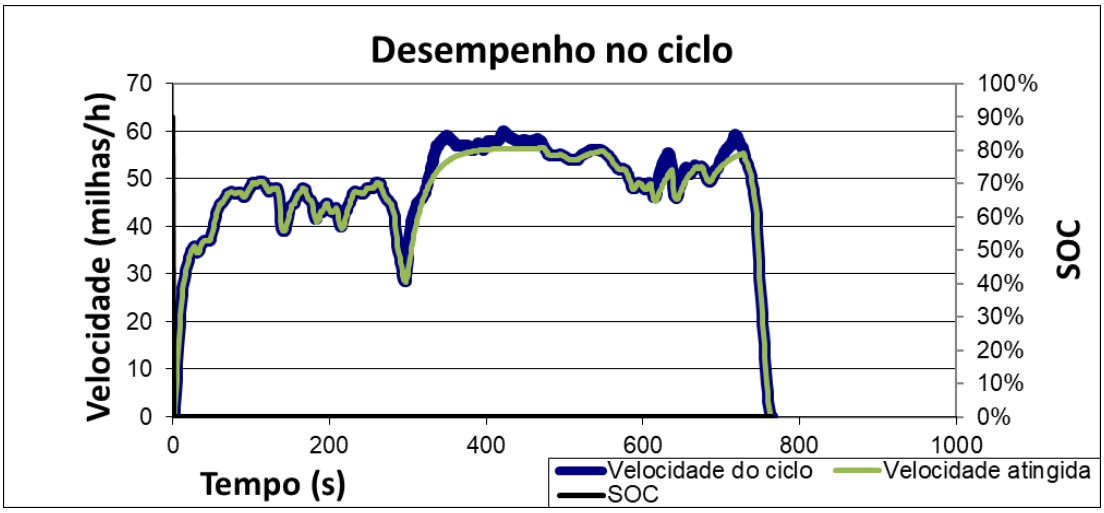


Fonte: o autor (2018).

Pelo gráfico, já é possível perceber o percentual dominante absoluto de consumo sendo o motor, vindo os freios e arrasto somados mais de três vezes menores.

Já para a simulação de rodovia, os resultados foram mais limitados, obtendo 45,70 MPG ou 19,42 km/l e eficiência de motor de 31,10 %. Aumentando a velocidade máxima para 90,77 km/h. O ciclo realizado pode se acompanhar pela figura 33.

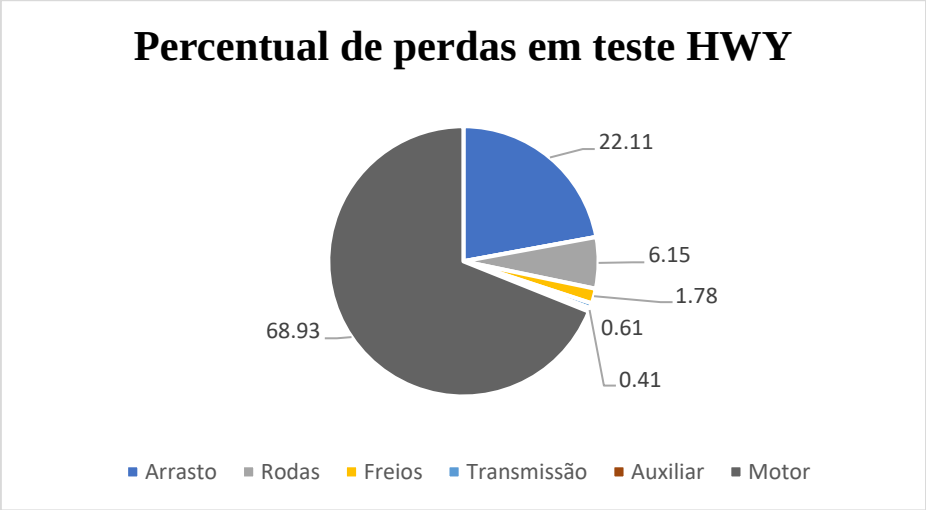
Figura 33 – Ciclo HWY *Carryall 700* a combustão – simulação 1



Fonte: o autor (2018).

As perdas podem ser vistas no gráfico a seguir.

Gráfico 6 – Percentual de perdas em testes HWY – simulação 1



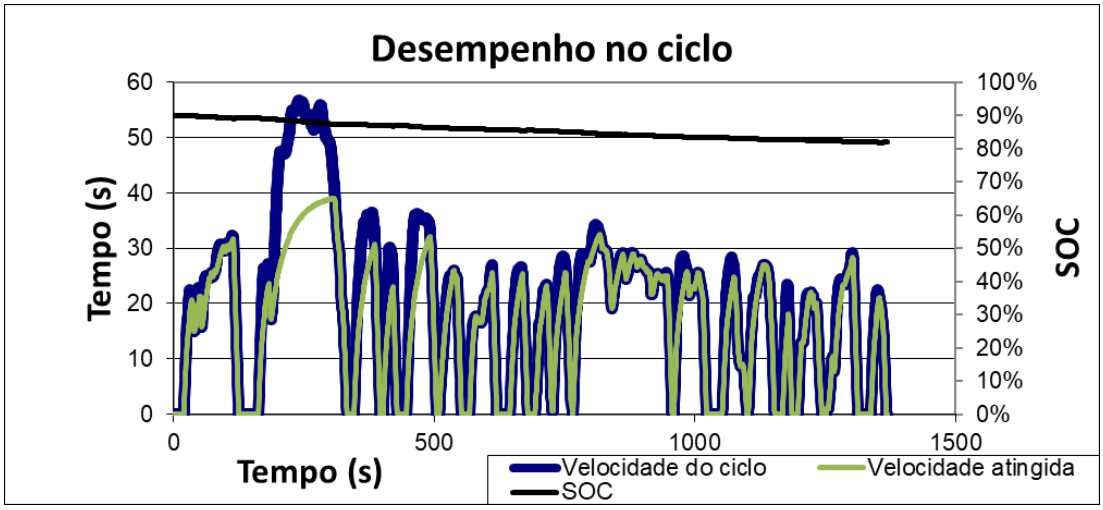
Fonte: o autor (2018).

O arrasto passa a ter papel mais importante dado a constância de velocidade mais elevada nesta simulação.

4.1.4 *Yamaha Concierge 6* elétrico

No teste UDDS apresentou autonomia de 80,09 km e consumo de 0,13 kWh/km. Já é possível observar uma melhora na autonomia, diretamente relacionada ao aumento da capacidade total de energia do veículo.

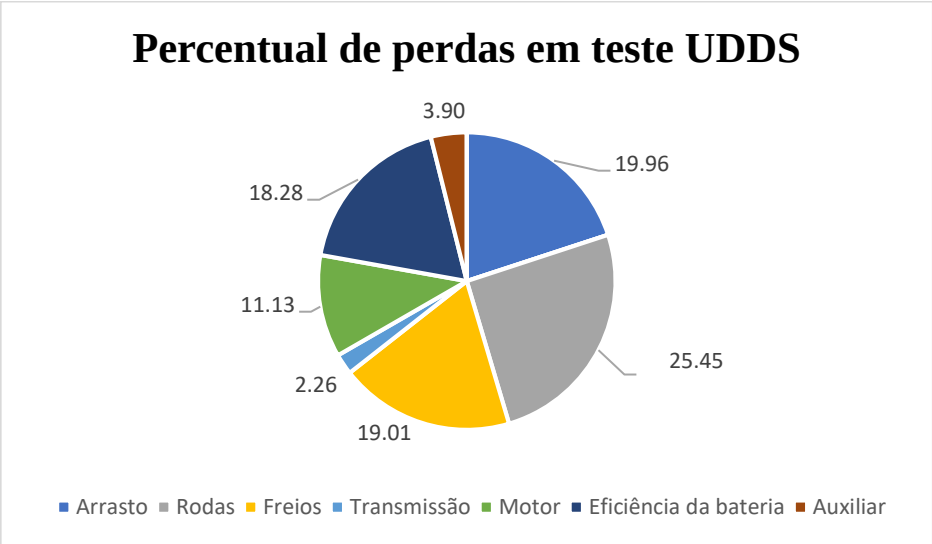
Figura 34 – Ciclo UDDS *Concierge* elétrico – simulação 1



Fonte: o autor (2018).

Na figura 34, é possível de se visualizar o ciclo urbano, que conta com eficiência de motor de 91,40 %, recuperação por frenagem regenerativa de 2,07 kWh e velocidade máxima de 62,82 km/h. As perdas estão elencadas no gráfico a seguir.

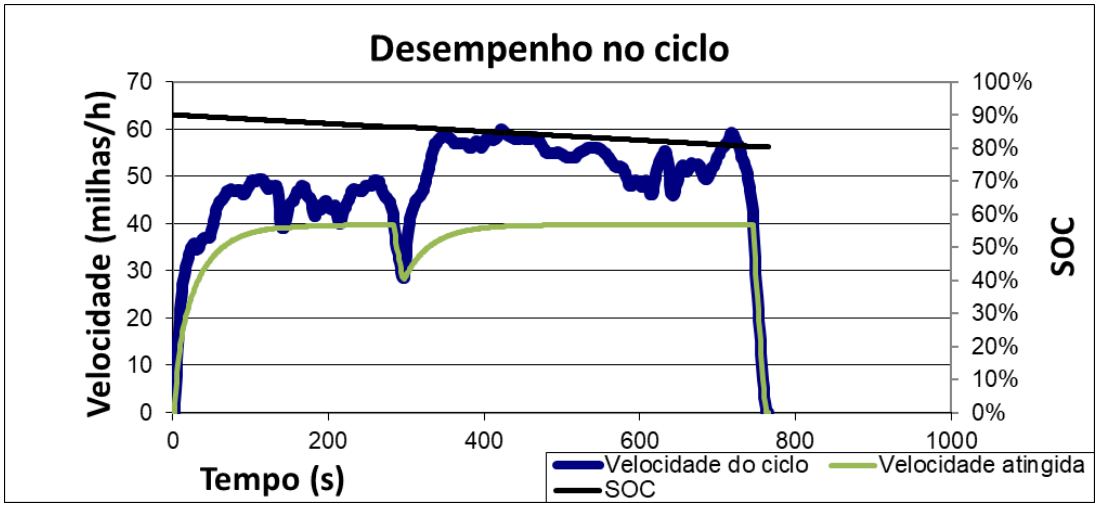
Gráfico 7 – Percentual de perdas em teste UDDS – simulação 1



Fonte: o autor (2018).

É possível perceber uma distribuição bastante uniforme entre os consumos resultantes. Sendo o primeiro de rodas, o segundo arrasto e terceiro freios. O teste HWY resultou em autonomia de 84,54 km e consumo de 0,12 kWh/km. O ciclo desempenhado segue na figura 35.

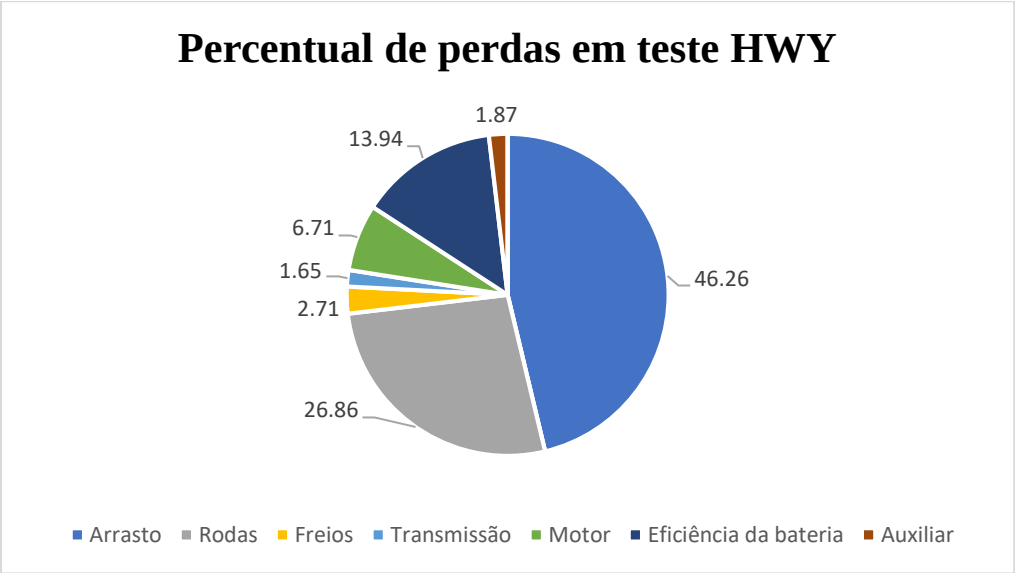
Figura 35 – Ciclo HWY *Concierge* elétrico – simulação 1



Fonte: o autor (2018).

O motor teve média de eficiência de 92,50 %, velocidade máxima de 63,91 km/h e recuperação por frenagem regenerativa de 272,56 Wh. As perdas do teste seguem no gráfico abaixo.

Gráfico 8 – Percentual de perdas em teste HWY – simulação 1



Fonte: o autor (2018).

A perda mais expressiva é proveniente de arrasto, seguida de rodas e eficiência das baterias. A eficiência do automóvel UDDS pode ser dada por 1:

$$E_{veículo-UDDS} = \frac{\Delta d}{\Delta W} = \frac{80{,}09 \text{ km}}{0{,}9 * 12{,}08\text{kWh}} = 7{,}36 \frac{km}{kWh} ou\ 154{,}28\ MPGge$$

E HWY, por:

$$E_{veículo-HWY} = \frac{\Delta d}{\Delta W} = \frac{84{,}53 \text{ km}}{0{,}9 * 12{,}08\text{kWh}} = 7{,}77 \frac{km}{kWh} ou\ 162{,}84\ MPGge$$

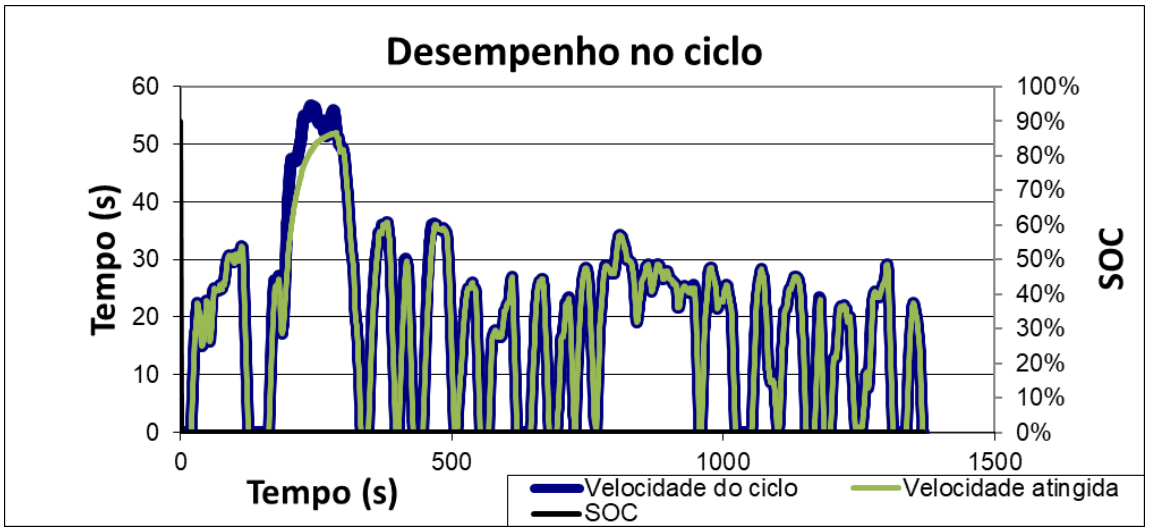
Sendo, portanto, o *score* combinado:

$$E_{veículo} = 0{,}55 * E_{veículo-UDDS} + 0{,}45 * E_{veículo-HWY} = \ 158{,}13\ MPGge$$

4.1.5 *Yamaha Concierge 6* combustão

No teste de ciclo urbano, obteve consumo de 23,32 km/l ou 54,90 MPG e autonomia de 406,07 km. Houve imediata melhora da autonomia em relação ao *Carryall 700* a combustão, testado anteriormente, pela redução do peso do veículo. A figura 36 descreve o ciclo obtido por simulação.

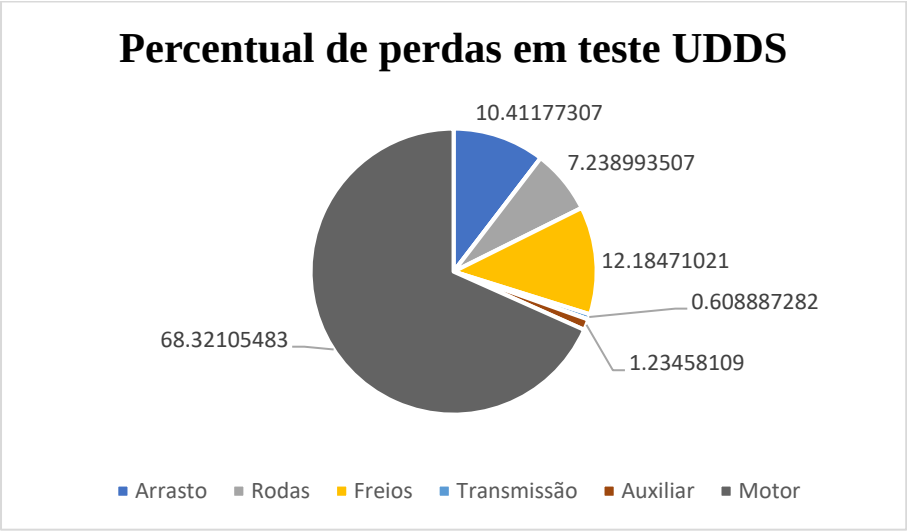
Figura 36 – Ciclo UDDS *Concierge* 6 a combustão – simulação 1



Fonte: o autor (2018).

Por outro lado, já é possível observar o ônus da redução da potência do motor para este veículo em comparação ao *Carryall*. Não foi possível acompanhar as velocidades propostas pelo teste, apesar de ter chegado muito próximo. A velocidade máxima atingida foi de 83,60 km/h e a eficiência do motor foi de 31,70 %. As perdas determinadas pela simulação são encontradas a seguir.

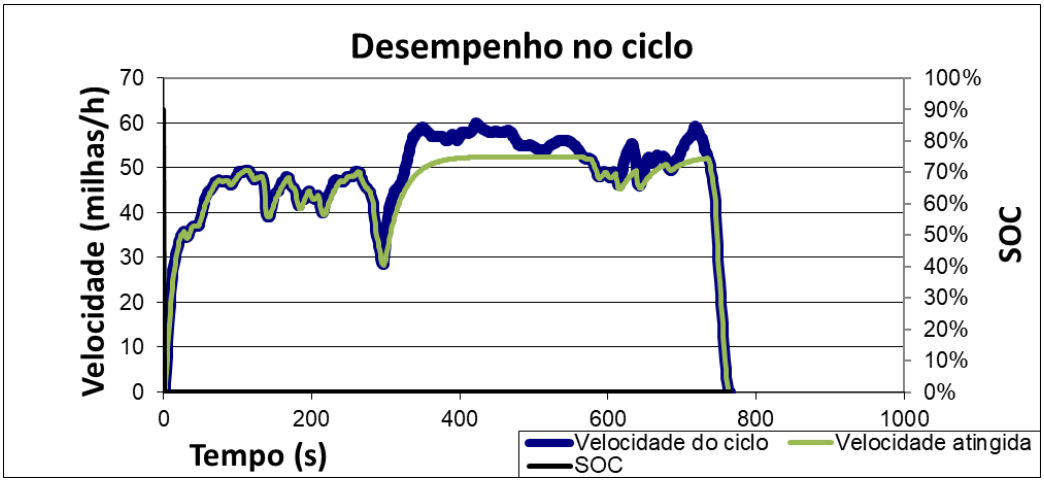
Gráfico 9 – Percentual de perdas em teste UDDS – simulação 1



Fonte: o autor (2018).

Observa-se que as maiores perdas são provenientes do motor, seguidas de freios e arrasto. No teste HWY, o veículo foi capaz de atingir 356,21 km de autonomia e consumo de 20,45 km/l ou 48,10 MPG. Na figura 37, é possível ver o resultado da simulação.

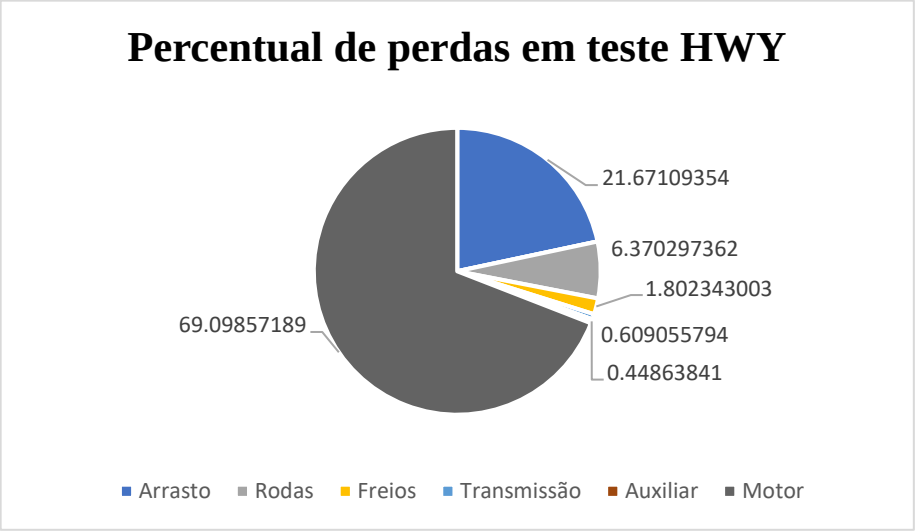
Figura 37 – Ciclo HWY *Concierge* 6 a combustão – simulação 1



Fonte: o autor (2018).

O veículo desempenho velocidade máxima de 84,46 km/h durante a simulação e eficiência média de motor de 30,90 %. A maior perda é proveniente do motor, seguida de arrasto e rodas. A seguir, as perdas são descritas pelo gráfico 10.

Gráfico 10 – Percentual de perdas em testes HWY – simulação 1



Fonte: o autor (2018).

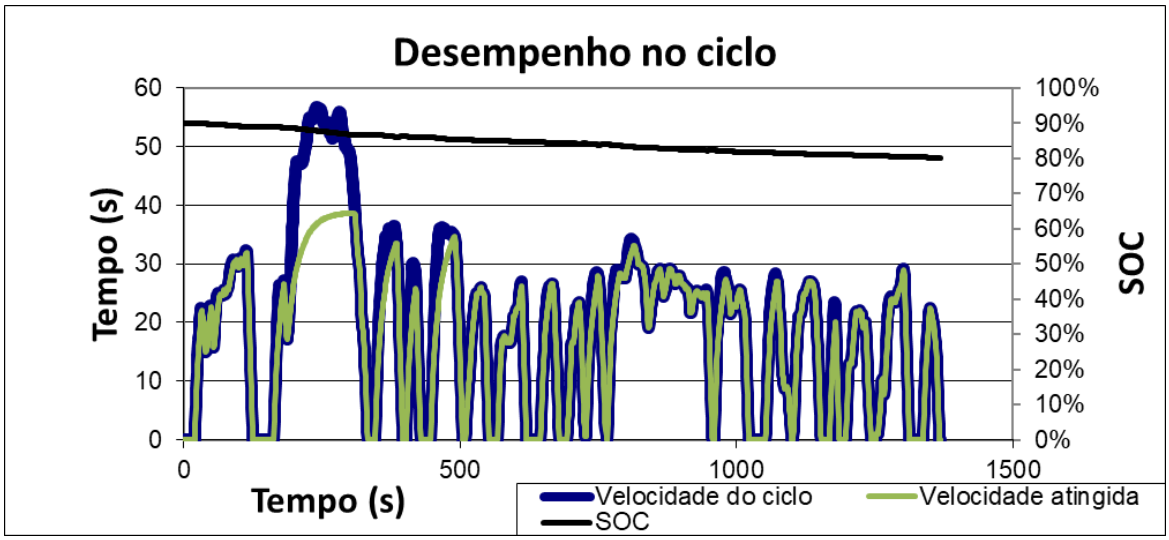
4.2 SIMULAÇÃO 2

A condição da simulação 2 é de que o veículo deve estar com carga equivalente ao peso médio de 3 pessoas, 50 % da ocupação máxima. Nesses testes, devem ser observados, principalmente, as diferenças de autonomia e eficiência, comparadas com a simulação 1.

4.2.1 Tramontina *Elettro 320CP*

O teste UDDS resultou em autonomia de 68,86 km e o teste HWY, em 62,14 km. Imediatamente, pode-se observar um acréscimo de 13,29 % e 3,13 % de autonomia quando comparados à carga completa do veículo.

