

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**ANÁLISE DE IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMA DE PROPULSAÇÃO HÍBRIDA
EM ÔNIBUS DO TRANSPORTE PÚBLICO DA CIDADE UNIVERSITÁRIA**

Danillo Kazuya Koga

São Paulo

2017

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**ANÁLISE DE IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMA DE PROPULSÃO HÍBRIDA
EM ÔNIBUS DO TRANSPORTE PÚBLICO DA CIDADE UNIVERSITÁRIA**

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

Danillo Kazuya Koga

Orientador:

Prof. Dr. Demetrio Cornilius Zachariadis

Área de concentração:

Engenharia Mecânica

São Paulo

2017

Catalogação-na-publicação

Koga, Danillo Kazuya

Análise de implementação de sistema de propulsão híbrida em ônibus do transporte público da Cidade Universitária / D. K. Koga -- São Paulo, 2017.
55 p.

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

1.Veículo híbrido. 2.Dinâmica veicular. I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

RESUMO

No presente trabalho de formatura, será analisada a diferença no consumo energético devido à implementação de um sistema de propulsão híbrida em um ônibus do campus da Cidade Universitária, situada na cidade de São Paulo. O trabalho começa com uma breve introdução sobre o cenário brasileiro em relação ao consumo energético no setor de transportes. Estuda-se a arquitetura de um ônibus híbrido, configuração em série, com relação aos principais componentes responsáveis pela transformação e transmissão de energia. Em seguida, o texto discorre sobre a modelagem da dinâmica veicular longitudinal. Foram realizadas medições de velocidade de um ônibus convencional em operação no campus e foi levantada a topografia de alguns trechos do trajeto. De posse do modelo, algumas simulações são apresentadas para se observar como o consumo energético se desenvolve em determinadas condições se fosse instalado um sistema de propulsão híbrida.

Palavras-chave: veículo-híbrido, ônibus, dinâmica-veicular, consumo-energético.

ABSTRACT

This paper presents an analysis of the difference in energy consumption due to the implementation of a hybrid drivetrain system in a bus of Campus Cidade Universitária, located in São Paulo. The work begins with a brief introduction of Brazilian scenario in terms of energy consumption by the transport sector. The architecture of a hybrid bus, series configuration, is studied in relation to the main components responsible for the transformation and transmission of energy. Afterwards, the text discusses the modeling of longitudinal vehicular dynamics. Measures of speed and field topology were made on a conventional bus model operating in the campus. Finally, some simulations are presented to observe how energy consumption develops in certain operation conditions if a hybrid propulsion system was applied.

Key-words: hybrid-vehicle, bus, vehicle-dynamics, energy-consumption

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS

LISTA DE FIGURAS

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Exemplos de ônibus híbridos.....	3
1.2. Descrição