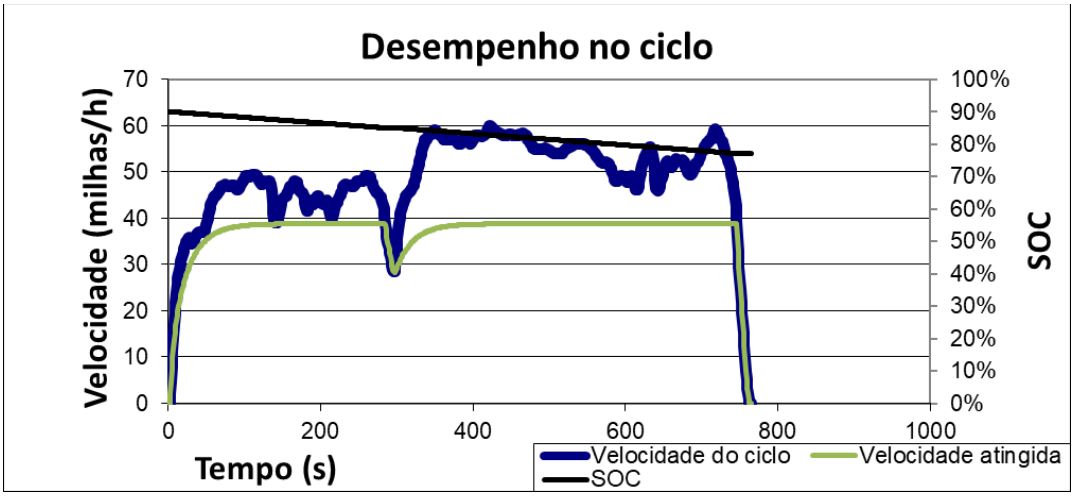
Figura 38 – Ciclo UDDS *Elettro 320CP* – simulação 2



Fonte: o autor (2018).

A figura 38, acima, descreve o ciclo UDDS do veículo eletro 320CP e por ela pode-se visualizar a semelhança ao da simulação 1, com uma pequena diferença na velocidade máxima, de 62,25 km/h. Obtendo nesse um consumo de 0,11 kWh/km e recuperando 1,83 KWh pelo freio regenerativo.

Figura 39 – Ciclo HWY *Elettro 320CP* – simulação 2



Fonte: o autor (2018).

Já no teste HWY, visto na figura 39, observa-se máxima velocidade de 38,27 milhas/h. O consumo observado foi de 0,13 kWh/km e a energia recuperada no freio regenerativo foi de 155,745 Wh. A eficiência do motor observada foi de 92,50 % para o teste em rodovia e 90,50 % para o teste urbano.

A eficiência do automóvel UDDS pode ser dada por 1:

$$E_{veículo-UDDS} = \frac{\Delta d}{\Delta W} = \frac{68{,}86\ \text{km}}{0{,}9 * 9\text{kWh}} = 8{,}50\,\frac{km}{kWh}\,ou\ 178{,}03\ MPGge$$

E HWY, por:

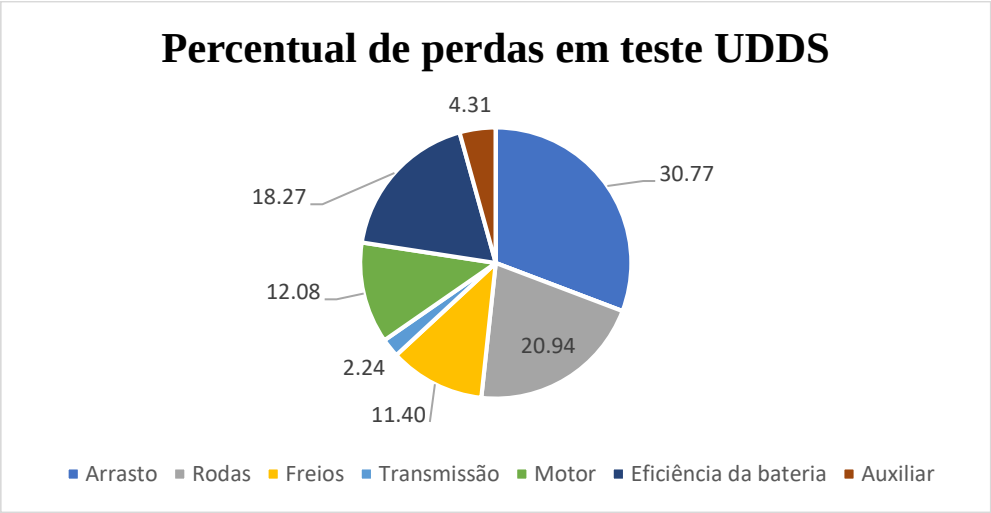
$$E_{veículo-HWY} = \frac{\Delta d}{\Delta W} = \frac{62{,}14\ \text{km}}{0{,}9 * 9\text{kWh}} = 7{,}67\,\frac{km}{kWh}\,ou\ 160{,}67\ MPGge$$

Sendo, portanto, o *score* combinado:

$$E_{veículo} = 0{,}55 * E_{veículo-UDDS} + 0{,}45 * E_{veículo-HWY} = 170{,}22\ MPGge$$

O total de perdas do teste UDDS é obtido pelo gráfico 11 a seguir.

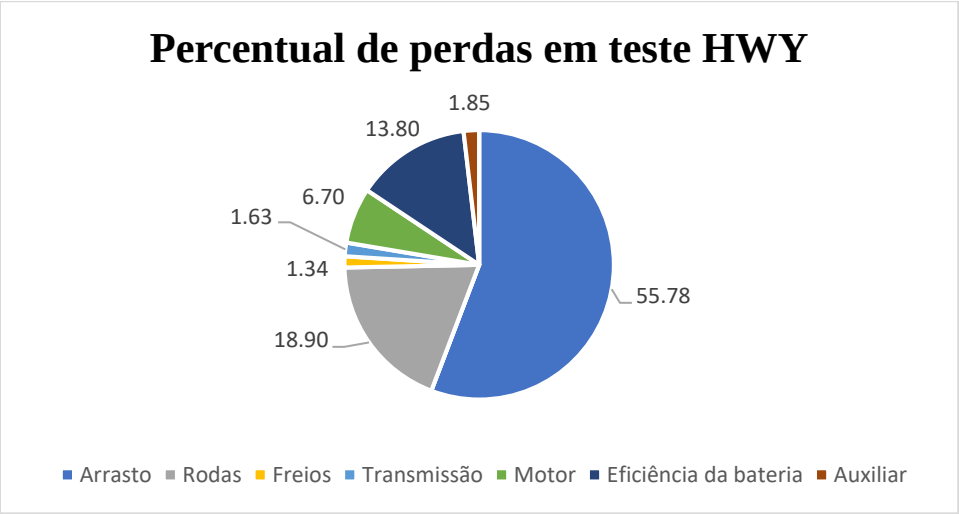
Gráfico 11 – Percentual de perdas em teste UDDS – simulação 2



Fonte: o autor (2018).

Pode-se perceber que a principal perda é por arrasto – 30,76 %, seguida de freios – 20,93 % e eficiência das baterias – 18,26 %. A seguir as perdas no teste HWY são elencadas no gráfico 12.

Gráfico 12 – Percentual de perdas em teste HWY – simulação 2



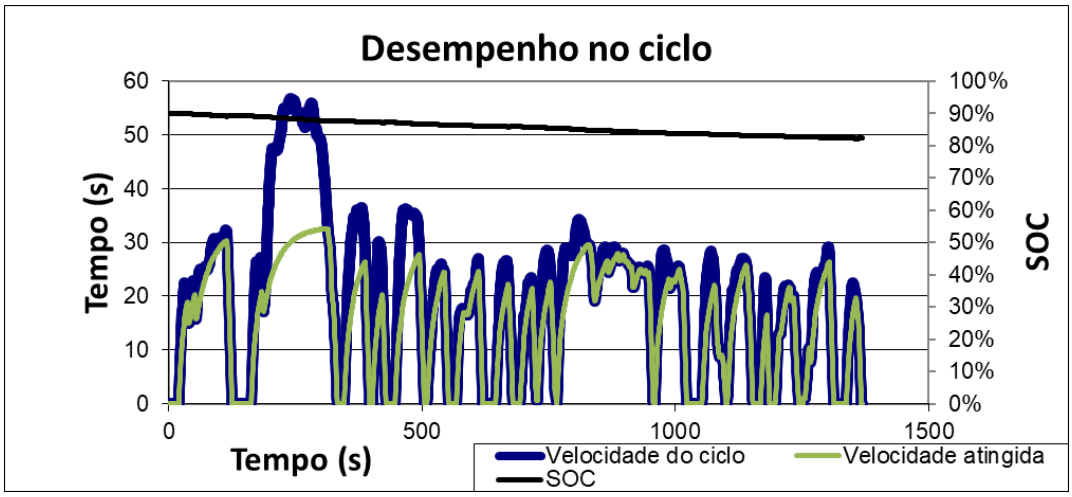
Fonte: o autor (2018).

Já em simulação de teste rodoviário, o domínio das perdas é determinado pelo arrasto 55,78 %, dado a maior constância de velocidades elevadas do veículo.

4.2.2 *Carryall* 700 elétrico

Na modalidade UDDS, obteve-se autonomia de 76,63 km, mediante consumo de 0,10 kWh/km. Mantendo assim uma margem de liderança em relação ao Tramontina, devido seu chassi de menor dimensão. O ciclo UDDS é visto na figura 40.

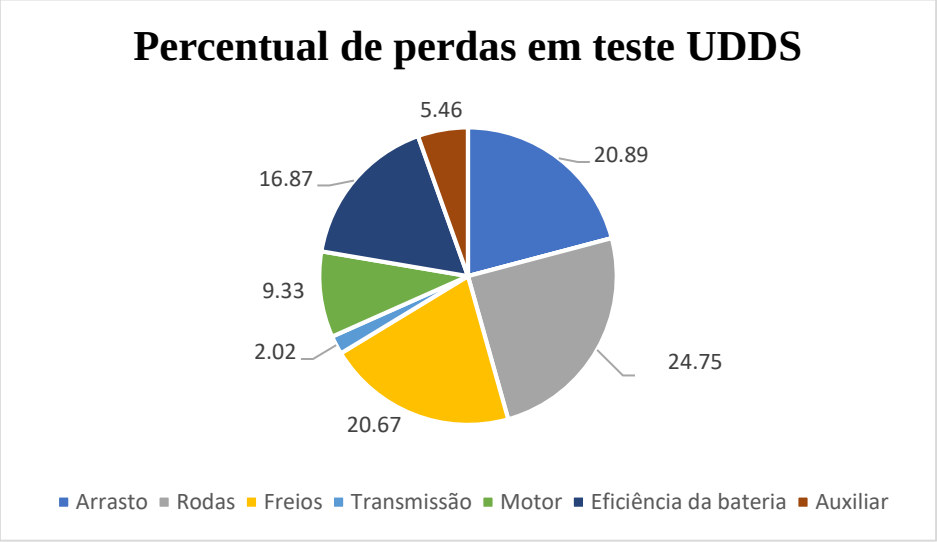
Figura 40 – Ciclo UDDS *Carryall 700* elétrico – simulação 2



Fonte: o autor (2018).

A velocidade máxima obtida foi de 52,41 km/h, a eficiência do motor de 91,60 % e a energia recuperada por frenagem regenerativa foi de 1,28 kWh. O gráfico de perdas no teste UDDS pode ser visto abaixo.

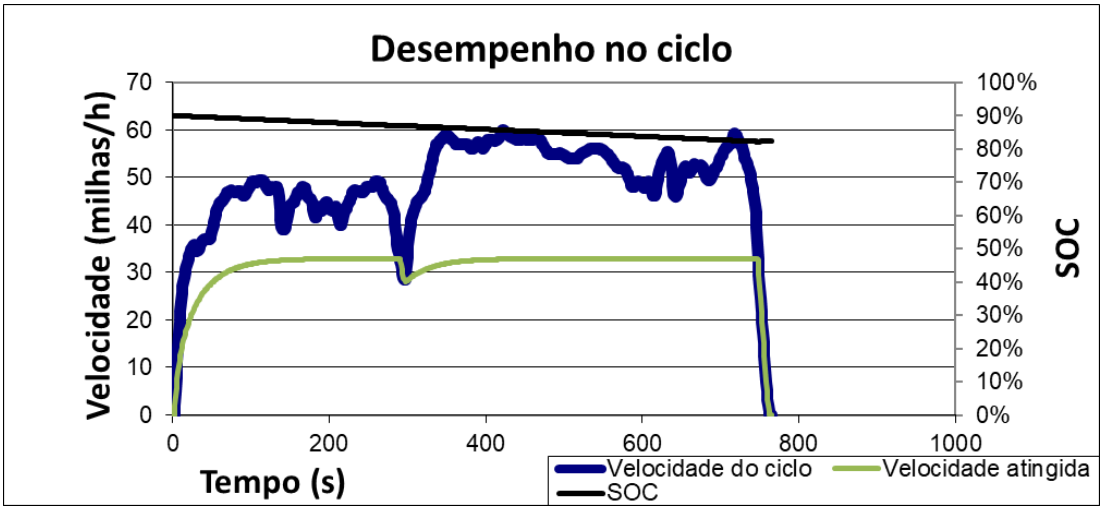
Gráfico 13 – Percentual de perdas em teste UDDS – simulação 2



Fonte: o autor (2018).

O teste HWY demonstrou autonomia mais avançada, de 86,68 km, por manter o motor numa eficiência média maior, de 92,20 %, com consumo de 0,09 kWh/km, e velocidade máxima de 52,41 km/h. O ciclo pode ser visto na figura 41.

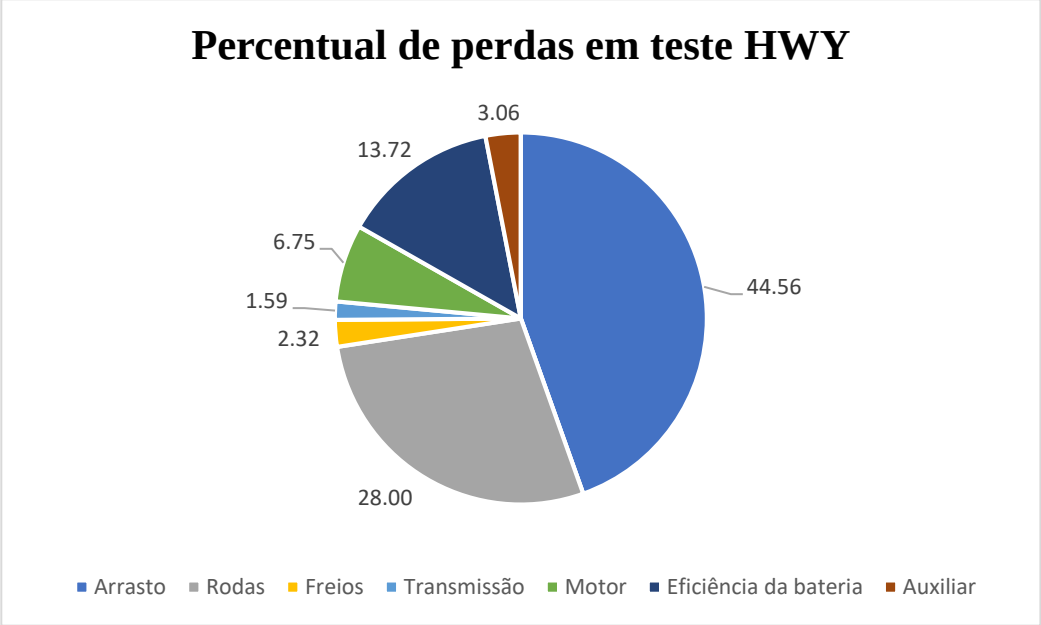
Figura 41 – Ciclo HWY *Carryall* 700 elétrico – simulação 2



Fonte: o autor (2018).

As perdas no teste HWY podem ser vistas no gráfico 14, a seguir.

Gráfico 14 – Percentual de perdas em teste HWY – simulação 2



Fonte: o autor (2018).

A energia recuperada pela frenagem regenerativa é de 122,96 Wh. Percebe-se, então, o grande impacto do arrasto neste teste, seguido por rodas e eficiência de bateria. A eficiência do automóvel UDDS pode ser dada por 1:

$$E_{veículo-UDDS} = \frac{\Delta d}{\Delta W} = \frac{76{,}63\ \text{km}}{0{,}9 * 9\text{kWh}} = 9{,}46\,\frac{km}{kWh}\,ou\ 198{,}12\ MPGge$$

E HWY, por:

$$E_{veículo-HWY} = \frac{\Delta d}{\Delta W} = \frac{86{,}68\ \text{km}}{0{,}9 * 9\text{kWh}} = 10{,}70\,\frac{km}{kWh}\,ou\ 224{,}13\ MPGge$$

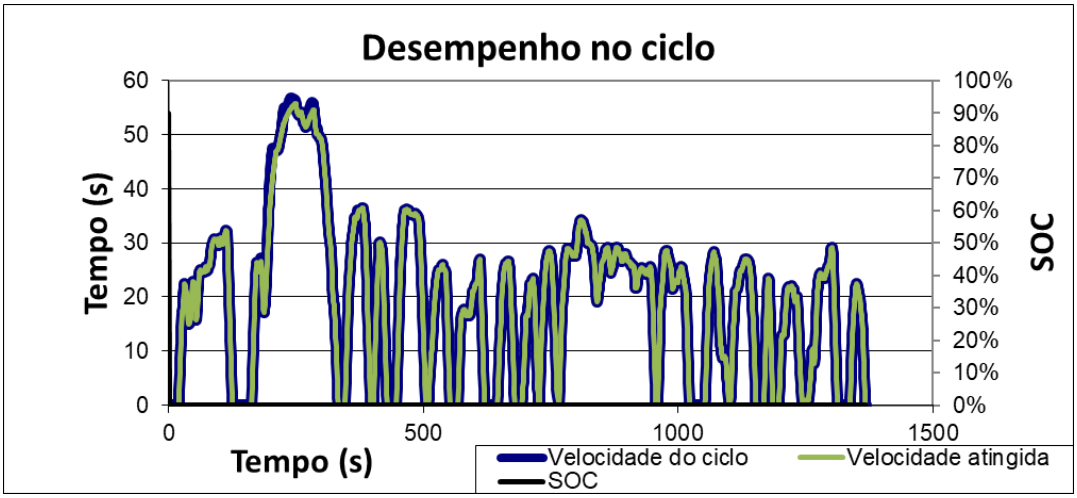
Sendo, portanto, o *score* combinado:

$$E_{veículo} = 0{,}55 * E_{veículo-UDDS} + 0{,}45 * E_{veículo-HWY} = 209{,}82\ MPGge$$

4.2.3 *Carryall* 700 combustão

Para a simulação UDDS a autonomia atingida foi de 454,15 km com consumo de 26,08 km/l ou 61,40 MPG. O ciclo pode ser visto na figura 42.

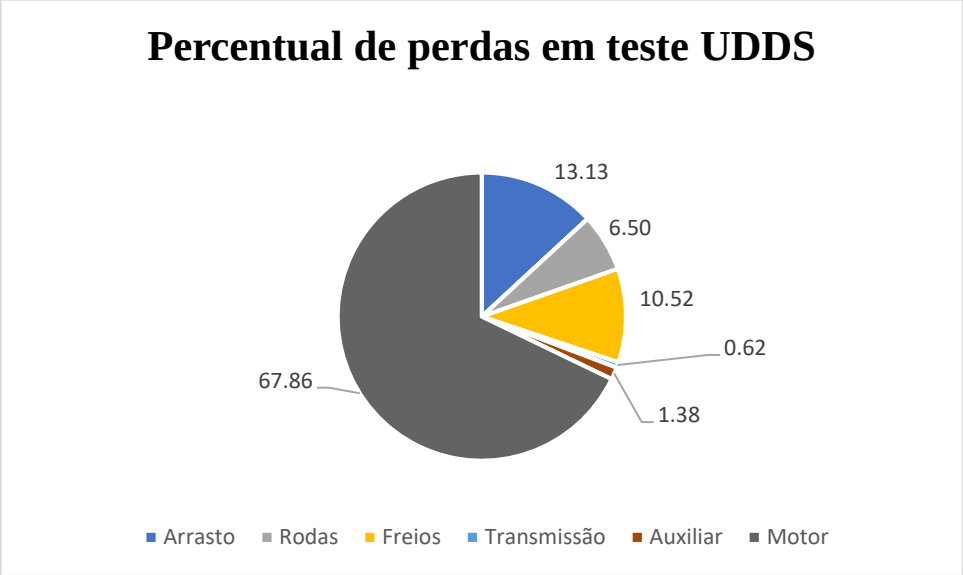
Figura 42 – Ciclo UDDS *Carryall* 700 combustão – simulação 2



Fonte: o autor (2018).

O veículo manteve-se bastante fidedigno as velocidades necessárias. A velocidade máxima atingida foi de 89,80 km/h e a eficiência do motor de 32,10 %. As perdas observadas são descritas pelo gráfico abaixo.

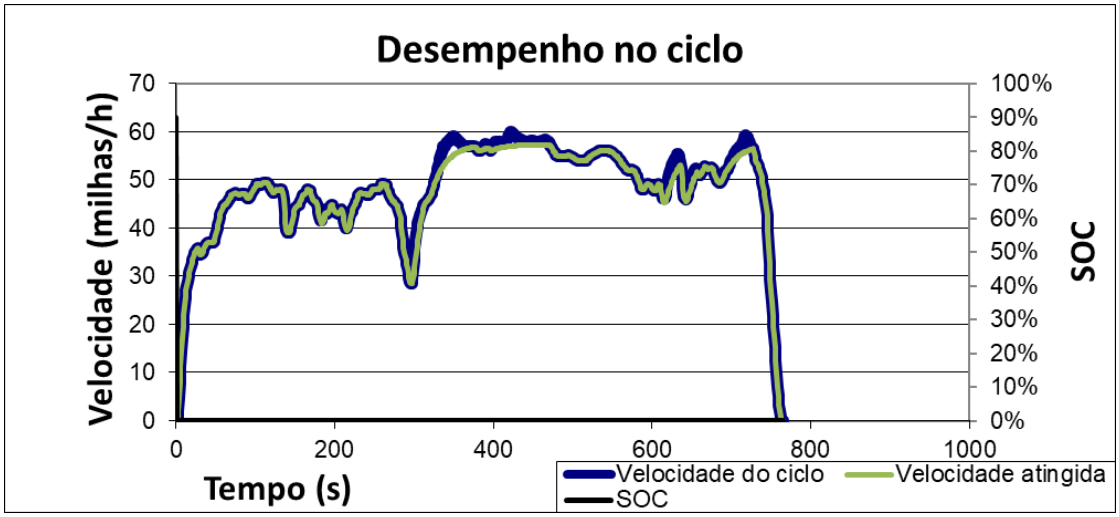
Gráfico 15 – Percentual de perdas em teste UDDS – simulação 2



Fonte: o autor (2018).

A maior é proveniente do motor, seguido de arrasto e freios. Na simulação de rodovia, HWY, o veículo teve média de 360,01 km e consumo de 20,67 km/l ou 48,60 MPG. O ciclo pode ser acompanhado na figura 43.

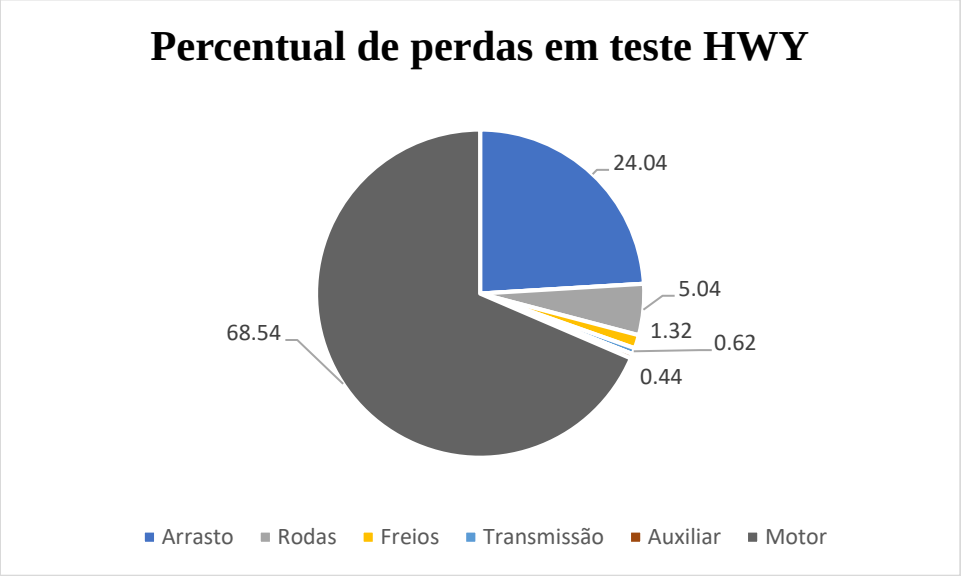
Figura 43 – Ciclo HWY *Carryall* 700 combustão – simulação 2



Fonte: o autor (2018).

O veículo foi capaz de acompanhar o teste, quase em sua totalidade, obtendo velocidade máxima de 92,19 km/h e eficiência de motor de 31,50 %. Pelo gráfico das perdas, pode-se ver uma similaridade com o teste anterior.

Gráfico 16 – Percentual de perdas em teste HWY – simulação 2



Fonte: o autor (2018).

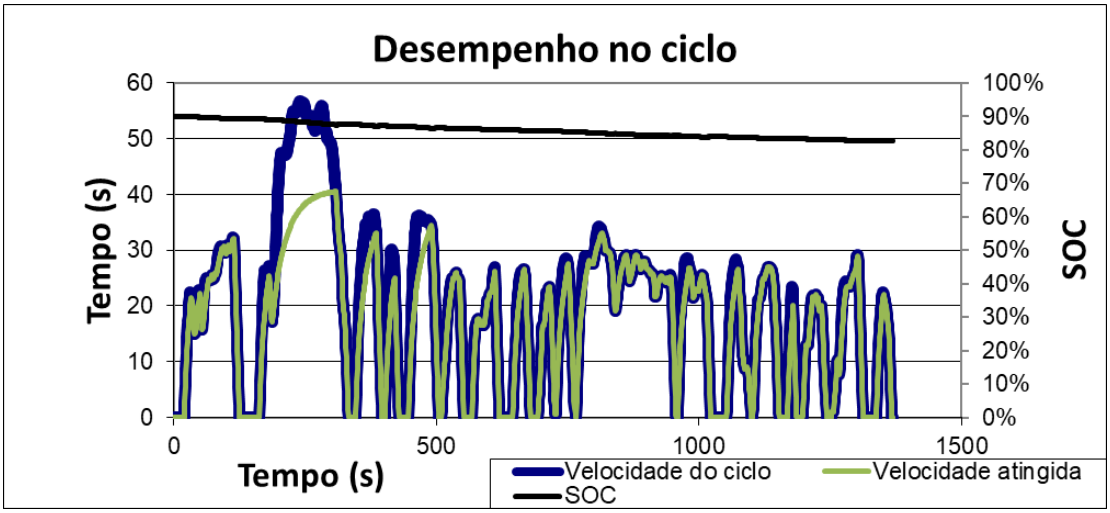
O arrasto é, expressivamente maior, sendo o percentual duas vezes maior, chegando a 1171 Wh (por cada execução do ciclo) em comparação aos 361 Wh (por cada execução do ciclo) obtidas no teste UDDS. Uma vez que o motor constantemente trabalha em velocidades mais elevadas o arrasto aumenta de acordo.

4.2.4 Yamaha *Concierge* 6 elétrico

No teste com redução de peso, UDDS, o veículo teve autonomia de 90,64 km e consumo de 0,12 kWh/km. O ciclo pode ser visto na

Figura figura 44.

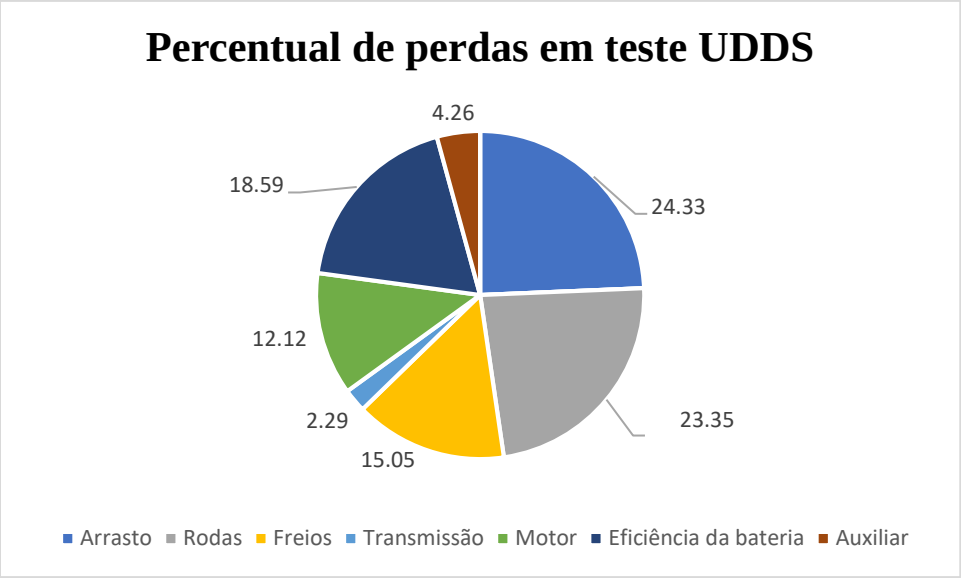
Figura 44 – Ciclo UDDS *Concierge* elétrico – simulação 2



Fonte: o autor (2018).

O ciclo teve eficiência média de motor de 90,80 %, obteve 2,63 kWh de recuperação por frenagem regenerativa e velocidade máxima de 65,17 km/h. As perdas podem ser vistas no gráfico a seguir.

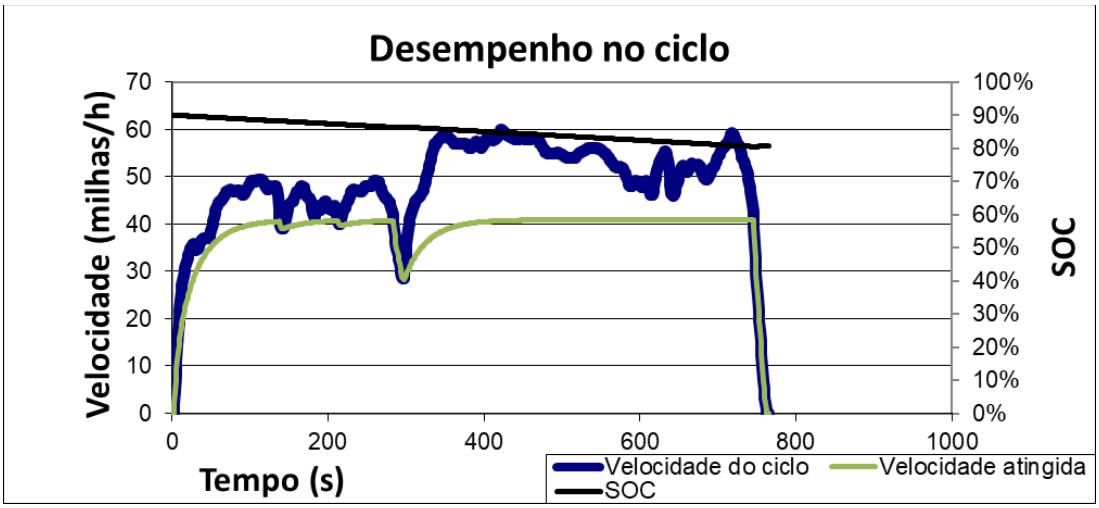
Gráfico 17 – Percentual de perdas em teste UDDS – simulação 2



Fonte: o autor (2018).

A maior perda é proveniente de arrasto, seguida de rodas e eficiência das baterias. O ciclo HWY, resultou em autonomia de 87,85 km e consumo de 0,12 kWh/km. As velocidades atingidas durante o teste podem ser vistas na figura 45.

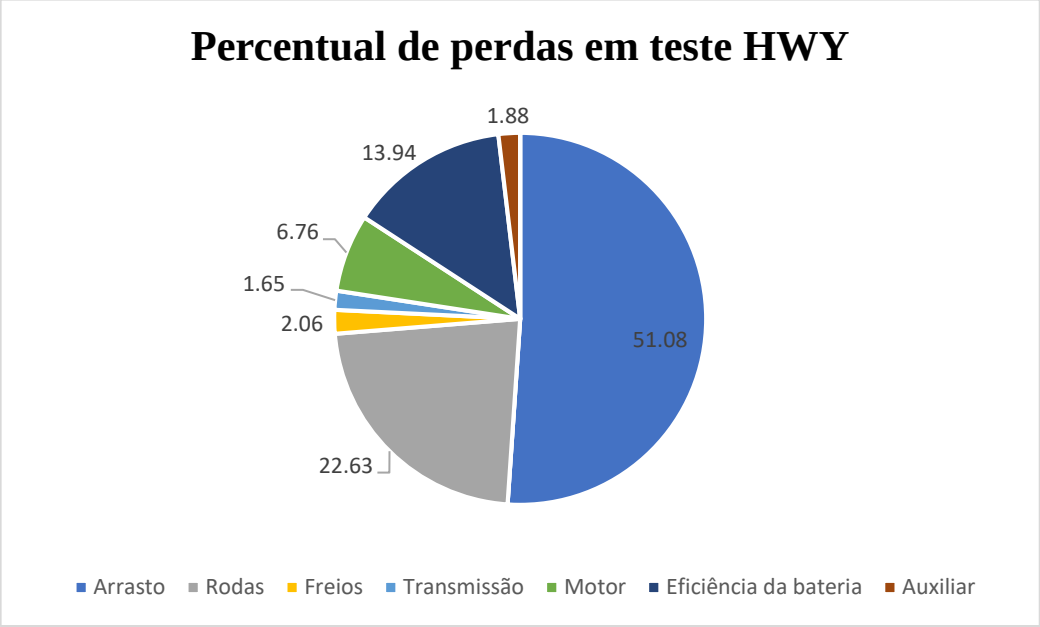
Figura 45 – Ciclo HWY *Concierge* elétrico – simulação 2



Fonte: o autor (2018).

A eficiência média do motor no teste foi de 92,50 %, a recuperação de energia de 279 Wh e a velocidade máxima de 65,77 km/h. As perdas encontradas no teste são apresentadas no próximo gráfico.

Gráfico 18 – Percentual de perdas em teste HWY – simulação 2



Fonte: o autor (2018).

Mais da metade das perdas são resultantes de arrasto, seguido por rodas e eficiência das baterias. A constância de velocidades elevadas do teste e um chassi de maior dimensão contribuíram para essa distribuição. A eficiência do automóvel UDDS pode ser dada por 1:

$$E_{veículo-UDDS} = \frac{\Delta d}{\Delta W} = \frac{90{,}64\ \text{km}}{0{,}9 * 12{,}08\text{kWh}} = 8{,}33\frac{km}{kWh} ou\ 174{,}60\ MPGge$$

E HWY, por:

$$E_{veículo-HWY} = \frac{\Delta d}{\Delta W} = \frac{87{,}85\ \text{km}}{0{,}9 * 12{,}08\text{kWh}} = 8{,}08\frac{km}{kWh} ou\ 169{,}23\ MPGge$$

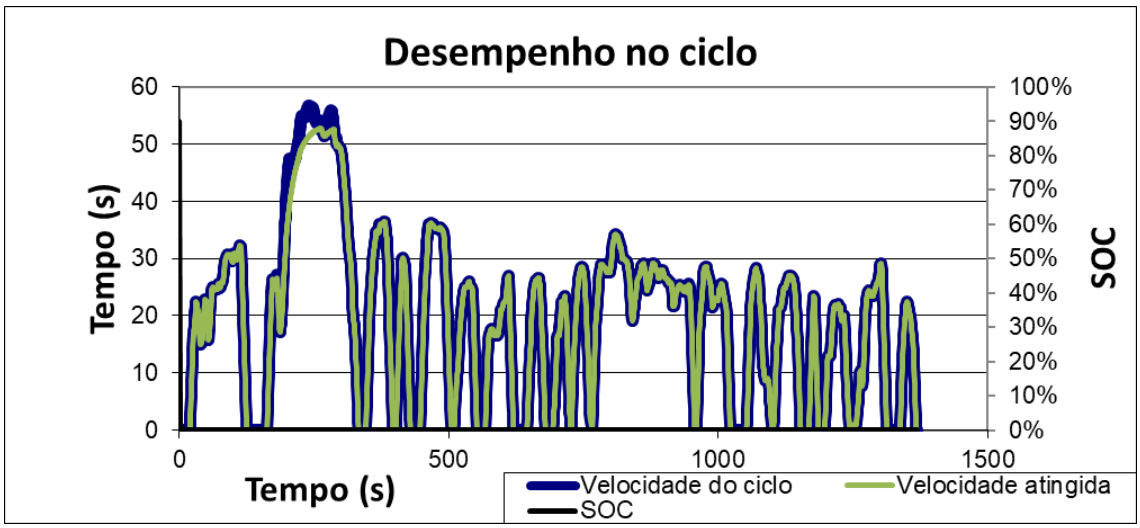
Sendo, portanto, o *score* combinado:

$$E_{veículo} = 0{,}55 * E_{veículo-UDDS} + 0{,}45 * E_{veículo-HWY} = 172{,}18\ MPGge$$

4.2.5 Yamaha *Concierge* 6 a combustão

No teste de redução de peso em ciclo urbano, o veículo desempenhou uma autonomia de 463,18 km e consumo de 26,60 km/l ou 62,60 MPG. A simulação pode ser acompanhada na figura 46.

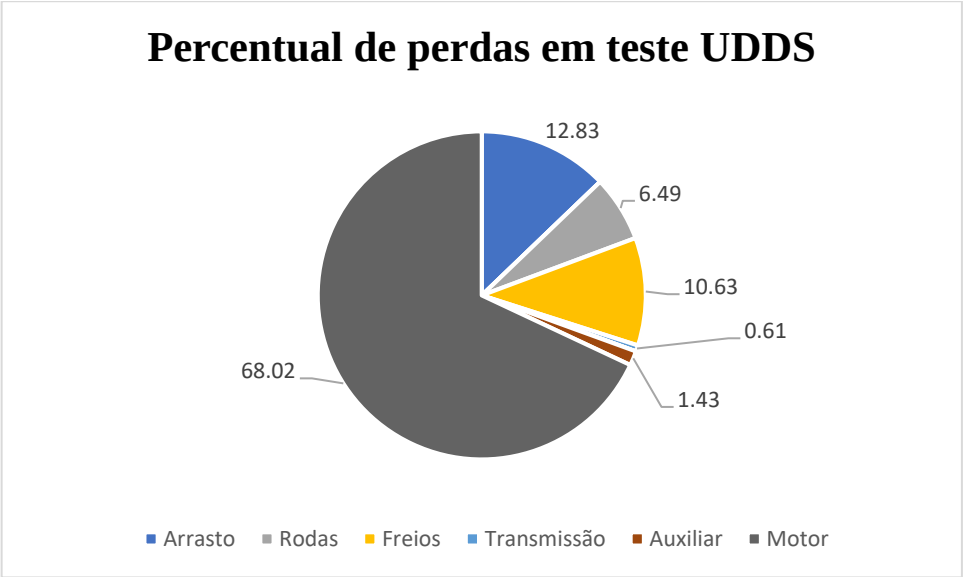
Figura 46 – Ciclo UDDS *Concierge* 6 a combustão – simulação 2



Fonte: o autor (2018).

Apesar da melhora da curva de velocidade estabelecida pelo teste, em relação à simulação 1 do mesmo veículo, ainda foi incapaz de atingir exatamente a ideal do teste. A velocidade máxima atingida foi de 84,97 km/h e a eficiência do motor foi de 32%. As perdas verificadas no teste seguem no gráfico 19.

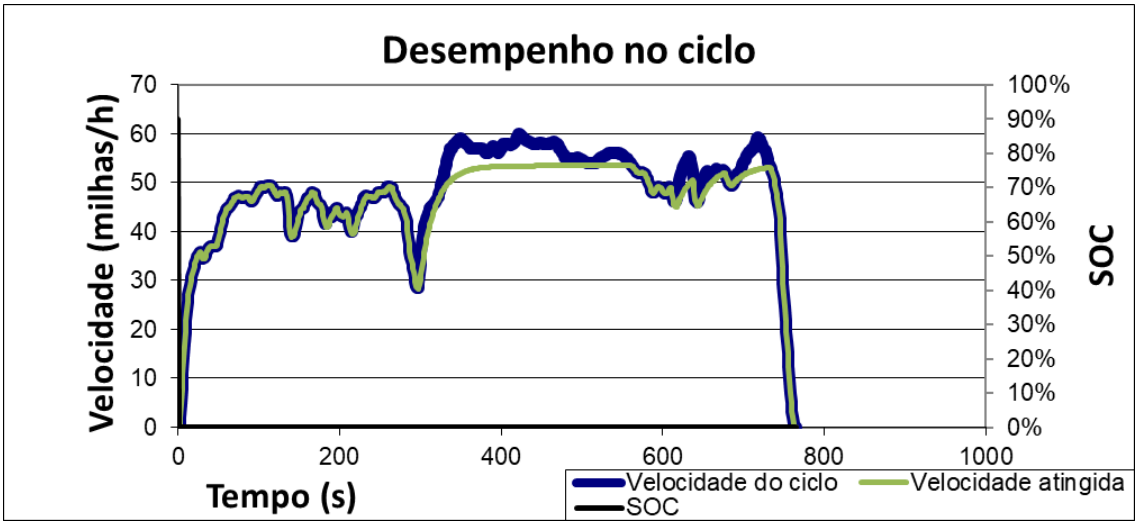
Gráfico 19 – Percentual de perdas em teste UDDS – simulação 2



Fonte: o autor (2018).

A maior perda é proveniente do motor, seguida de arrasto e freios. Para o ciclo HWY, o veículo atingiu autonomia de 374,83 km e consumo de 21,52 km/l ou 50,60 MPG. O teste pode ser visto na figura 47.

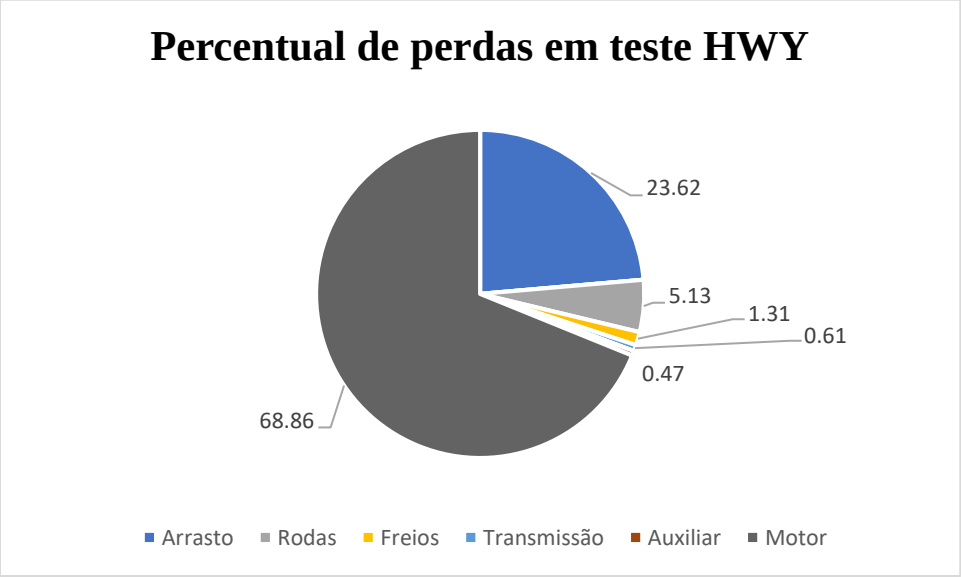
Figura 47 – Ciclo HWY *Concierge* 6 a combustão – simulação 2



Fonte: o autor (2018).

O veículo foi capaz de atingir até 85,98 km/h e eficiência média de motor de 31,10 %. As perdas do teste podem ser vistas no gráfico 20.

Gráfico 20 – Percentual de perdas em teste HWY – simulação 2



Fonte: o autor (2018).

Pode-se perceber que a maior perda é proveniente do motor, seguida de arrasto e rodas.

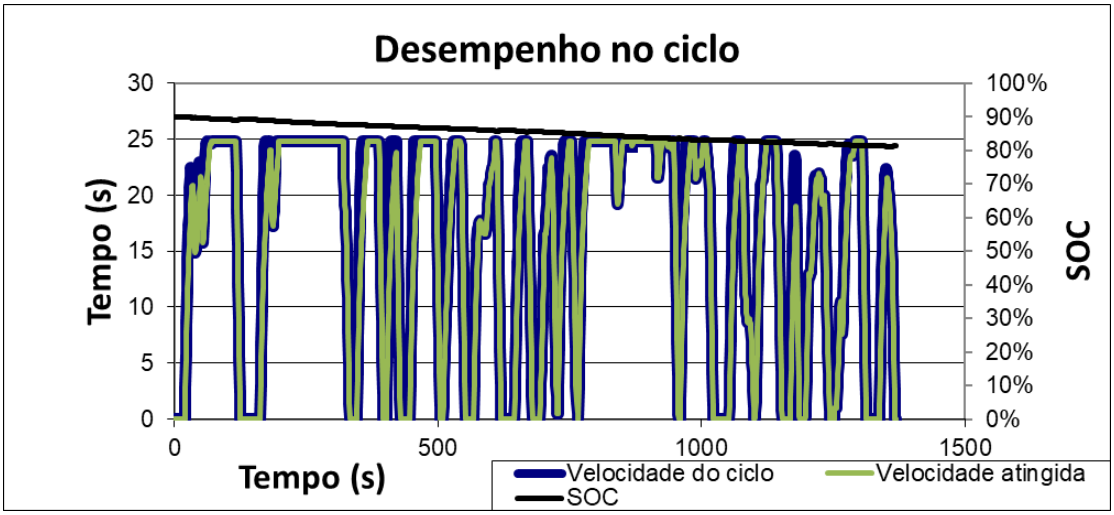
4.3 SIMULAÇÃO 3

A simulação 3 objetiva limitar os dois ciclos, UDDS e HWY, para velocidades de até 40 km/h, usando-se por base a simulação 1, assim tendo total ocupação dos veículos.

4.3.1 Tramontina *Elettro 320CP*

A terceira simulação resultou em autonomias de 68,23 km e 90,15 km para os testes UDDS e HWY. Apesar de não obter grandes impactos no teste urbano, houve grande impacto sob o teste em rodovia, marcando o efeito de perdas por arrasto, uma vez que, as perdas deste estão associadas a velocidade do veículo reduzida neste teste, obtendo apenas 648kJ nesse e de até 2303kJ no teste 2, onde não há limite para velocidade, sendo esta determinada pelo motor do veículo e pela potência da bateria, principalmente.

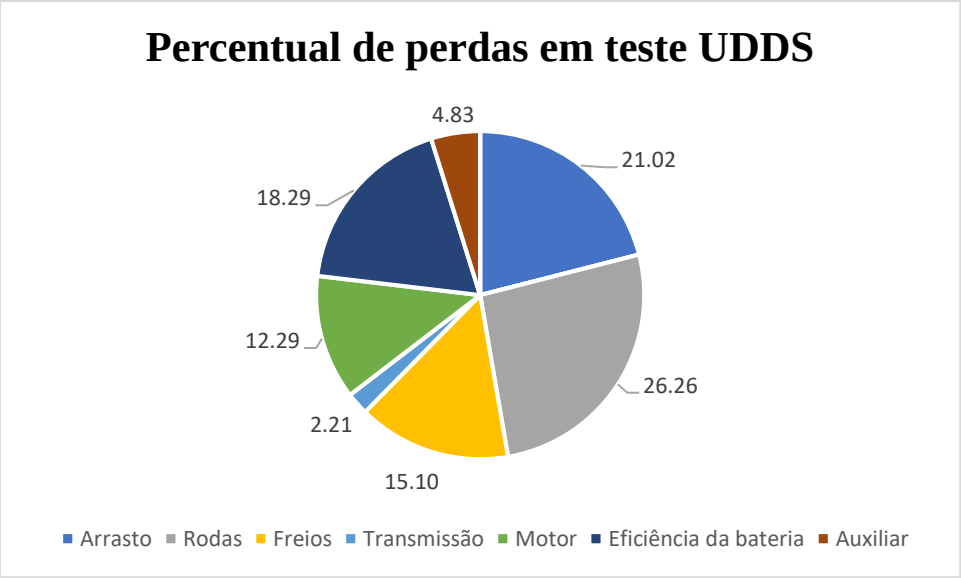
Figura 48 – Ciclo UDDS *Elettro 320CP* – simulação 3



Fonte: o autor (2018).

A figura 48 descreve o teste UDDS na simulação 3. O teste possui curvas achatadas devido à limitação de velocidade imposta, assim, impondo ao teste propriamente dito, dado a impossibilidade de se limitar o veículo através do *software*. A eficiência do motor foi de 89,90 %, o consumo foi de 0,12 kWh/km e a energia recuperada pelo freio regenerativo foi de 1,79 kWh. As perdas do teste UDDS são descritas a seguir, no gráfico 21.

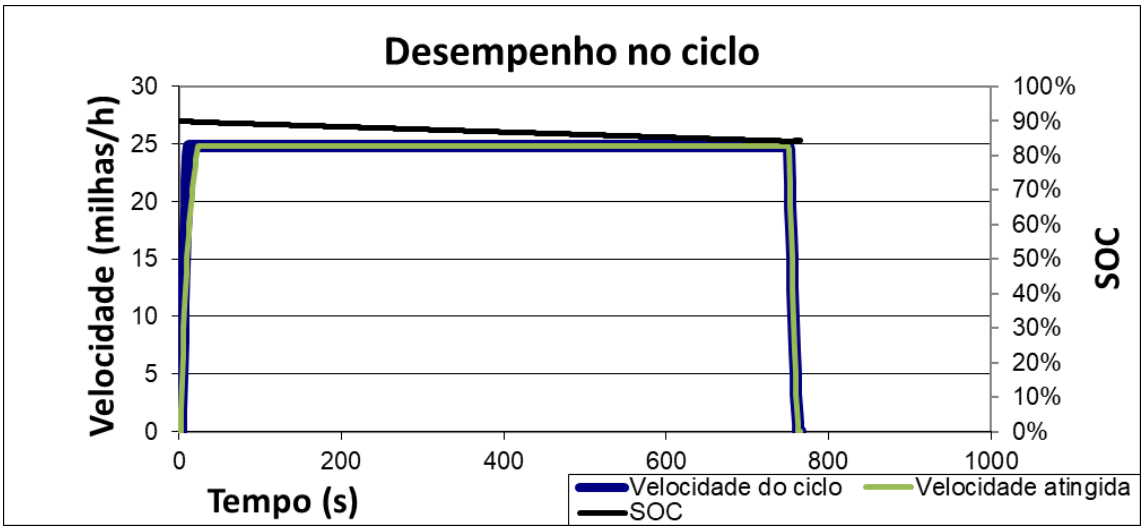
Gráfico 21 – Percentual de perdas em teste UDDS – simulação 3



Fonte: o autor (2018).

Neste teste as rodas passam a demandar mais energia do que o arrasto. O terceiro lugar vem da eficiência das baterias ainda.

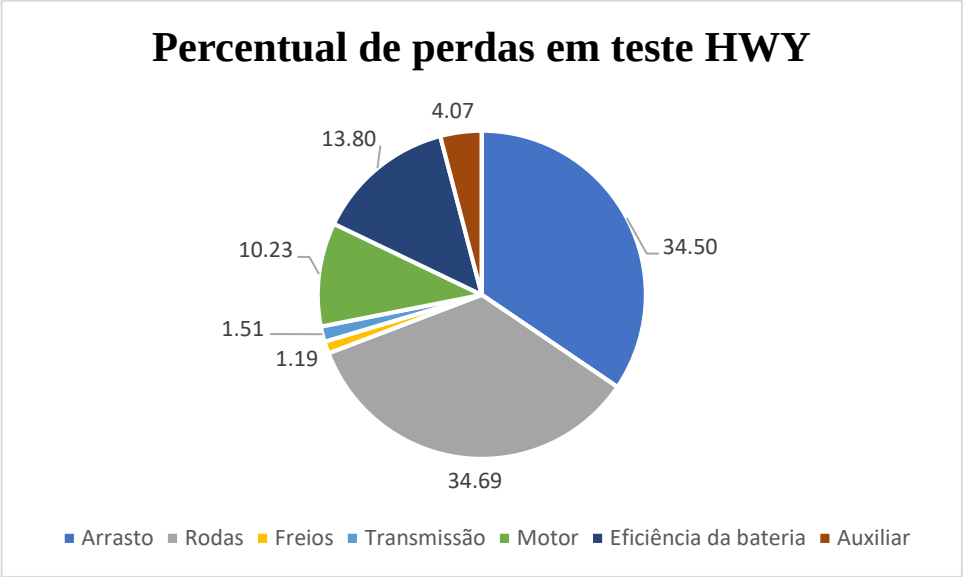
Figura 49 – Ciclo HWY *Elettro 320CP* – simulação 3



Fonte: o autor (2018).

O ciclo HWY, demonstrado na figura 49, mantém a mesma característica de curva achatada observada anteriormente. Nesse, foi observado eficiência de 88% no motor, consumo de 0,06 kWh/km e energia recuperada pelo freio regenerativo de 151,41 Wh. As perdas em HWY são analisadas abaixo, no gráfico 22.

Gráfico 22 – Percentual de perdas em teste HWY – simulação 3



Fonte: o autor (2018).

Já para nessa simulação percebe-se uma igualdade maior entre arrasto e perdas nas rodas. O terceiro lugar permanece decorrente das baterias. A eficiência do automóvel UDDS pode ser dada por 1:

$$E_{veículo-UDDS} = \frac{\Delta d}{\Delta W} = \frac{68{,}23\ \text{km}}{0{,}9 * 9\text{kWh}} = 8{,}42\frac{km}{kWh} ou\ 176{,}41\ MPGge$$

E HWY, por:

$$E_{veículo-HWY} = \frac{\Delta d}{\Delta W} = \frac{90{,}15\ \text{km}}{0{,}9 * 9\text{kWh}} = 11{,}13\frac{km}{kWh} ou\ 233{,}10\ MPGge$$

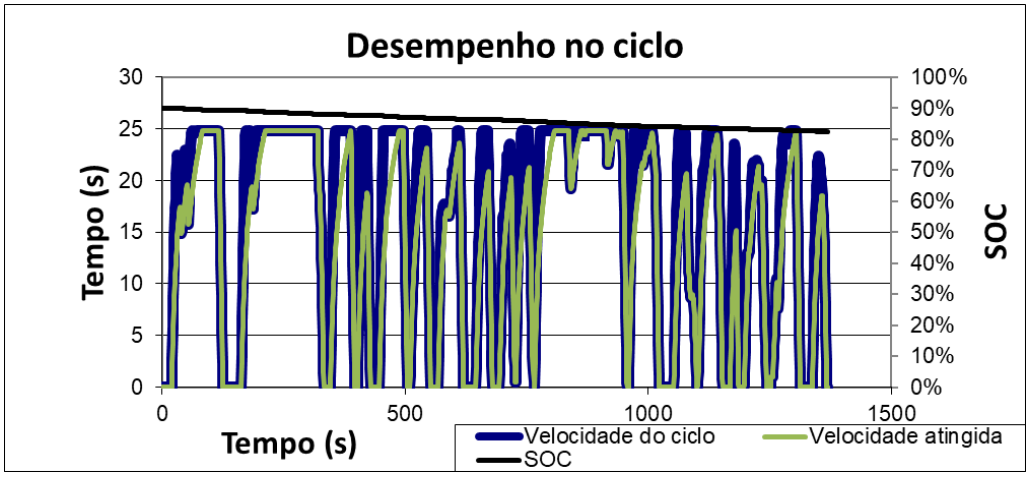
Sendo, portanto, o *score* combinado:

$$E_{veículo} = 0{,}55 * E_{veículo-UDDS} + 0{,}45 * E_{veículo-HWY} = \ 201{,}92\ MPGge$$

4.3.2 *Carryall 700* elétrico

No teste urbano, o veículo atingiu 72,69 km de autonomia, com consumo de 0,11 kWh/km. O ciclo pode ser visualizado na figura 50, onde se observa que o veículo pode chegar muito próximo das velocidades propostas pela simulação.

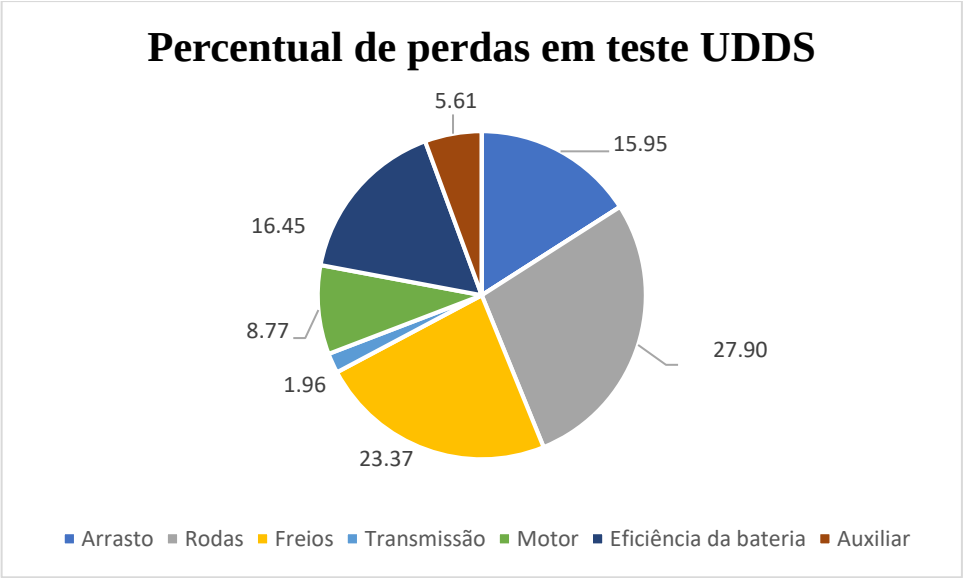
Figura 50 – Ciclo UDDS *Carryall 700* elétrico – simulação 3



Fonte: o autor (2018).

A recuperação de energia por frenagem foi de 1,11 kWh e a eficiência do motor de 91,90 %. As perdas obtidas são vistas no gráfico abaixo.

Gráfico 23 – Percentual de perdas em teste UDDS – simulação 3

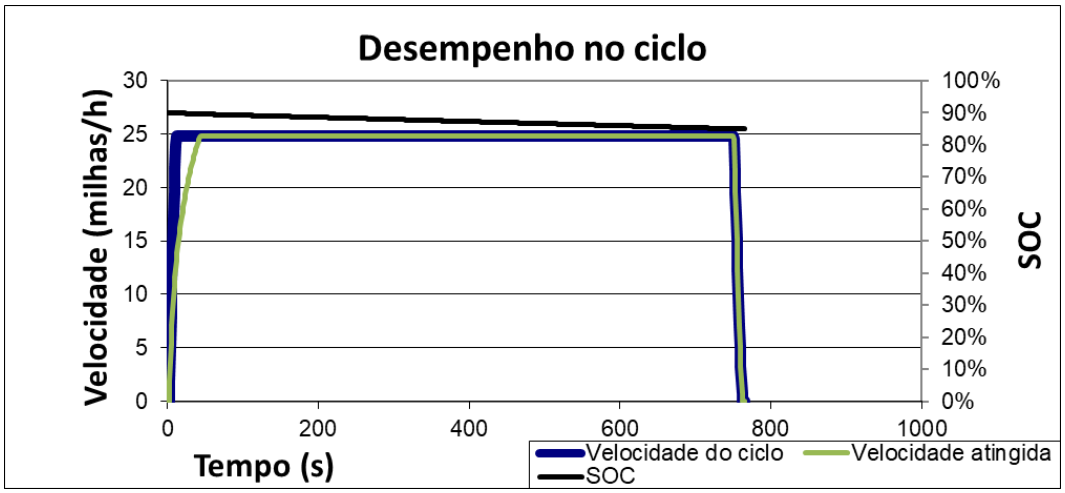


Fonte: o autor (2018).

Pelo gráfico pode-se perceber uma grande redução do arrasto. Os maiores consumos são pelas rodas, frenagem e eficiência de bateria.

A simulação HWY resultou em uma autonomia de 104,20 km, uma das melhores para os veículos elétricos simulados, com consumo de 0,07 kWh/km. Pode ser visto na figura 51.

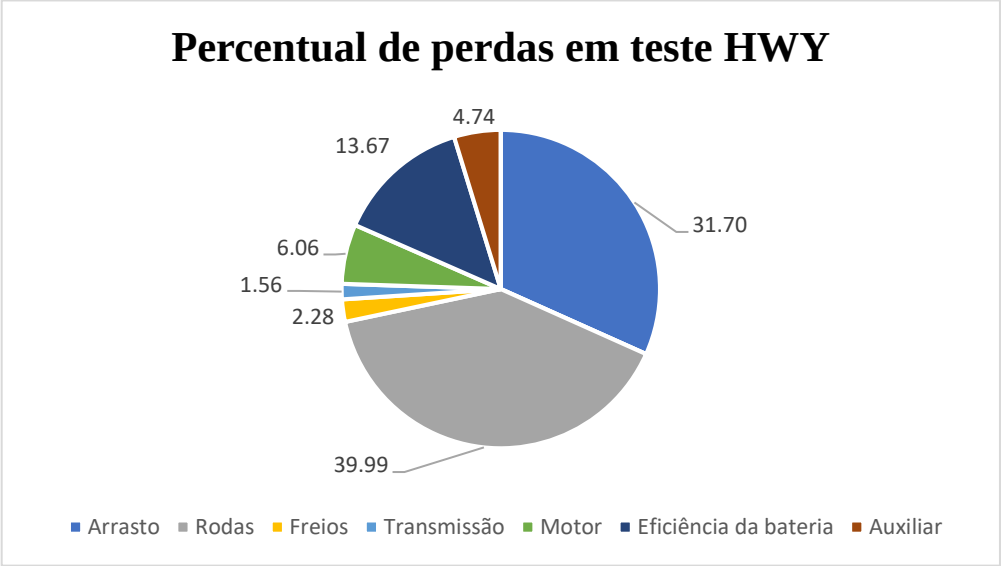
Figura 51 – Ciclo HWY *Carryall 700* elétrico – simulação 3



Fonte: o autor (2018).

A recuperação de energia por frenagem regenerativa é de 105,11 Wh e a eficiência do motor de 92,80 % As perdas podem ser vistas no gráfico abaixo.

Gráfico 24 – Percentual de perdas em teste HWY – simulação 3



Fonte: o autor (2018).

É possível perceber redução no arrasto, sendo esse o que segundo mais consome energia, rodas as que mais consomem e eficiência das baterias em terceiro lugar, porém menos da metade do segundo lugar.

A eficiência do automóvel UDDS pode ser dada por 1:

$$E_{veículo-UDDS} = \frac{\Delta d}{\Delta W} = \frac{72{,}69\ \text{km}}{0{,}9 * 9\text{kWh}} = 8{,}97\frac{km}{kWh} ou\ 187{,}96\ MPGge$$

E HWY, por:

$$E_{veículo-HWY} = \frac{\Delta d}{\Delta W} = \frac{104{,}20\ \text{km}}{0{,}9 * 9\text{kWh}} = 12{,}86\frac{km}{kWh} ou\ 269{,}41\ MPGge$$

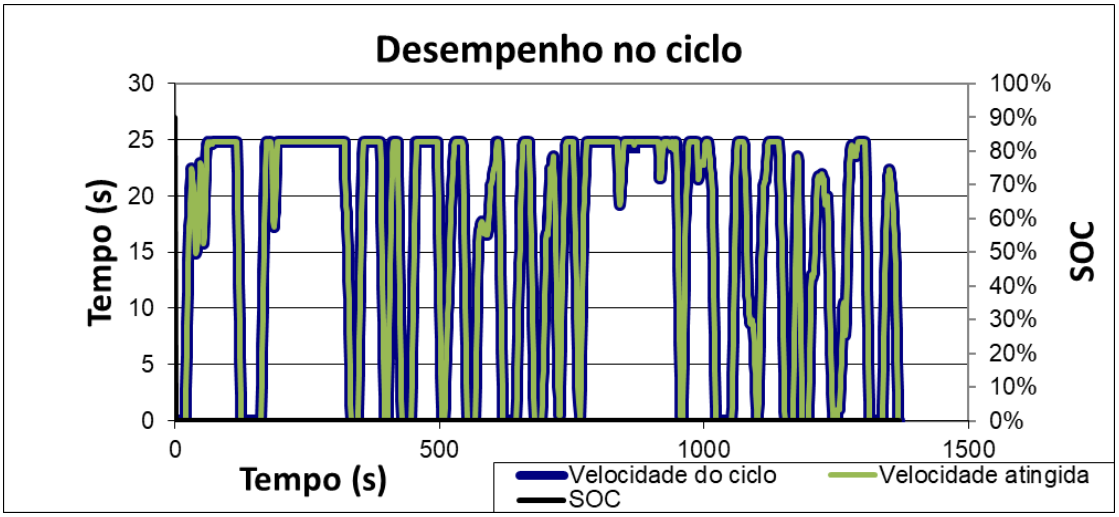
Sendo, portanto, o *score* combinado:

$$E_{veículo} = 0{,}55 * E_{veículo-UDDS} + 0{,}45 * E_{veículo-HWY} = 224{,}61\ MPGge$$

4.3.3 *Carryall 700* combustão

Quando imposto limitação de velocidade, o veículo obteve em teste UDDS uma autonomia de 494,86 km e consumo de 28,42 km/l ou 66,90 MPG. O ciclo realizado pode ser visto na figura 52.

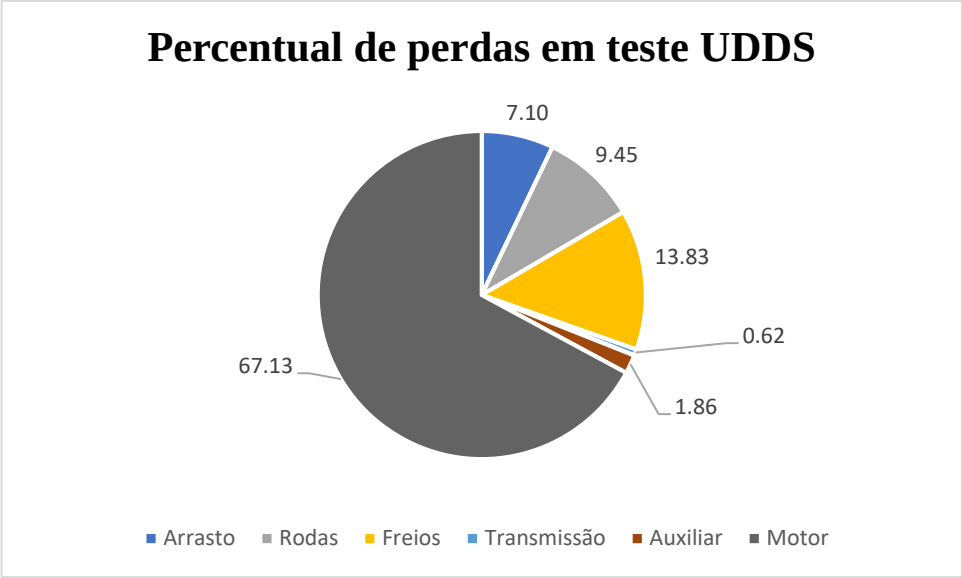
Figura 52 – Ciclo UDDS *Carryall 700* combustão – simulação 3



Fonte: o autor (2018).

A eficiência de motor foi de 32,90 % e as perdas podem ser vistas no gráfico a seguir.

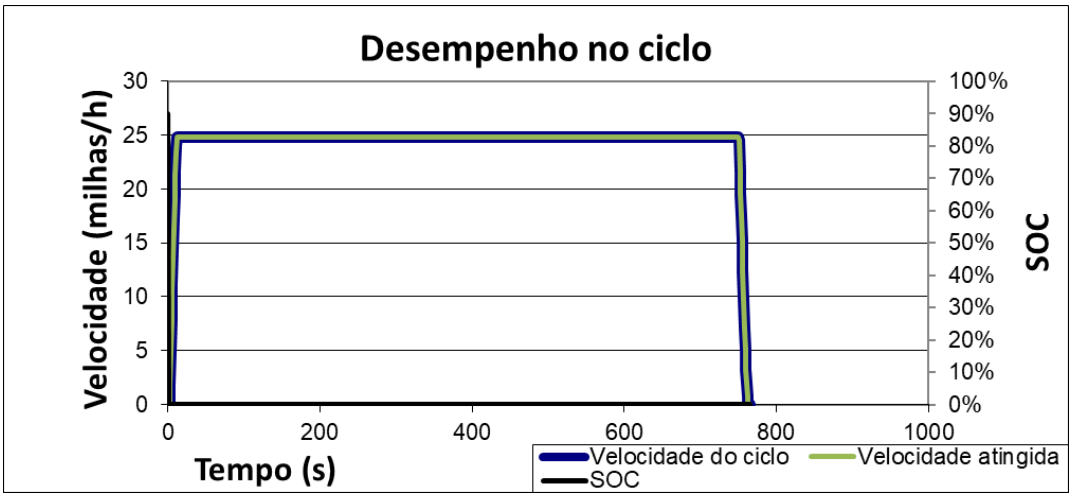
Gráfico 25 – Percentual de perdas em teste UDDS – simulação 3



Fonte: o autor (2018).

A maior perda no teste é do motor, seguido de freios e de rodas. Já o ciclo HWY obteve autonomia de 809,55 km e consumo de 46,49 km/l ou 109,40 MPG. A razão de ser tão elevada pode ser compreendida pelo ciclo na figura 53.

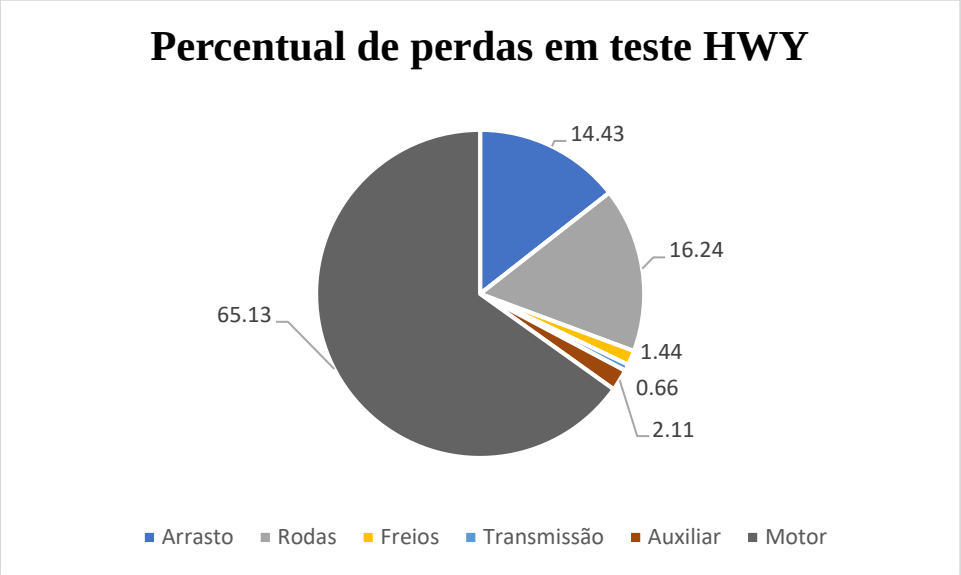
Figura 53 – Ciclo HWY *Carryall 700* combustão – simulação 3



Fonte: o autor (2018).

O ciclo limita a velocidade do veículo a 40 km/h e favorece o mesmo se mudança nenhuma da velocidade, de início ao fim, repetidamente. Descrevendo um cenário bastante utópico. A eficiência de motor de 34,90 %, as perdas estão elencadas no gráfico a seguir.

Gráfico 26 – Percentual de perdas em teste HWY – simulação 3



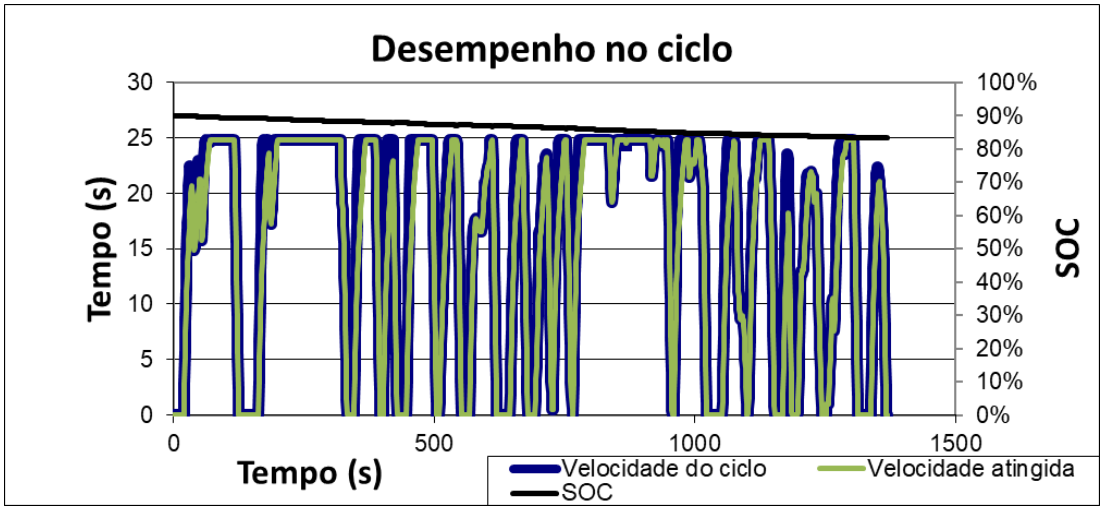
Fonte: o autor (2018).

Da mesma forma que na simulação 1, o que mais consome é o motor, seguido de arrasto e rodas. No entanto, o valor de gasto pelo motor e pelo arrasto decresce de 3565 Wh para 655 Wh (por cada ciclo executado) e 1143 Wh para 145 Wh, tornando-se bastante clara a vantagem de limitação de velocidade para melhor aproveitamento de energia.

4.3.4 Yamaha *Concierge 6* elétrico

No primeiro teste de limitação de velocidade, o veículo obteve autonomia no teste UDDS de 88,89 km e consumo de 0,12 kWh/km. O ciclo desempenhado encontra-se na figura 54.

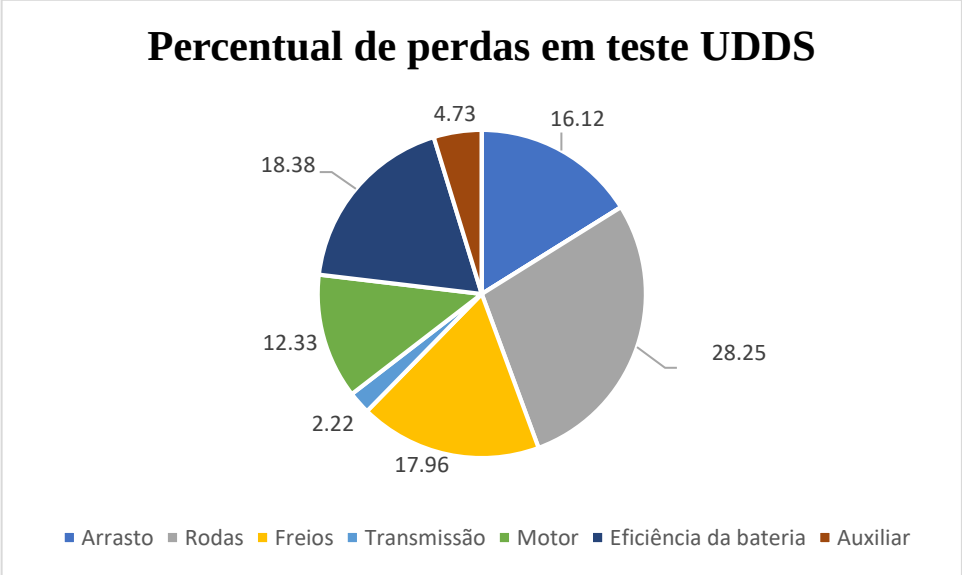
Figura 54 – Ciclo UDDS *Concierge 6* elétrico – simulação 3



Fonte: o autor (2018).

Ainda no mesmo teste, o veículo atingiu 2,43 kWh de energia recuperada pela frenagem regenerativa e média de eficiência de motor de 89,90 %. As perdas são elencadas a seguir.

Gráfico 27 – Percentual de perdas em teste UDDS – simulação 3

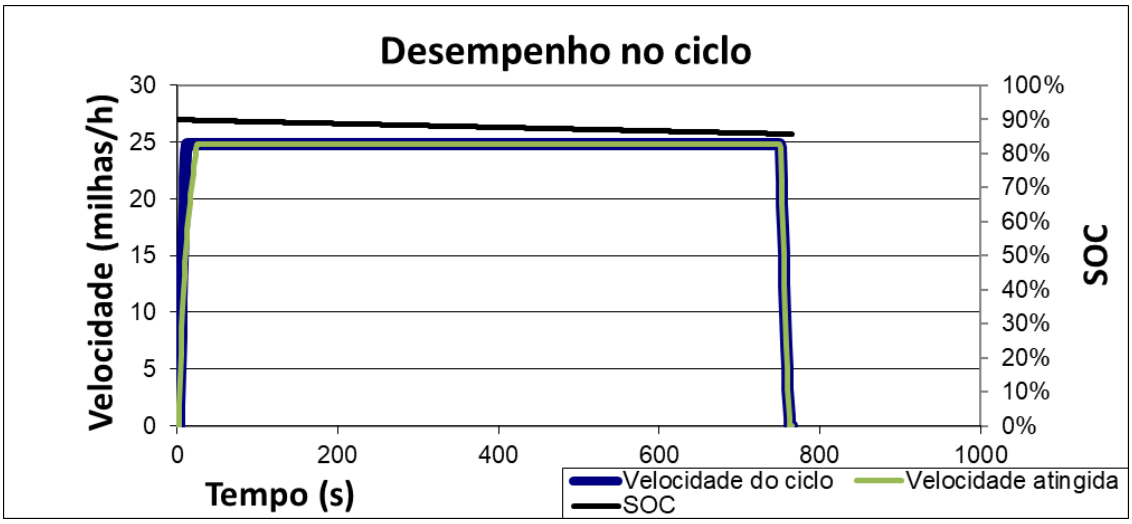


Fonte: o autor (2018).

A de maior magnitude é das rodas, seguido de eficiência das baterias e freios.

O teste HWY resultou em autonomia de 124,72 km e consumo de 0,08 kWh/km. O ciclo segue na Figura figura 55.

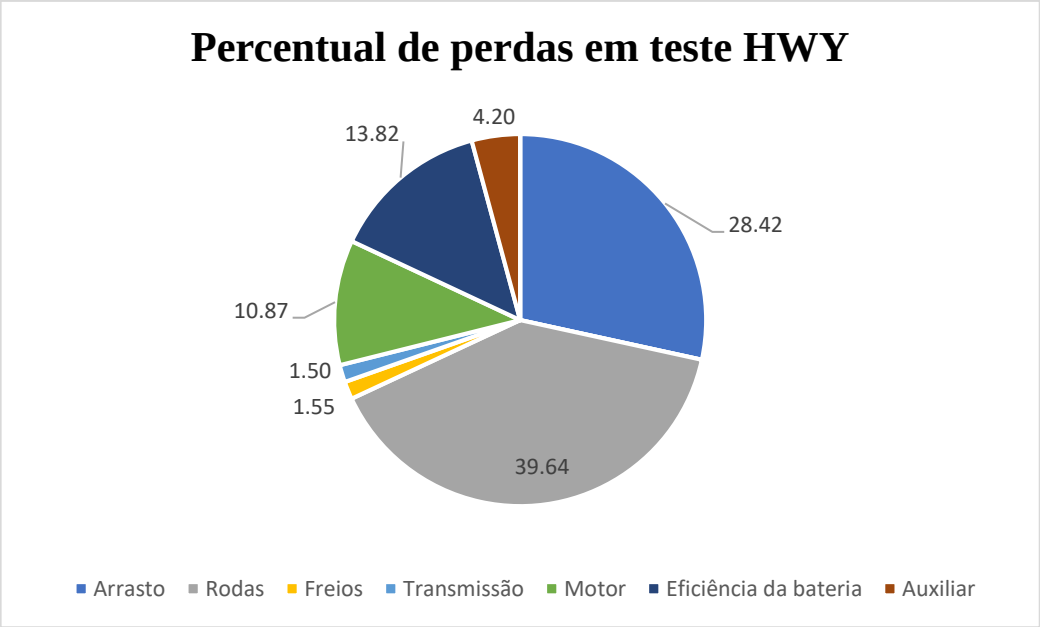
Figura 55 – Ciclo HWY *Concierge* – simulação 3



Fonte: o autor (2018).

Atingiu eficiência média do motor de 87,20 % e 214,50 Wh de energia recuperada por frenagem regenerativa. As perdas do teste são descritas no gráfico 28.

Gráfico 28 – Percentual de perdas em teste HWY – simulação 3



Fonte: o autor (2018).

É possível perceber o impacto das rodas avantajadas do Concierge neste teste, sendo as de maior impacto no consumo veicular. Seguido de arrasto e eficiência de baterias.

A eficiência do automóvel UDDS pode ser dada por 1:

$$E_{veículo-UDDS} = \frac{\Delta d}{\Delta W} = \frac{88{,}89\ \text{km}}{0{,}9 * 12{,}08\text{kWh}} = 8{,}17\,\frac{km}{kWh}\,ou\ 171{,}23\ MPGge$$

E HWY, por:

$$E_{veículo-HWY} = \frac{\Delta d}{\Delta W} = \frac{124{,}73\ \text{km}}{0{,}9 * 12{,}08\text{kWh}} = 11{,}47\,\frac{km}{kWh}\,ou\ 240{,}26\ MPGge$$

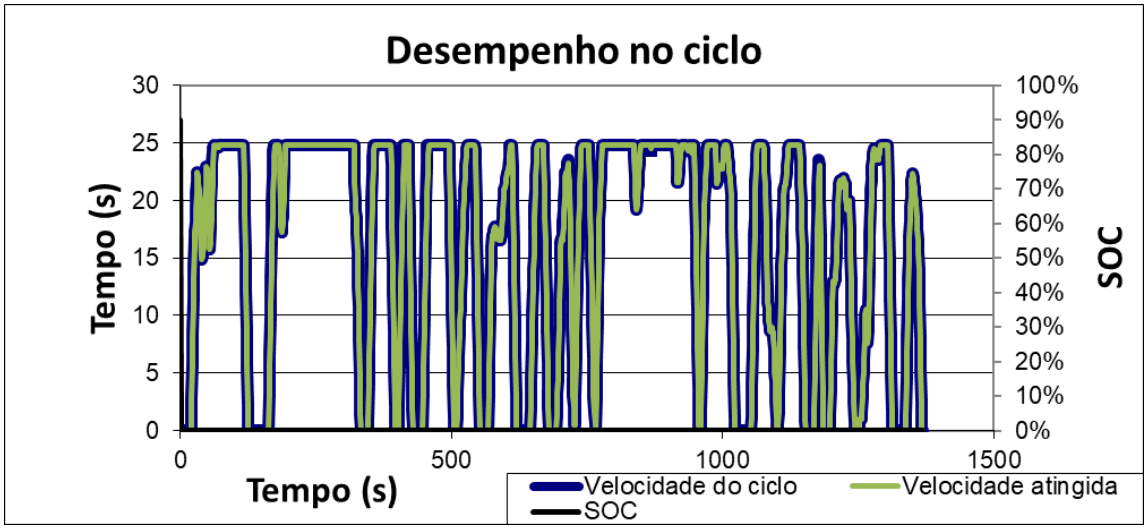
Sendo, portanto, o *score* combinado:

$$E_{veículo} = 0{,}55 * E_{veículo-UDDS} + 0{,}45 * E_{veículo-HWY} = 202{,}29\ MPGge$$

4.3.5 Yamaha *Concierge 6* a combustão

No teste de limitação de velocidade do veículo, em ciclo UDDS, a autonomia obtida foi de 499,06 km e o consumo de 28,66 km/l ou 67,40 MPG. Havendo, assim, considerável aumento em relação ao equivalente visto na simulação 2, comprovando a redução de consumo energético havendo decrescimento de velocidade, também para veículos a combustão. O ciclo pode ser observado na figura 56.

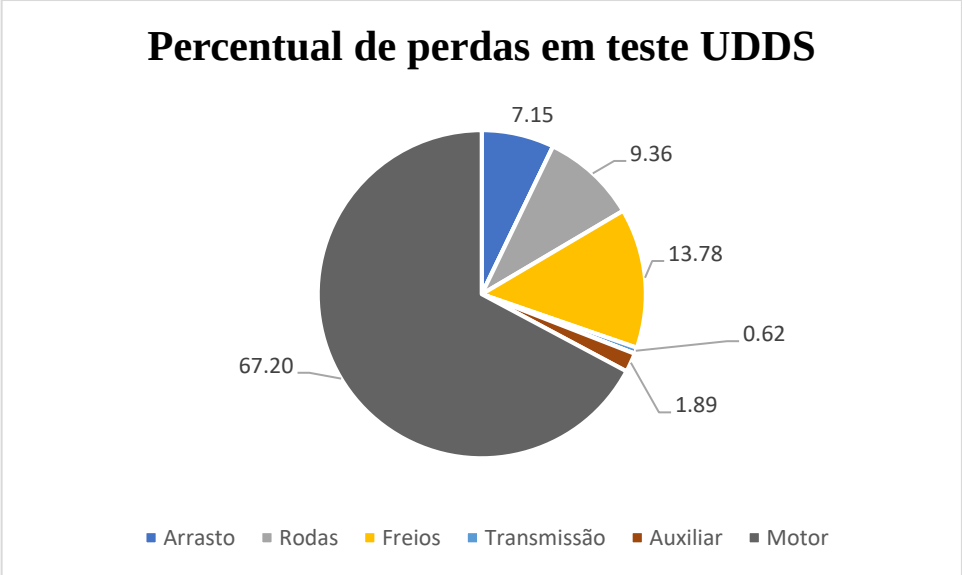
Figura 56 – Ciclo UDDS *Concierge 6* a combustão – simulação 3



Fonte: o autor (2018).

A eficiência média do motor foi de 32,80 %, havendo melhora, também, nas simulações anteriores, unicamente pela redução de velocidade máxima do teste. As perdas encontradas na simulação estão descritas no gráfico a seguir.

Gráfico 29 – Percentual de perdas em teste UDDS – simulação 3

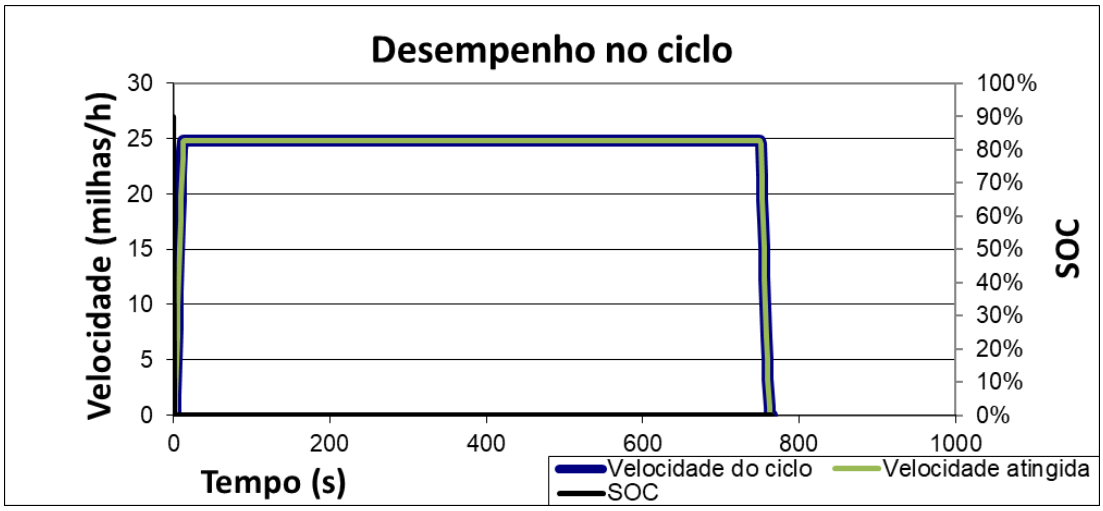


Fonte: o autor (2018).

Percebe-se um pequeno decréscimo no percentual de perdas pelo motor, ainda que, o mais expressivo ainda seja este. Seguido de freios e rodas.

A simulação HWY determinou autonomia de 826,09 km e consumo de 47,44 km/l ou 111,60 MPG. O ciclo pode ser visto na figura 57.

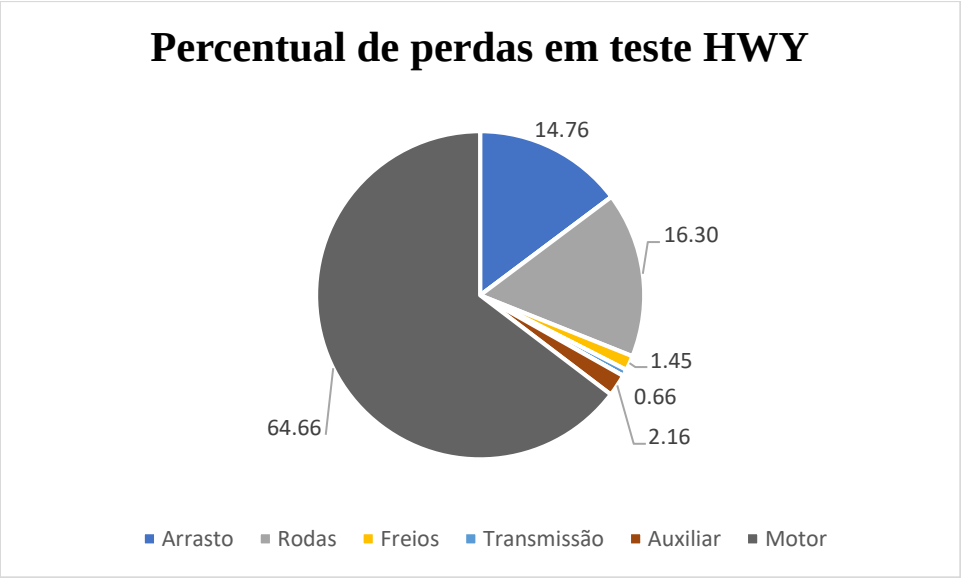
Figura 57 – Ciclo HWY *Concierge 6* a combustão – simulação 3



Fonte: o autor (2018).

A eficiência média do motor foi de 35,30 %. As perdas encontradas no teste são descritas pelo gráfico 30.

Gráfico 30 – Percentual de perdas em teste HWY – simulação 3



Fonte: o autor (2018).

As maiores perdas são provenientes do motor, seguidas de rodas e arrasto.

4.4 SIMULAÇÃO 4

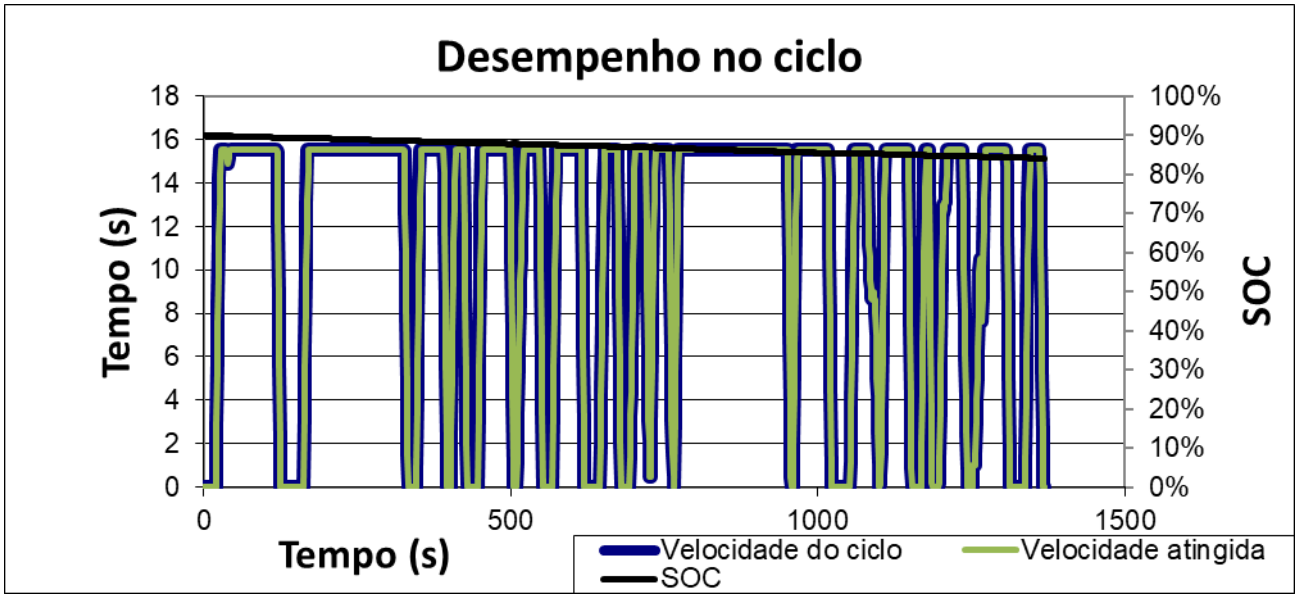
A simulação 4 objetiva obter o desempenho dos veículos respeitando imposições feitas pelo fabricante. Sendo assim, o peso é de 420 kg e a velocidade é variável para cada um dos testes seguindo o máximo pré-estabelecido.

4.4.1 Tramontina *Elettro 320CP*

Por determinação do fabricante a velocidade máxima é de 25 km/h. Observou-se nesse expressiva redução das perdas por arrasto, descendo até 160 kJ, porém, o veículo não pode

observar estas mesmas eficiências, visto que, pela limitação imposta a potência também foi reduzida, o que por consequência obriga o motor a operar numa zona de eficiência reduzida.

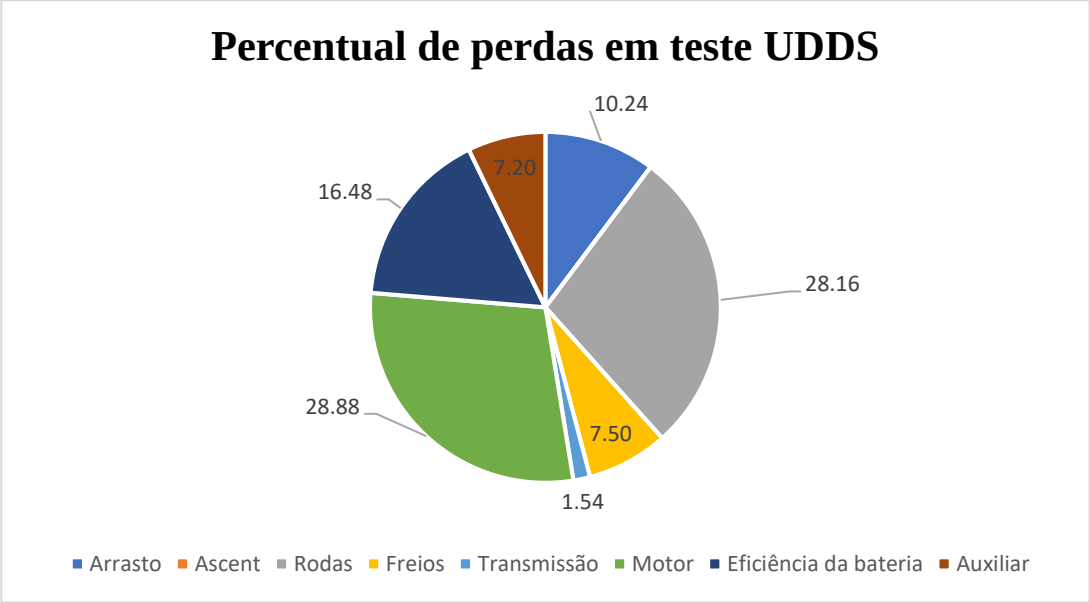
Figura 58 – Ciclo UDDS *Elettro 320CP* – simulação 4



Fonte: o autor (2018).

Observa-se, na figura 58, o achatamento causado pela limitação da velocidade. No ciclo UDDS, obteve uma autonomia de 73,16 km, consumo de 0,11 kWh/km, eficiência do motor de 69,70 % e energia recuperada por freio regenerativo de 1,14 kWh. As perdas do teste obtidas estão dispostas no gráfico a seguir.

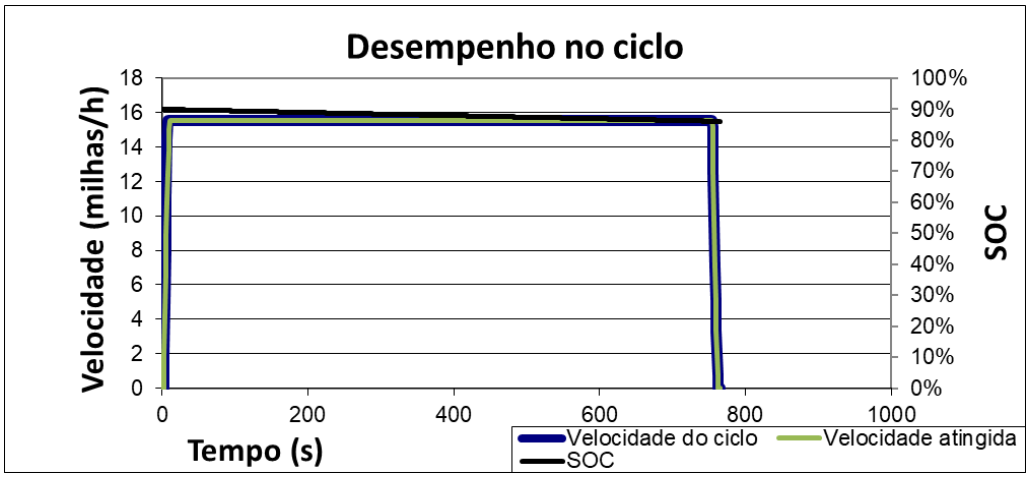
Gráfico 31 – Percentual de perdas em teste UDDS – simulação 4



Fonte: o autor (2018).

Na simulação 4, há uma igualdade entre motor e rodas. Sendo a terceira maior perda, as baterias.

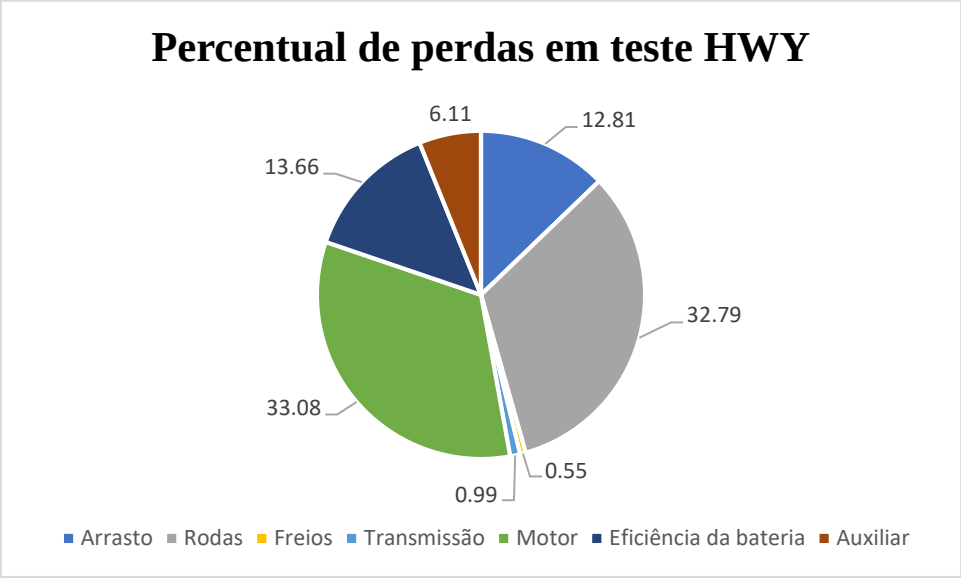
Figura 59 – Ciclo HWY *Elettro 320CP* – simulação 4



Fonte: o autor (2018).

O teste HWY pode ser visto na figura 59. A autonomia observada foi de 85,22 km, consumo de 0,09 kWh/km, eficiência do motor de 59,50 % e energia recuperada pelo freio regenerativo de 103,46 Wh. As perdas no teste HWY são descritas a seguir, no gráfico 32.

Gráfico 32 – Percentual de perdas em teste HWY – simulação 4



Fonte: o autor (2018).

Assim, pode-se perceber uma paridade entre perdas do motor e rodas. Sendo as perdas da bateria quase três vezes menor do que estas.

Pode-se calcular a eficiência na simulação 4 com auxílio da fórmula 1:

$$E_{veículo-UDDS} = \frac{\Delta d}{\Delta W} = \frac{73{,}17\ \text{km}}{0{,}9 * 9\text{kWh}} = 9{,}03\,\frac{km}{kWh}\,ou\ 189{,}17\ MPGge$$

E HWY, por:

$$E_{veículo-HWY} = \frac{\Delta d}{\Delta W} = \frac{85{,}22\ \text{km}}{0{,}9 * 9\text{kWh}} = 10{,}52\,\frac{km}{kWh}\,ou\ 220{,}34\ MPGge$$

Sendo, portanto, o *score* combinado:

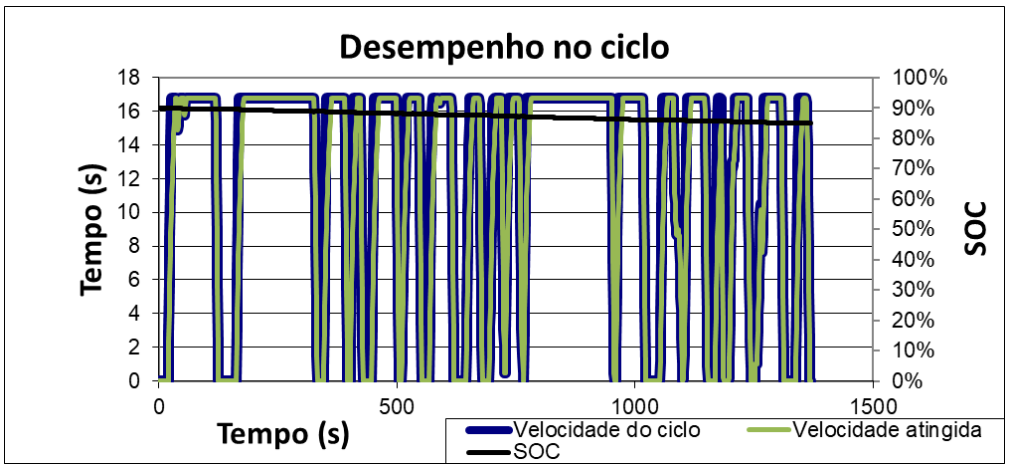
$$E_{veículo} = 0{,}55 * E_{veículo-UDDS} + 0{,}45 * E_{veículo-HWY} = 203{,}19\ MPGge$$

4.4.2 *Carryall 700* elétrico

No teste urbano, o veículo atingiu 87,17 km de autonomia, com consumo de 0,09 kWh/km. O ciclo pode ser visualizado na

Figura a 60, onde se observa que o veículo pode chegar muito próximo das velocidades propostas pela simulação.

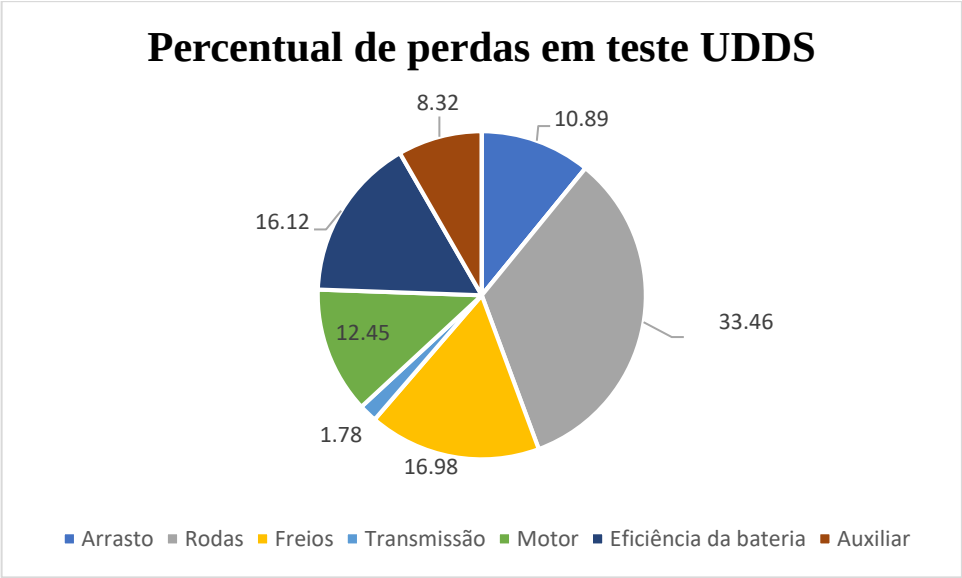
Figura 60 – Ciclo UDDS *Carryall 700* elétrico – simulação 4



Fonte: o autor (2018).

A energia recuperada na frenagem regenerativa foi de 0,99 kWh e a eficiência média do motor foi de 87,20 %, demonstrando grande vantagem de ter-se um motor de menor potência para velocidades reduzidas, possibilitando, assim, a operação durante a maior parte do tempo em uma zona de maior eficiência, em comparação a um motor de maior porte. Abaixo são elencadas as perdas do ciclo.

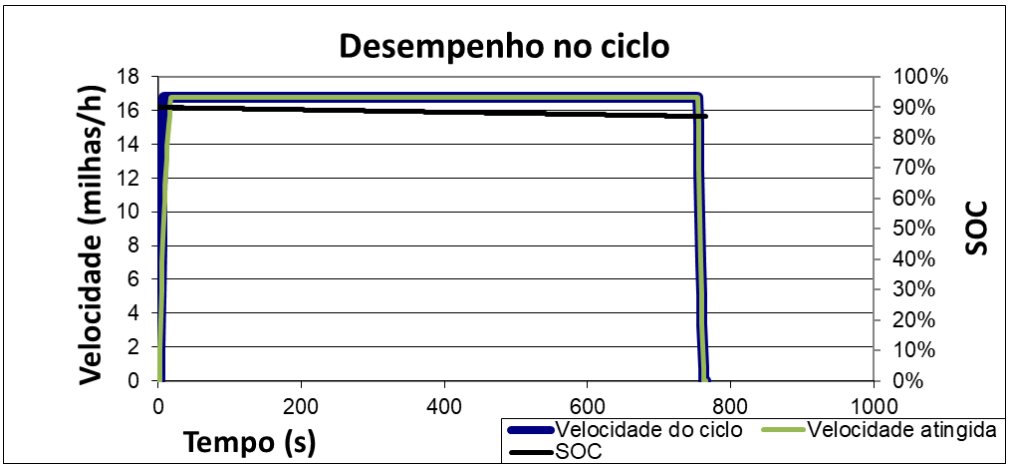
Gráfico 33 – Percentual de perdas em teste UDDS – simulação 4



Fonte: o autor (2018).

Pode ser visto que o maior consumo é nas rodas, seguido de quase empate entre eficiência de baterias e freios. O ciclo HWY resultou em 118,46 km de autonomia e consumo de 0,07 kWh/km, descrito pela figura 61.

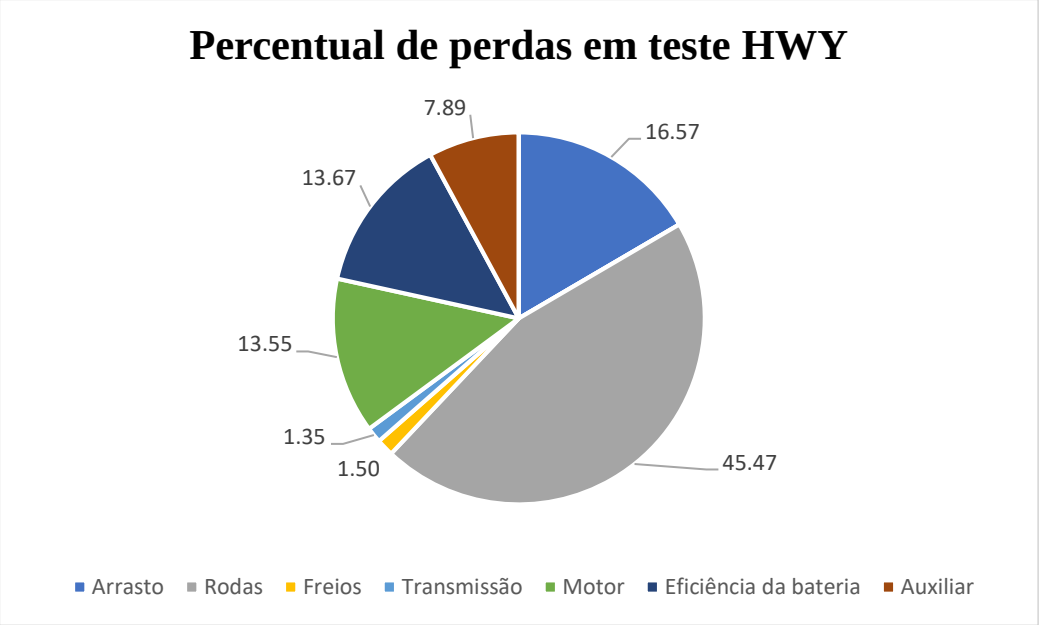
Figura 61 – Ciclo HWY *Carryall 700* elétrico – simulação 4



Fonte: o autor (2018).

A energia recuperada foi de 104,97 Wh e a eficiência do motor de 83,10 %, desse modo, houve uma considerável redução de 4,10 %, em comparação ao teste UDDS. As perdas do teste são descritas no gráfico 34.

Gráfico 34 – Percentual de perdas em teste HWY – simulação 4



Fonte: o autor (2018).

É possível analisar que houve grandes perdas nas rodas, seguido de arrasto e um empate entre eficiência de baterias e motor.

Pode-se calcular a eficiência na simulação 4 com auxílio da fórmula 1:

$$E_{veículo-UDDS} = \frac{\Delta d}{\Delta W} = \frac{87{,}17\ \text{km}}{0{,}9 * 9\text{kWh}} = 10{,}76 \frac{km}{kWh} ou\ 225{,}39\ MPGge$$

E HWY, por:

$$E_{veículo-HWY} = \frac{\Delta d}{\Delta W} = \frac{118{,}46\ \text{km}}{0{,}9 * 9\text{kWh}} = 14{,}62 \frac{km}{kWh} ou\ 306{,}28\ MPGge$$

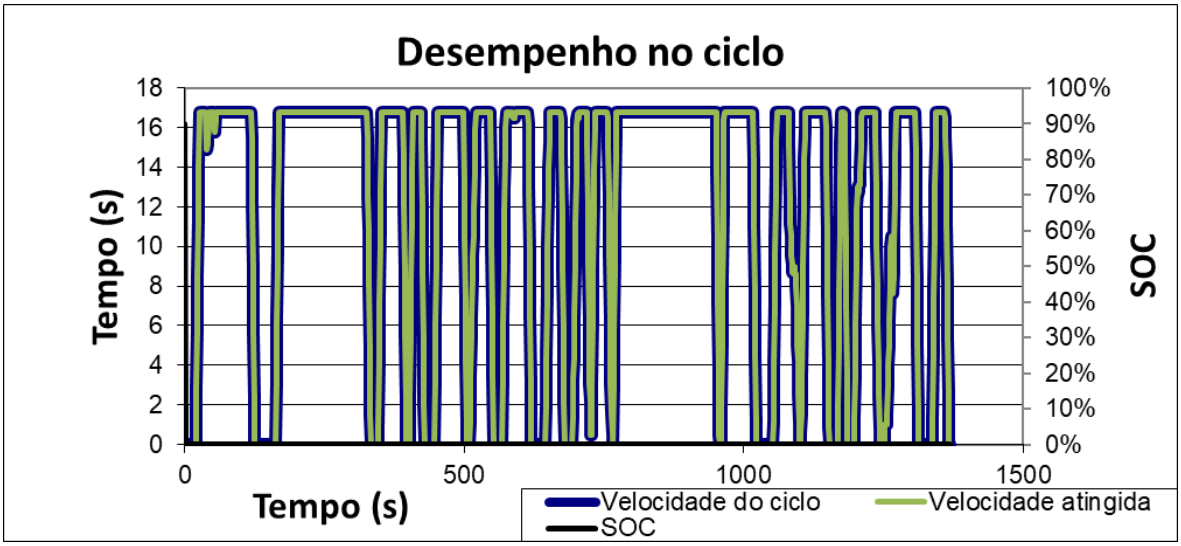
Sendo, portanto, o *score* combinado:

$$E_{veículo} = 0{,}55 * E_{veículo-UDDS} + 0{,}45 * E_{veículo-HWY} = 261{,}79\ MPGge$$

4.4.3 *Carryall 700* combustão

Em teste urbano o veículo obteve autonomia de 592,84 km e consumo de 34,05 km/l ou 80,10 MPG. O ciclo pode ser visto na figura 62.

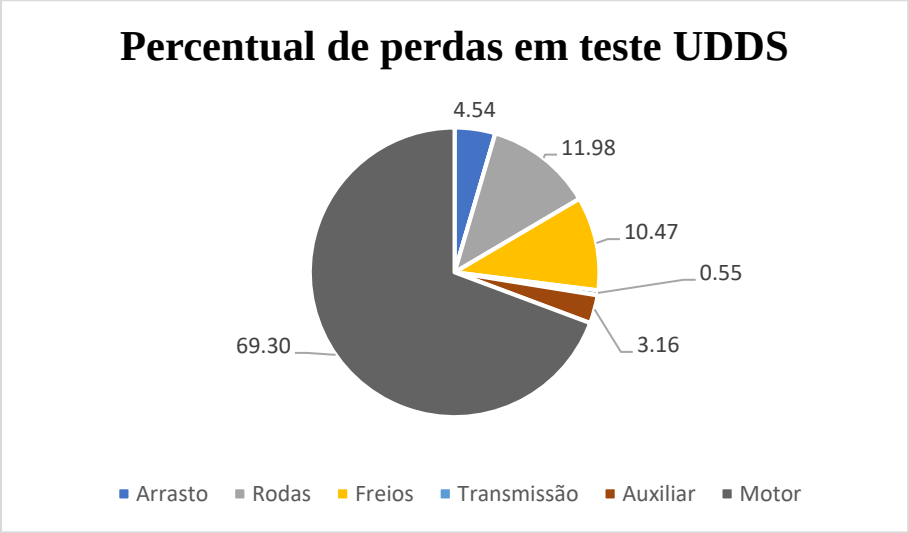
Figura 62 – Ciclo UDDS *Carryall 700* combustão – simulação 4



Fonte: o autor (2018).

A eficiência média do motor encontrada foi de 30,70 %. As perdas podem ser vistas no gráfico abaixo.

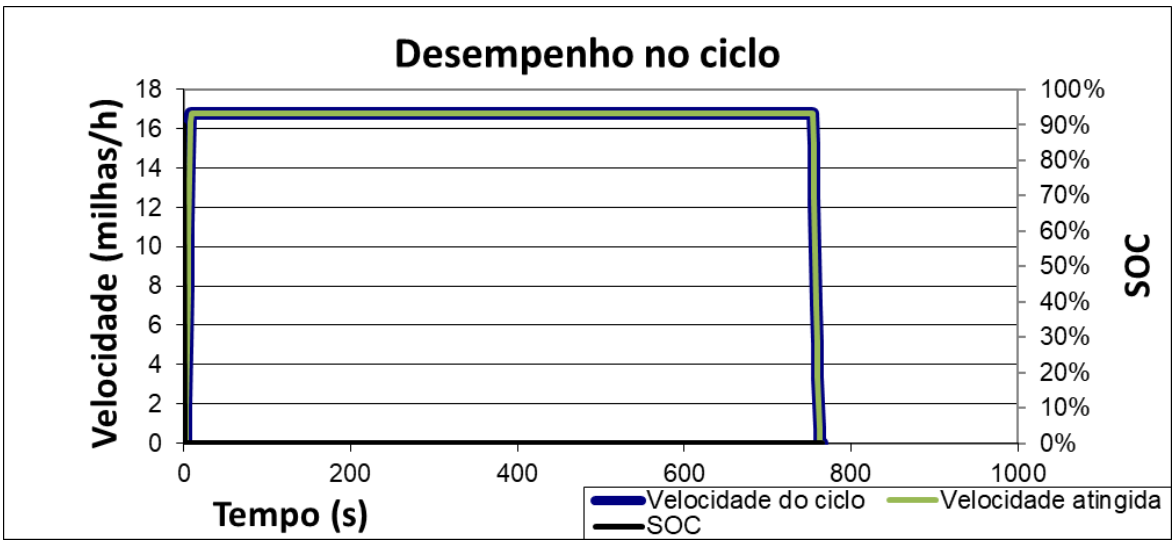
Gráfico 35 – Percentual de perdas em teste UDDS – simulação 4



Fonte: o autor (2018).

Nota-se que a maior perda é proveniente do motor, seguida de rodas e freio. O ciclo HWY obteve autonomia de 886,30 km e consumo médio de 50,90 km/l ou 119,70 MPG, o ciclo é descrito pela figura 63.

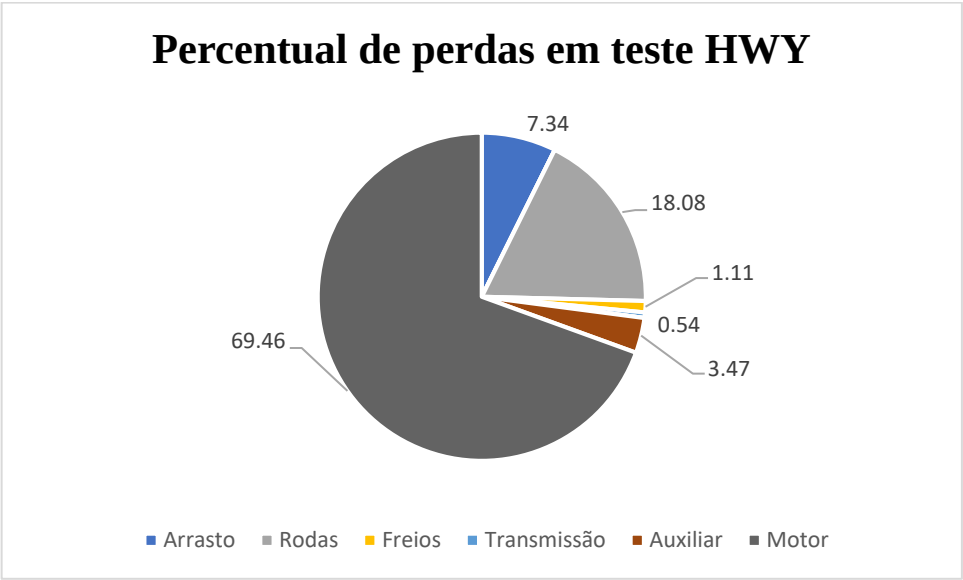
Figura 63 – Ciclo HWY *Carryall 700* combustão – simulação 4



Fonte: o autor (2018).

A eficiência média do motor foi de 30,50 %. As perdas podem ser vistas no gráfico que segue.

Gráfico 36 – Percentual de perdas em teste HWY – simulação 4



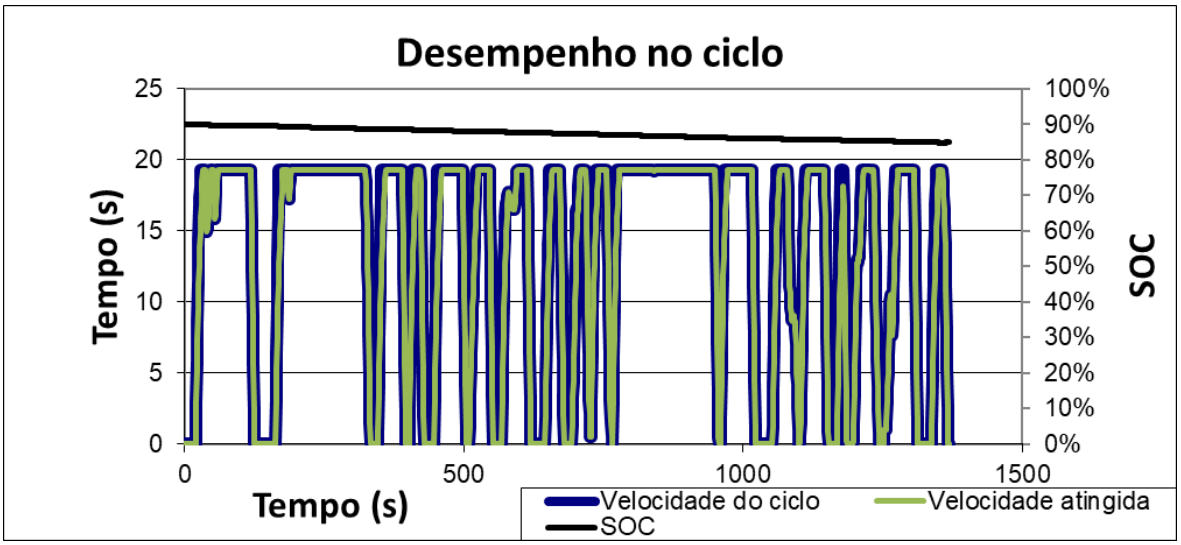
Fonte: o autor (2018).

A maior perda é do motor, seguida de rodas e arrasto. Corroborando com os resultados obtidos na simulação 3 do mesmo veículo, observou-se grandes vantagens de se limitar a velocidade, ainda que este teste seja utópico. O motor apesar de operar menos eficiente reduziu a energia gasta por usar menos potência indo de 655 Wh para 425 Wh (para cada ciclo do teste), o arrasto de 145 Wh para 44 Wh (para cada ciclo do teste).

4.4.4 Yamaha *Concierge 6* elétrico

O teste UDDS do veículo resultou em autonomia de 98,87 km e consumo de 0,11 kWh/km. O ciclo pode ser visto na figura 64.

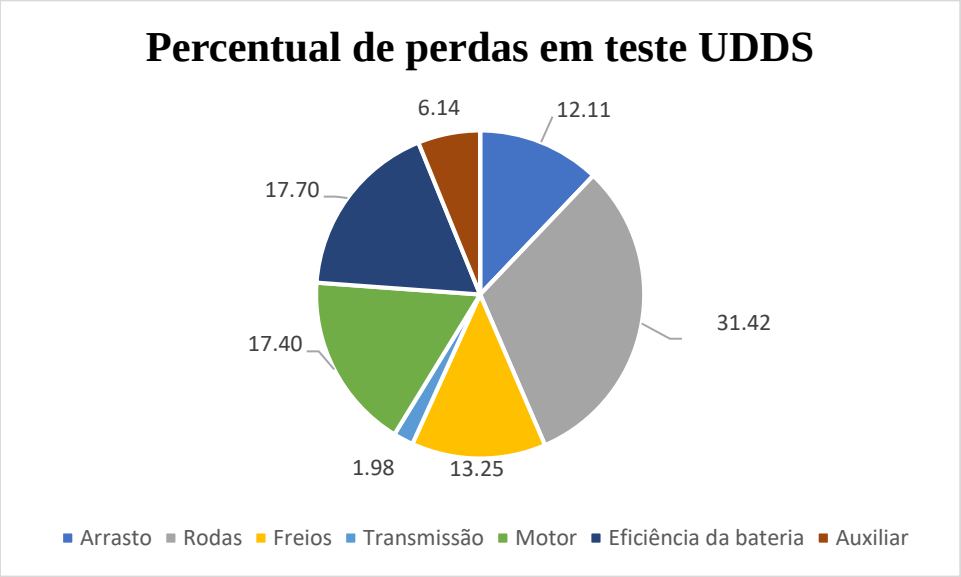
Figura 64 – Ciclo UDDS *Concierge 6* elétrico – simulação 4



Fonte: o autor (2018).

O motor do veículo obteve eficiência média de 83,70 % de eficiência e 2,07 kWh de recuperação de energia por frenagem regenerativa. As perdas obtidas no teste são encontradas a seguir.

Gráfico 37 – Percentual de perdas em teste UDDS – simulação 4

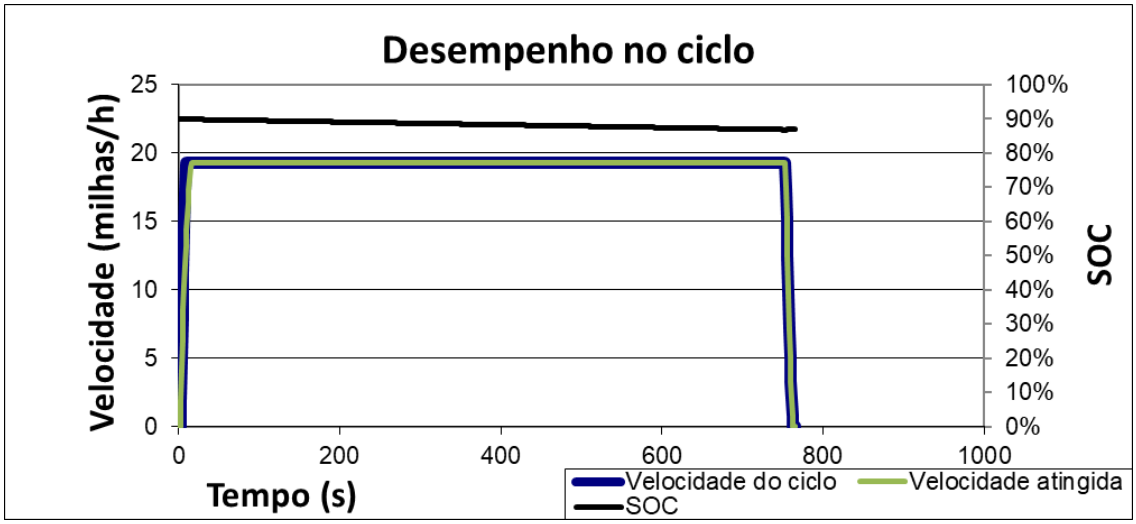


Fonte: o autor (2018).

A maior perda é proveniente das rodas, seguido de eficiência de baterias e eficiência do motor, que já passa a configurar uma operação abaixo da otimizada para esse teste.

O ciclo HWY resultou numa autonomia de 129,41 km e consumo de 0,08 kWh/km e pode ser visto na figura 65.

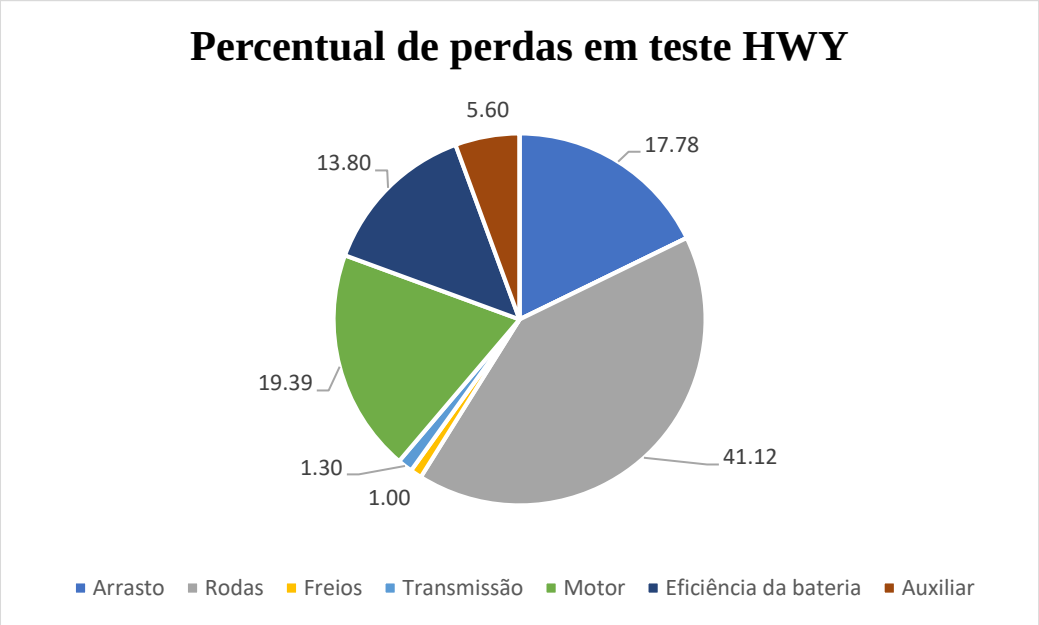
Figura 65 – Ciclo HWY *Concierge 6* elétrico – simulação 4



Fonte: o autor (2018).

A eficiência média do motor foi de 76,60 % e a energia recuperada foi de 204 Wh. As perdas são vistas no gráfico a seguir.

Gráfico 38 – Percentual de perdas em teste HWY – simulação 4



Fonte: o autor (2018).

As maiores perdas são ainda provenientes das rodas, seguido da baixa eficiência do motor e arrasto. A eficiência da bateria passou para o quarto lugar neste teste.

Pode-se calcular a eficiência na simulação 4 com auxílio da fórmula 1:

$$E_{veículo-UDDS} = \frac{\Delta d}{\Delta W} = \frac{98{,}87\ \text{km}}{0{,}9 * 9\text{kWh}} = 9{,}09\,\frac{km}{kWh}\,ou\ 190{,}45\ MPGge$$

E HWY, por:

$$E_{veículo-HWY} = \frac{\Delta d}{\Delta W} = \frac{129{,}41\ \text{km}}{0{,}9 * 9\text{kWh}} = 11{,}90\,\frac{km}{kWh}\,ou\ 249{,}28\ MPGge$$

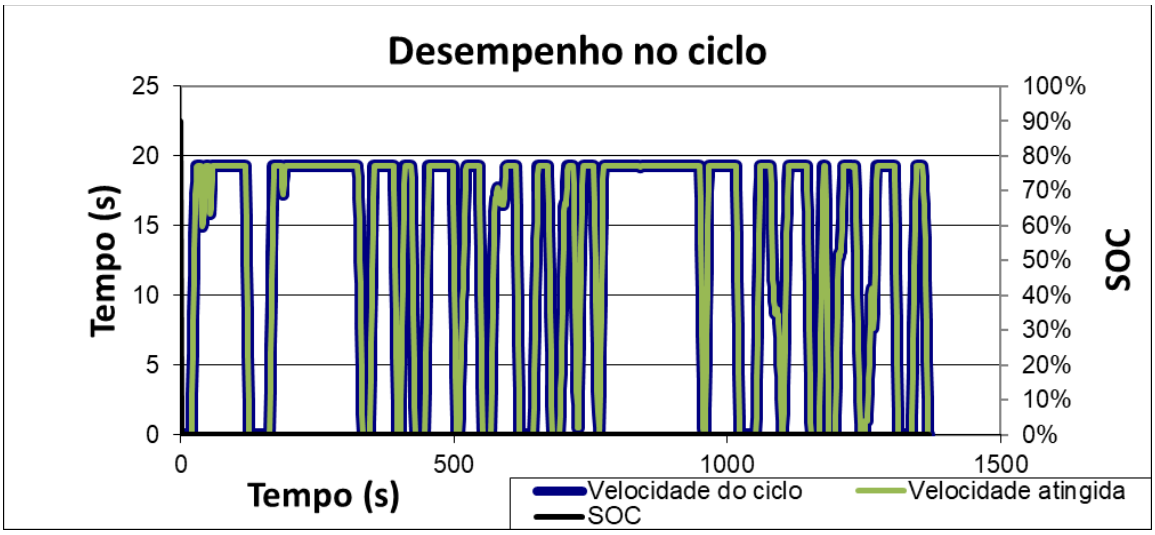
Sendo, portanto, o *score* combinado:

$$E_{veículo} = 0{,}55 * E_{veículo-UDDS} + 0{,}45 * E_{veículo-HWY} = 216{,}93\ MPGge$$

4.4.5 Yamaha *Concierge 6* a combustão

No teste UDDS o veículo obteve autonomia de 578,32 km e consumo de 33,21 km/l ou 78,10 MPG. Mostrando assim melhora considerável em relação a simulação 3, onde há uma limitação de velocidade mais branda. O ciclo pode ser vistons figura 66.

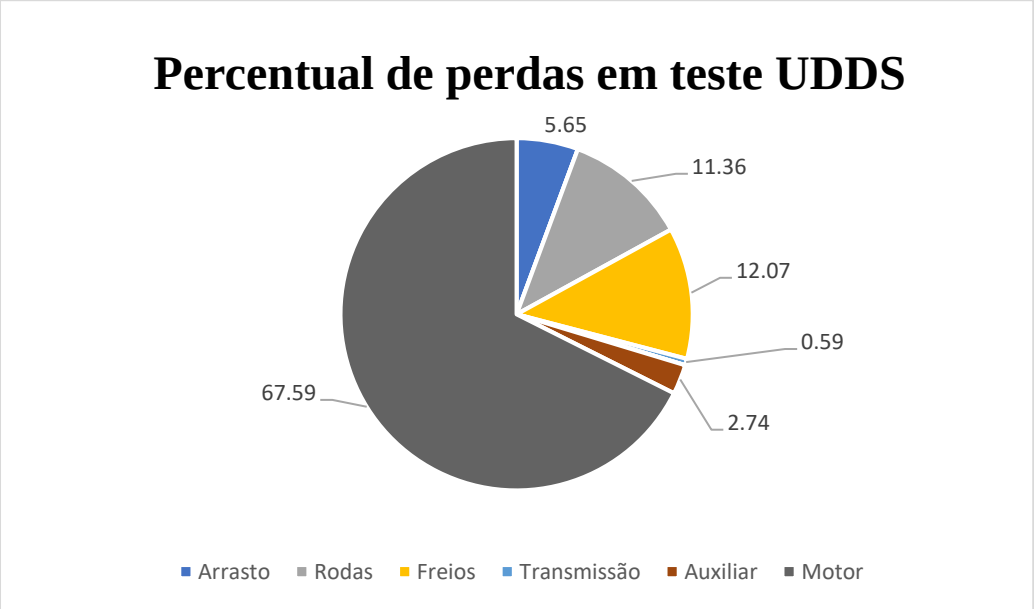
Figura 66 – Ciclo UDDS *Concierge 6* a combustão – simulação 4



Fonte: o autor (2018).

A eficiência média encontrada no motor foi de 32,40 % e as perdas totais do teste encontram-se no gráfico 39.

Gráfico 39 – Percentual de perdas em teste UDDS – simulação 4

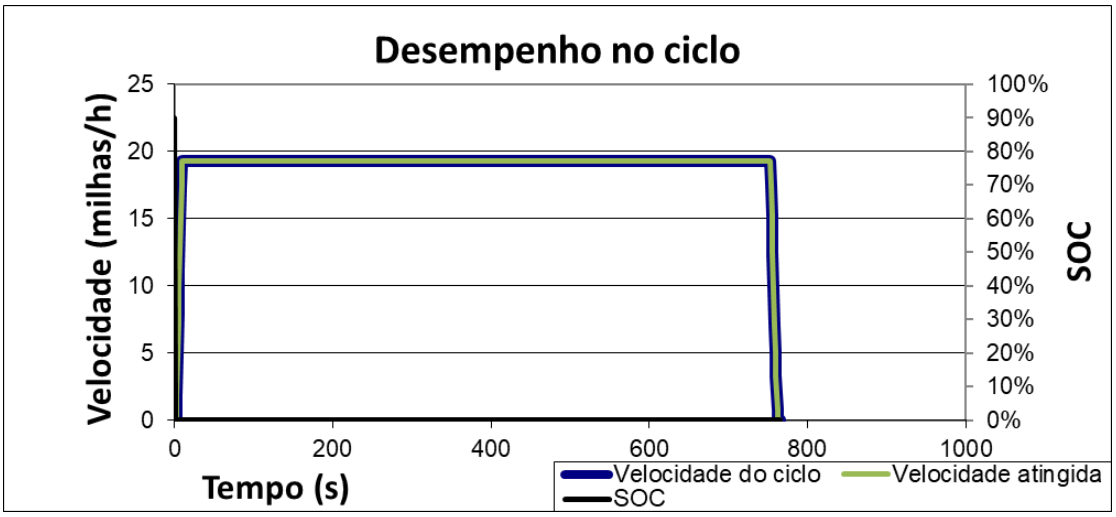


Fonte: o autor (2018).

Pode ser visto que a origem das perdas é, principalmente, encontrada no motor, como foi visto em todos os testes de veículos a combustão. Em segundo lugar encontra-se o freio e em terceiro as rodas.

Já para o teste HWY, a autonomia verificada foi de 922,50 km e o consumo de 52,98 km/l ou 124,60 MPG. O ciclo pode ser visto na figura 67.

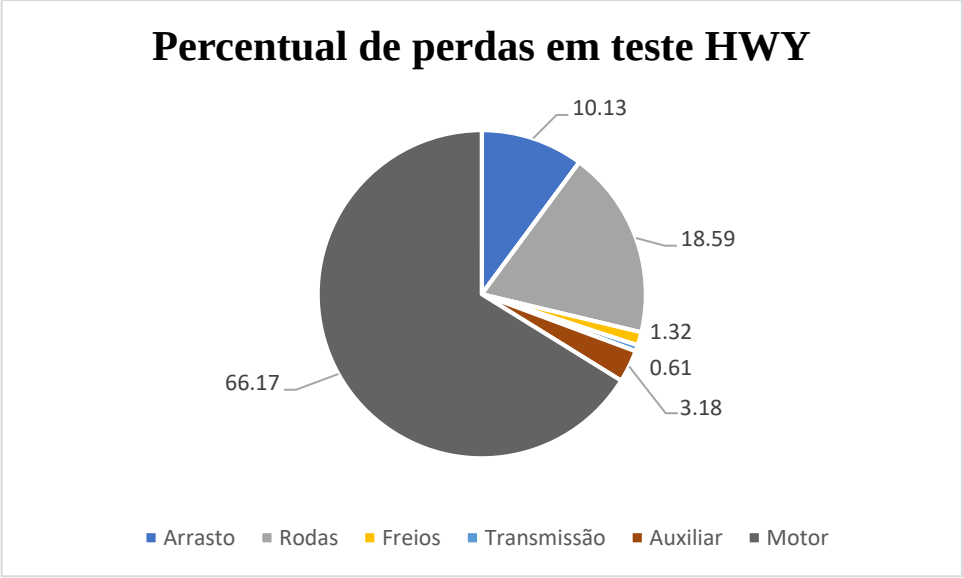
Figura 67 – Ciclo HWY *Concierge 6* a combustão – simulação 4



Fonte: o autor (2018).

O teste determinou que a eficiência média do motor resultou em de 33,80 %. As perdas encontradas seguem no gráfico abaixo.

Gráfico 40 – Percentual de perdas em teste HWY – simulação 4



Fonte: o autor (2018).

Percebe-se que a maior quantidade de gasto energético é proveniente do motor, seguido de rodas e arrasto.

5 RESULTADOS

Nesse projeto, buscou-se observar o impacto que diferentes variáveis teriam na autonomia veicular, sob um cenário de rodovia e um cenário urbano. Para tanto, utilizou-se o programa *NREL FASTsim* para obtenção de uma projeção do que seria a maior distância possível de se percorrer, com uma carga apenas na bateria.

Os resultados são bastante condizentes à realidade. Faz-se a ressalva, em particular, dos dados obtidos para as simulações 3 e 4 de veículos a combustão, ambos testes submetendo o veículo a reduções de velocidades. Apesar de verídicos, esses são submetidos a um cenário bastante surreal, mantendo uma velocidade constante ao longo do trajeto, tendo apenas a partida e a parada para única alteração da velocidade, resultando, assim, em autonomias bastante elevadas e, não sendo possível tirar grandes conclusões destas simulações, em particular.

A primeira simulação objetivou estabelecer o primeiro parâmetro de comparação, sendo assim, possível avaliar nas próximas simulações alterações de autonomia por mudanças de peso e velocidade. Ela considera um dos piores cenários para um veículo elétrico, do ponto de vista do consumo energético: peso elevado e velocidade irrestrita. Pode-se observar nesta, que o maior desempenho é o do *Yamaha Concierge 6*, pois, apesar de possuir peso superior aos demais, também agrega mais energia, 12,08 kWh, em comparação aos 9 kWh dos outros dois veículos elétricos simulados. A tabela 6, a seguir, elenca os dados de autonomia da simulação 1.

Tabela 6 – Comparativo de autonomia de veículos, obtida na simulação 1 do projeto

Veículo	Autonomia UDDS	Autonomia HWY
Elettro 320CP	60,78 km	60,25 km
Carryall 700 elétrico	69,67 km	83,44 km
Carryall 700 a combustão	398,52 km	338,12 km
Yamaha Concierge 6 elétrico	80,09 km	84,54 km
Yamaha Concierge 6 a combustão	406,07 km	356,21 km

Fonte: o autor (2018).

Fica clara a vantagem de veículos a combustão, quando apenas a autonomia é considerando, obtendo resultados de cinco até quase sete vezes maiores. O *Concierge 6* a combustão demonstrou-se superior, por possuir um tanque de maior capacidade, o que resulta, assim, em mais energia. Por outro lado, também há a potência do motor, maior no *Carryall 700*, fazendo esse consumir mais energia por ciclo do que o adversário, da Yamaha.

Para os elétricos, além da capacidade da bateria e do motor, pode-se prezar por um chassi reduzido, isto é, comparando-se *o Elettro 320CP* e o *Carryall 700*. O motor de menor potência e a área frontal beneficiou o segundo, em uma autonomia 14,62% no teste urbano e 38,48% de vantagem no teste rodoviário. Tal análise indica que uma boa autonomia pode ser extraída a partir de um dimensionamento adequado, não apenas de bateria, mas de área frontal e motores reduzidos, que estão alinhados com os objetivos deste projeto de propor um veículo de velocidade reduzida, necessitando, portanto, de baixa potência para o deslocamento.

Esse teste também destacou a dificuldade de motores de baixa potência, os elétricos, em cumprir as velocidades determinadas pelos dois testes, UDDS e HWY, ainda que não seja de grande preocupação para este projeto, a ressalva deve ser feita, uma vez que, o consumo em MPGge não pode ser diretamente comparado a outros veículos que possuem o mesmo selo no mercado. Os veículos a combustão também não devem ser comparados, já que o teste padrão EPA utiliza carga de 136 kg e para este projeto a carga considerada foi de 420 kg.

O grande destaque desse teste é o veículo elétrico *Carryall 700*. Com uma das menores capacidades de energia dos veículos, mas com motor, chassi e rodas adequadas, o veículo foi capaz de reduzir perdas por arrasto e obter excelentes resultados. O fabricante permite que sejam usadas baterias de capacidade estendida tornando equivalente à capacidade do *Yamaha Concierge 6 elétrico*, aumentando ainda mais a autonomia do veículo.

Como todas as baterias simuladas nos veículos são de chumbo-ácido, foi possível observar duas graves deficiências destas: peso e baixa eficiência. Além de não possuir grande quantidade de energia agregada, baixa relação energia/peso, as baterias sofreram com a baixa eficiência da tecnologia, resultando em perdas variando entre 13% e 18%, na simulação 1 para veículos elétricos, enaltecendo a urgência de ser feita a troca por uma tecnologia que não apenas possua maior densidade de energia, mas também menores perdas por efeito Joule.

Nesse teste, onde a velocidade é livre, pode-se ver a vantagem da recuperação de energia por frenagem regenerativa, onde foi possível recuperar de 1,15 kWh até 2,07 kWh. Pode-se observar, ainda, uma equivalência de energia recuperada por velocidades atingidas pelo veículo, capacidade total das baterias, e, claro, quantidade de frenagens e de redução de velocidades nos testes, uma vez que a simulação HWY conta com menos frenagens. Portanto,

apresentou resultados ruins. Porém, para o cenário abordado neste projeto, é de fato uma solução bastante pertinente.

A simulação 2 foi executada, de modo, a analisar as hipóteses feitas a respeito do impacto do peso na autonomia veicular, feita neste projeto. Para tanto, reduziu-se o peso da carga de 420 kg para 210 kg, supondo que o veículo estaria com meia carga, para esse cenário.

Uma das primeiras consequências observadas para essa simulação foi de que por haver menos peso aos veículos, foi possível executar frenagens regenerativas mais frequentemente e de maior impacto, reduzindo as frenagens mecânicas. Determinando, assim, que não apenas o alívio da carga veicular é capaz de demandar menos potência do motor, logo, menos energia das baterias, mas também a recuperação de energia, através da redução de peso.

Tabela 7 – Comparativo das simulações 1 e 2 das energias recuperadas em simulação UDDS

Veículo	Energia recuperada simulação 1	Energia recuperada simulação 2	Percentual de melhora
Elettro 320CP	1,75 kWh	1,84 KWh	4,77%
Carryall 700 elétrico	1,15 kWh	1,28 kWh	10,72%
Yamaha Concierge 6 elétrico	2,44 kWh	2,63 kWh	7,78%

Fonte: o autor (2018).

Na tabela 7, é possível verificar, diretamente, a melhora trazida por frenagem regenerativa. Além disso, pode-se analisar, também, que o veículo em que houve o melhor percentual de melhora é aquele que já possuía grande peso, em comparação aos outros dois.

A seguir, na tabela 8, verifica-se propriamente a autonomia obtida na simulação 2 para todos os veículos.

Tabela 8 – Evolução da autonomia através da redução do peso de carga

Veículo	Autonomia UDDS	Diferença em % para simulação 1	Autonomia HWY	Diferença em % para simulação 1
Elettro 320CP	68,86 km	13,29%	62,14 km	3,13%
Carryall 700 elétrico	76,63 km	9,98%	86,68 km	3,88%
Carryall 700 a combustão	454,15 km	13,95%	360,01 km	6,47%
Yamaha Concierge 6 elétrico	90,64 km	13,17%	87,85 km	3,91%
Yamaha Concierge 6 a combustão	463,18 km	13,88%	374,83 km	5,22%

Fonte: o autor (2018).

Pode-se observar uma consistente melhora de desempenho para todos os veículos, de autonomia no teste UDDS. O veículo menos beneficiado, foi o *Carryall 700 elétrico*, que por possuir a menor potência de motor, e ainda um peso elevado comparando-se aos demais, continuou a manter um gasto energético elevado por manter a potência do motor sempre ao máximo, mesmo com alívio de carga.

O teste HWY, no entanto, não contou com a mesma consistência, pelo menos, para veículos elétricos. Durante o ciclo HWY, não há grandes recuperações por frenagens regenerativas, uma vez que, poucas frenagens são executadas. Não havendo melhora de autonomia, portanto, através dessas. Os motores, que já são de baixa potência, comprovadamente, trabalham durante quase todo ciclo, demandando total potência – o que pode ser visto pela dificuldade dos veículos atingirem as velocidades padrões do ciclo vista nos gráficos. Assim, a mudança do peso possibilita, apenas, mudanças de velocidades máximas atingidas (o que não é o foco deste projeto), sendo a melhora de autonomia bastante ínfima. Já para veículos a combustão houve melhoras, dada a potência de seus motores são maiores.

Ainda na análise do ciclo rodoviário, pode ser observada outra anomalia: a autonomia deste é sempre inferior do que o UDDS, o que vai contra o senso comum, de que há mais autonomia, mais eficiência em trajetos rodoviários, dado que não são necessárias frenagens constantes, recuperações de velocidade, normalmente, verificadas em um ciclo urbano, que são bastante onerosas para o consumo energético. Além de motor reduzido, que obriga esses veículos a trabalhar em potência total, durante o tempo todo nesse ciclo; nesse projeto são utilizados veículos de grande área frontal, comparando-se a veículos tradicionais disponíveis no mercado. Assim, o consumo por arrasto é sempre de grande peso durante essa simulação, por esse ser diretamente proporcional à área frontal do veículo e à velocidade desempenhada. É possível visualizar na o dispêndio por arrasto em uma iteração do ciclo HWY.

Tabela 9 – Anomalia proveniente do aumento do arrasto pela redução do peso

Veículo	Consumo por arrasto simulação 1	Consumo por arrasto simulação 2
Elettro 320CP	583,60 Wh	639,64 Wh
Carryall 700 elétrico	279,60 Wh	309,63 Wh
Carryall 700 a combustão	1143,62 Wh	1171,72 Wh
Yamaha Concierge 6 elétrico	526,38 Wh	577,62 Wh
Yamaha Concierge 6 a combustão	1026,46 Wh	1075,61 Wh

Fonte: o autor (2018).

Como é possível ver no teste em HWY, em particular, há mais uma anomalia: a redução de peso causa um incremento no gasto energético por arrasto. A explicação para isso é que a velocidade média do teste é aumentada significativamente, portanto, mesmo com metade do peso, o veículo não possui grande vantagem por arrasto. A autonomia aumenta, justamente, porque a velocidade do teste também aumenta, e não, por um gasto energético menor. O gasto energético mantém-se bastante próximo entre as iterações HWY do teste 1 e do teste 2, pois há, também, um gasto menor nas rodas dos veículos, que são beneficiadas

diretamente pela redução do peso. Concluindo-se que para esse teste, neste projeto, o ciclo rodoviário não apresentou grandes evoluções, exclusivamente, por redução de peso. O impacto do arrasto pode ser percebido com grande destaque em veículos a combustão, por terem os motores de maior potência.

A mesma dependência foi verificada no veículo *Carryall 700 elétrico*. Mesmo com a redução de peso, sua velocidade constante, apesar, de se elevar, não foi de mesma magnitude por ter o motor mais fraco em comparação aos outros, apresentando, portanto, o pior incremento de autonomia do teste 1 para o 2. Verifica-se, também, certa dualidade trazida em detrimento desse motor, ainda que tenha desempenhado a pior melhora, é também o que justifica o bom consumo energético deste veículo. Para os parâmetros de peso tratados nesse projeto, pode ser um grande destaque de eficiência, mas à medida que o peso aumentar, o motor pode passar a sofrer para acompanhar os demais - de maior potência.

Como veículo de destaque da simulação 2, pode-se considerar o *Elettro 320CP*, por ser o mais beneficiado pela redução do peso dentre os elétricos, porém, de pior autonomia, agravado pela área frontal. Ou, ainda, o *Yamaha Concierge 6 elétrico*, de elevada autonomia e de boa melhora por redução de peso, mas, também, justificado pela maior capacidade total de energia.

A simulação 3 objetivou abordar o impacto de uma possível limitação de velocidade no veículo mais branda, que a imposta pelos fabricantes, poderia causar na autonomia. Assim, diferente do abordado anteriormente, a velocidade média é reduzida, reduzindo-se, assim, a distância percorrida a cada iteração do teste, por outro lado, também reduzindo o consumo energético. O peso foi estabelecido como o mesmo da primeira simulação, isto é, 420 kg de carga.

Naturalmente, o impacto mais significativo foi no consumo energético proveniente do arrasto. Como visto anteriormente, há uma direta relação de velocidade e arrasto, assim, a analise da simulação 3 é de forma direta e não indireta como realizada na segunda simulação (WANG, GAO, 2014). A tabela 10 compara o consumo energético proveniente do arrasto nas duas simulações.

Tabela 10 – Comparativo entre consumo energético por arrasto da segunda e da terceira simulação, ciclo HWY

Veículo	Consumo por arrasto simulação 2	Consumo por arrasto simulação 3
Elettro 320CP	639,64 Wh	179,98 Wh
Carryall 700 elétrico	309,63 Wh	142,05 Wh
Carryall 700 a combustão	1171,72 Wh	145,11 Wh
Yamaha Concierge 6 elétrico	577,62 Wh	143,73 Wh
Yamaha Concierge 6 a combustão	1075,61 Wh	144,89 Wh

Fonte: o autor (2018).

O impacto desse consumo energético foi grande, a ponto de tornar válida a redução de velocidade para os testes, em concordância aos parâmetros desse projeto. A seguir, pode-se traçar uma comparação entre a simulação 1 e 3, para se determinar, não apenas o arrasto, mas o quanto haverá, de fato, incremento de autonomia para uma velocidade de teste reduzida.

Tabela 11 – Comparativo entre autonomia da primeira e terceira simulação

Veículo	Autonomia UDDS	Diferença em % para simulação 1	Autonomia HWY	Diferença em % para simulação 1
Elettro 320CP	68,23 km	12,25 %	90,15 km	49,62 %
Carryall 700 elétrico	72,69 km	4,33 %	104,20 km	24,88 %
Carryall 700 a combustão	494,86 km	24,17 %	809,55 km	239,42 %
Yamaha Concierge 6 elétrico	88,89 km	10,98 %	124,72 km	47,52 %

Yamaha Concierge 6 a combustão	499,06 km	22,89 %	826,09 km	231,91 %

Fonte: o autor (2018).

Compreende-se, pela tabela 11, que a medida da potência do motor eleva-se, mas como benefício teve a autonomia de ambos os testes, UDDS e HWY. Assim, o motor mais fraco, o do *Carrall 700 elétrico*, foi o que obteve as piores melhoras, e o *Carryall 700 a combustão* por ter o motor de maior potência, foi onde se encontraram os melhores resultados pela redução de velocidade máxima do teste. Sendo até mais benéfico a redução do peso veicular, feito na segunda simulação, do que a mudança feita na terceira, para os elétricos.

Apesar de o maior impacto ser no arrasto, ainda houve quedas de consumo no motor, nos freios e nas rodas. Faz-se, novamente, uma ressalva do caso extremo, que se observou para os veículos no ciclo HWY, em especial, veículos a combustão. Esses dois veículos observaram uma queda, ainda maior, do consumo energético em seus motores.

Tabela 12 – Evolução do consumo do motor para os veículos a combustão

Veículo	Consumo do motor simulação 2 - UDDS	Consumo do motor simulação 3 - UDDS	Consumo do motor simulação 2 - HWY	Consumo do motor simulação 3 - HWY
Carryall 700 a combustão	1870,61 Wh	1374,17 Wh	3340 Wh	655,05 Wh
Yamaha Concierge 6 a combustão	1808,98 Wh	1354,54 Wh	3135,81 Wh	634,77 Wh

Fonte: o autor (2018).

A tabela 12 descreve a resposta do motor pela redução de velocidade nos veículos a combustão do projeto. A perda de consumo foi expressiva no teste UDDS, mas ainda elevada pelos picos de torque causados pelas diversas frenagens, retomadas de velocidade ao longo dos testes. Já para o teste HWY, o veículo manteve-se, por todo o teste, na mesma velocidade,

com apenas uma frenagem por iteração e arrancada no começo; isso cria uma vantagem para todos os veículos, mas que chama muito atenção para esses dois: a combustão.

Ainda que não descreva um cenário real, pode-se concluir que quanto menos frenagens, menos retomadas de velocidade há no teste, mais vantagem haverá na redução de velocidade como parâmetro de projeto. Já para o teste UDDS, faz-se a mesma conclusão, o ganho, no entanto, é menor. Assim, esse cenário mais condizente com o que se encontraria para executar o propósito deste projeto, que é a implementação de um veículo elétrico no campus, submetendo-o, naturalmente, a frenagens para embarque de passageiros, obstáculos, pedestres ou outros veículos.

O veículo elétrico no qual melhor observou-se os impactos da simulação 3 em sua autonomia, dentre os elétricos, foi o *Elletro 320CP*. Isso porque, possui a maior área frontal dentre todos os veículos testados, além disso, foi o que, também, observou a maior redução percentual do consumo por arrasto. O veículo *Concierge 6*, também é tido como de grande impacto, dado o seu motor bem projetado, de maior potência do que o terceiro colocado, *Carryall 700*.

A quarta e última simulação objetivou analisar a autonomia dos veículos respeitando as limitações impostas pelos fabricantes de limite de velocidade. Assim, essa é a que mais condiz com uma situação real, e que se enfrentaria se o veículo fosse adotado, pois, além disso, o veículo teve como carga considerada, 420 kg. Pode-se, assim, acompanhar a evolução de desempenho na tabela 13.

Tabela 13 – Comparativo de desempenho da simulação 1 para simulação 4

Veículo	Autonomia UDDS	Diferença em % para simulação 1	Autonomia HWY	Diferença em % para simulação 1
Elettro 320CP	73,16 km	20,36 %	85,22 km	41,44 %
Carryall 700 elétrico	87,17 km	25,11 %	118,46 km	41,97 %
Carryall 700 a combustão	592,84 km	48,76 %	886,3 km	262,12 %
Yamaha Concierge 6	98,87 km	23,44 %	129,41 km	53,07 %

elétrico				
Yamaha Concierge 6 a combustão	578,32 km	42,41 %	922,5 km	258,97 %

Fonte: o autor (2018).

É possível observar melhoras em todos os resultados, com a exceção do veículo *Carryall 700 elétrico* na simulação HWY. O que se pode determinar com a decisão correta dos fabricantes, dadas às condições de área frontal elevada para esses veículos.

Houve expressiva melhora de consumo dos veículos no teste UDDS. Sendo as principais melhoras referentes, novamente, ao arrasto, mas também a outros fatores. Para analisar-se, individualmente, cada um dos fatores melhorados e as perdas do veículo *Carryall 700 elétrico* no ciclo UDDS foram analisadas, individualmente, para as simulações 4 e 1. As perdas são referentes a uma iteração do teste.

Tabela 14 – Comparativo de consumo energético do veículo *Carryall 700 elétrico* para a simulação 1 e 4 no ciclo UDDS

	Consumo da simulação 1 - UDDS	Consumo da simulação 4 - UDDS
Arrasto	128 Wh	49,79 Wh
Rodas	196,07 Wh	152,96 Wh
Freios	170,95 Wh	77,62 Wh
Transmissão	14,39 Wh	8,14 Wh
Motor	65,28 Wh	56,9 Wh
Perdas da bateria	120,51 Wh	73,71 Wh
Perdas de cargas auxiliares	38,02 Wh	38,02 Wh

Fonte: o autor (2018).

Além das reduções óbvias (arrasto, rodas, freio, motor), há uma expressiva redução de consumo energético nas perdas das baterias. Naturalmente, quando se reduz a potência do

motor, reduz-se, também, a corrente demandada das baterias e, consequentemente, as perdas por efeito Joule dessas. Indicando que para esse projeto é mais benéfico perdas da bateria do que para o consumo energético do motor, que se reduza a velocidade e potência demandada do motor.

Para se observar o impacto da adoção de baterias de níquel-cádmio e de lítio, novas simulações foram feitas para o mesmo veículo analisado. A mesma simulação 4 foi utilizada, com os mesmos parâmetros. O primeiro, utilizando-se baterias de níquel-cádmio, alterou-se a eficiência de 75 % para 65 %, a eficiência e a densidade de energia de 53,57 kWh para 90 kWh (a densidade de energia varia de 60 a 120 Wh/kg), resultando, assim, em uma capacidade total de 15,12 kWh (62% de aumento) nas baterias.

A autonomia no ciclo UDDS foi de 123,81 km (42,03 % de aumento), com consumo veicular de 0,1099 kWh/km. Para o ciclo HWY de 174,77 km (47,53 % de aumento) e 0,08 kWh/km. Assim, o consumo individual de cada componente é listado na tabela abaixo.

Tabela 15 – Consumo energético de todos os componentes para simulação 4 com baterias de níquel-cádmio

	Consumo por cada componente - UDDS
Arrasto	48,66 Wh
Rodas	170,77 Wh
Freios	92,4 Wh
Transmissão	8,82 Wh
Motor	54,72 Wh
Perdas da bateria	121,45 Wh
Perdas de cargas auxiliares	38,02 Wh

Fonte: o autor (2018).

Comparando-se as tabelas 14 e 15, percebe-se o incremento no consumo de quase todas as partes do veículo, em relação à simulação 4 desempenhada com adoção de baterias de níquel-cádmio. Houve aumento expressivo das perdas por efeito Joule, já que a eficiência das baterias foi reduzida. A resposta ao aumento de autonomia é, única e exclusivamente, o

aumento da capacidade das baterias, sendo ainda limitada pelos gastos energéticos adicionais verificados.

Já no teste de baterias de lítio-íon, a eficiência das baterias foi alterada para 98%, padrão do programa. A densidade de energia determinada para este teste foi de 130 kWh/kg, densidade de energia similar ao veículo *Chevrolet Bolt*, ainda bastante conservadora, pois outros veículos elétricos como os modelos *Tesla* possuem densidade de energia muito mais elevada. Não sendo possível considerar o máximo, já que esse teste é teórico e não prático. O peso das baterias também é mantido o mesmo e também é conservador, dado que o próprio *Chevrolet Bolt* possui 440 kg em baterias, e que esse veículo está considerando apenas 168 kg. Resultando em uma capacidade de 21,84 kWh.

A nova autonomia foi de 231,25 km no ciclo UDDS com consumo de 0,08 kWh/km e 313,08 km no ciclo HWY, consumindo 0,06 kWh/km. O que possibilita o menor consumo veicular de todos os testes feitos, já que houve aumento da eficiência das baterias significativo.

Tabela 16 – Comparativo entre diferentes baterias para simulação 4, ciclo UDDS

	Consumo da simulação 4 (chumbo ácido) - UDDS	Consumo da simulação 4 (níquel-cádmio) - UDDS	Consumo da simulação 4 (lítio-íon) - UDDS
Arrasto	49,79 Wh	48,66 Wh	49,26 Wh
Rodas	152,96 Wh	170,77 Wh	167,68 Wh
Freios	77,62 Wh	92,40 Wh	89,50 Wh
Transmissão	8,14 Wh	8,82 Wh	8,71 Wh
Motor	56,90 Wh	54,72 Wh	56,79 Wh
Perdas da bateria	73,71 Wh	121,45 Wh	5,18 Wh
Perdas de cargas auxiliares	38,02 Wh	38,02 Wh	38,02 Wh

Fonte: o autor (2018).

A tabela 16Tabela compara os consumos obtidos na simulação 4 para diferentes baterias. É bastante visível, a vantagem trazida por baterias de lítio e, também, o ônus trazido pelas baterias de níquel-cádmio.

Entre as duas alternativas apresentadas, fica óbvia a escolha pelo lítio, sem se considerar os custos envolvidos. Isto é, as baterias de níquel-cádmio possuem elevada taxa de auto descarga e um ciclo de vida máximo, que fica até abaixo das baterias de chumbo-ácido.

Todos os veículos elétricos estudados neste projeto são capazes de satisfazer as demandas de transporte de passageiros. Todavia, entre os citados, o que mais se demonstrou apto, foi o veículo *Carryall 700 elétrico*, pelas características de motor, peso e chassi. Nesse aspecto, obteve um bom desempenho, quando considerado o limite de velocidade, perdendo apenas para o *Yamaha Concierge 6 elétrico*, que, ainda, tem a vantagem de ter muito mais bateria, portanto, também mais custo agregado.

Mesmo considerando baterias de chumbo-ácido, o veículo teve autonomia de 87 km, o que já o caracterizaria como capaz de executar diversas viagens, no ciclo mais similar ao que se vê no carro intra-campus da UFSM – com pausas constantes para desembarque e embarque de passageiros.

No entanto, quando comparado aos dois veículos a combustão, há uma grande defasagem em termos de autonomia. Mesmo com potências bem maiores e eficiência de motor bem menor, esses veículos destacaram a elevada energia agregada à gasolina e, acabaram tendo melhores resultado. Não apenas isso, o *Carryall 700 elétrico* é acompanhado por um carregador de baterias integrado ao chassi, que possui 1 kW de potência e eficiência de 92%, o que significa que para a carga de 9 kW, de 0 a 100% levariam mais de 9 horas de magnitude muito superior ao tempo levado para se encher o tanque de gasolina.

Por fim, o fator determinante para que a escolha pelos veículos elétricos seja feita, não pela autonomia, mas por ser um veículo não emissor de gases causadores do efeito estufa, bem como, custo de operação do veículo menor.

6 CONCLUSÃO

Este projeto visou avaliar as vantagens e desvantagens da adoção de um veículo elétrico intra-campus na UFSM. Para tanto, foram analisadas diferentes tecnologias e conceitos atrelados a estes, tais como, alternativas, ciclos e simulações. O *software* em que se realizaram os testes demonstrou-se bastante confiável e com resultados próximos aos que se esperavam.

É evidente a vantagem deles por serem isentos de gases causadores do efeito estufa, utilizando energia limpa no propulsor do veículo e com motores de melhor eficiência. No entanto, são acometidos pelo elevado peso em detrimento das baterias e energia agregada muito inferior, resultando em autonomia bastante reduzida quando comparados a veículos a combustão.

O grande diferenciador deste projeto é trazido pela geometria dos veículos simulados. Enquanto a indústria tenta empurrar aos consumidores veículos de pequena área frontal, de potência elevada de motor, os veículos aqui testados possuem baixas velocidades, baixa potência de motor e elevada área frontal. Nesse sentido, isso leva à necessidade de atentar-se às perdas por arrasto, mesmo quando consideradas as velocidades reduzidas impostas pelo fabricante. Assim, esses veículos relacionam-se ao projeto por atender satisfatoriamente as pequenas distâncias percorridas, bem como, a capacidade de transporte de passageiros. Nos testes realizados é possível observar a incapacidade dos veículos elétricos em atingir velocidades elevadas, isto, pois, possuem baixa potência do motor. De qualquer modo, ainda está de acordo com o projeto, mas de importante ressalva.

As baterias, também, acabam por serem de diferenciação. Veículos elétricos, comumente, são produzidos com baterias de lítio-íon, por sua elevada potência, energia, segurança, baixa taxa de auto descarga e baixa manutenção. Aqui, por outro lado, foram vistos todos os veículos com baterias de chumbo-ácido, por serem robustas e de baixo custo, com a grande desvantagem de possuir baixa eficiência e energia. Exatamente por causa destas, que há certa inviabilidade do projeto, do ponto de vista da autonomia, apesar de satisfatória, sem a adoção de baterias de maior capacidade energética (lítio-íon), os veículos elétricos ficaram muito atrás de veículos a combustão. Esse fator é bastante agravado, ainda, pelo tempo de recarga necessário. Acabando por ser mandatário adoção de melhores baterias para o sucesso de sua implementação.

Ao mesmo tempo, vê-se viabilidade no projeto quando se consideram os crescentes anseios por meios de transportes limpos. As rotas executadas pelo ônibus da UFSM não chegam a 15 km e, portanto, mesmo submetido a condições desfavoráveis são capazes de atender a esse requisito. Esses veículos podem ser uma excelente “porta de entrada” para meios alternativos de transporte, uma vez que, não possuem o custo elevado que seria causado por um ônibus equivalente, mas elétrico, não dependem de combustíveis fósseis o que, também, traz alívio não apenas social, mas também econômico.

Por fim, pode-se dizer que a adoção de veículos elétricos para executar papel similar ao ônibus pode ser bem sucedida. A cultura de que os veículos elétricos devem ter a mesma autonomia de um a combustão seja evoluída para uma em que compreende que são veículos de uso limpo e que abraça os seus defeitos, limitando o seu uso para horários em que haja pico de demanda pelo transporte e carregando as baterias em horários de baixa demanda.

REFERÊNCIAS

BAEK, Donkyu; HONG, Joonki; CHANG, Naehyuck. Minimum-energy driving speed profiles for low-speed electric vehicles. **2016 21st Asia And South Pacific Design Automation Conference (asp-dac)**, [s.l.], p.1-2, jan. 2016. IEEE. http://dx.doi.org/10.1109/aspdac.2016.7428050.

BROOKER, Aaron et al. FASTSim: A Model to Estimate Vehicle Efficiency, Cost and Performance. **SAE Technical Paper Series**, Detroit, p.21-23, 14 abr. 2015. SAE International. http://dx.doi.org/10.4271/2015-01-0973.

CHAPMAN, Stephen J. **Fundamentos de Maquinas Elétricas.** New York: Mc Graw Hill, 2013.

CHENG, Shukang et al. Research on Induction Motor for Mini Electric Vehicles. **Energy Procedia**, [s.l.], v. 17, p.249-257, 2012. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2012.02.091.

CLUB CAR 24. Carryall 700 Electric. **Clubcar 24.** Disponível em: <https://www.clubcar24.com/en/angebote/carryall-700-electric/>. Acesso em: 15 set. 2018.

EMADI, Ali. **Advanced Electric Drive Vehicle**. Boca Raton: CRC Press, 2015.

EPA. History of Fuel Economy Labeling. **United States Environmental Protection Agency.** Disponível em: <https://www.epa.gov/fueleconomy/history-fuel-economy-labeling>. Acesso em: 03 out. 2018.

EPA. Dynamometer Drive Schedules. **United States Environmental Protection Agency.** Disponível em: < https://www.epa.gov/vehicle-and-fuel-emissions-testing/dynamometer-drive-schedules>. Acesso em: 03 out. 2018.

HANNAN, Mahammad A. et al. State-of-the-Art and Energy Management System of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicle Applications: Issues and Recommendations. **Ieee Access**, [s.l.], v. 6, p.19362-19378, 2018. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). http://dx.doi.org/10.1109/access.2018.2817655.

INMETRO. Tabelas de Consumo/Eficiência Energética de Veículos Leve. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/veiculos_leves_2018.pdf>. Acesso em: 03 out. 2018.

KOSOW, Irving Lionel. **Máquinas Elétricas e transformadores.** Rio de Janeiro: Editora Globo, 1982.

NAPOL, Igor. Renault lança nova versão do Zoe, seu pequenino carro elétrico. **Tecmundo**. 05 out. 2016. Disponível em: <https://www.tecmundo.com.br/renault/110282-renault-lanca-zoe-pequenino-carro-eletrico.htm>. Acesso em: 07 out. 2018.

EPA. New Fuel Economy and Environment Labels for a New Generation of Vehicles. **National Service Center for Environmental Publications (NSCEP).** May 2011. 9 p. Disponível em: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/P100BAV0.TXT?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=2011+Thru+2015&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=&File=D%3A%5Czyfiles%5CIndex%20Data%5C11thru15%5CTxt%5C00000001%5CP100BAV0.txt&User=ANONYMOUS&Password=anonymous&SortMethod=h%7C-&MaximumDocuments=1&FuzzyDegree=0&ImageQuality=r75g8/r75g8/x150y150g16/i425&Display=hpfr&DefSeekPage=x&SearchBack=ZyActionL&Back=ZyActionS&BackDesc=Results%20page&MaximumPages=1&ZyEntry=1&SeekPage=x&ZyPURL>. Acesso em: 07 out. 2018.

RAHMAN, K. M. et al. Advantages of switched reluctance motor applications to EV and HEV: design and control issues. **Ieee Transactions On Industry Applications**, [s.l.], v. 36, n. 1, p.111-121, 2000. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). http://dx.doi.org/10.1109/28.821805.

ROSA, Leonardo Cardoso. **Desenvolvimento de carenagem para miniveículo visando eficiência energética com base na biônica.** 2013. 118 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Arquitetura, Programa de Pós-graduação em Design, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

MOLINA, Marcus Vinicius Bezerra. **Modelagem conceitual de um veículo elétrico especificado para competições de economia de energia.** 2016. 143 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de produção, Programa de Pós-graduação em Engenharia de produção, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

TRAMONTINA. Elettro 320 CP. **Tramontina**. Disponível em: <https://www.tramontina.com.br/p/79966201-548-veiculo-utilitario-eletrico-elettro-320cp>. Acesso em: 15 set. 2018.

VASCONCELOS, Yuri. Mais energia. Engenharia Automotiva. **Revista Pesquisa Fapesp**. nov. 2017. Disponível em: <http://revistapesquisa.fapesp.br/wp-content/uploads/2017/11/072-073_baterias_261.pdf>. Acesso em: 10 out. 2018.

WANG, Yue; GAO, Dawei. A comparison of different types of motors used for low speed electric vehicles: Experiments and simulations. **2014 Ieee Conference And Expo Transportation Electrification Asia-pacific (itec Asia-pacific)**, [s.l.], ago. 2014. IEEE. http://dx.doi.org/10.1109/itec-ap.2014.6940689.

WIDMER, James D.; MARTIN, Richard; KIMIABEIGI, Mohammed. Electric vehicle traction motors without rare earth magnets. **Sustainable Materials And Technologies**, [s.l.], v. 3, p.7-13, abr. 2015. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.susmat.2015.02.001.

YAMAHA. Concierge 6. **Yamaha.** Disponível em: <https://www.yamahagolfcar.com/golf-car/golf/concierge-6/>. Acesso em: 15 set. 2018.

ZHU, Z. Q.; HOWE, David. Electrical Machines and Drives for Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles. **Proceedings Of The Ieee**, [s.l.], v. 95, n. 4, p.746-765, abr. 2007. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). http://dx.doi.org/10.1109/jproc.2006.892482.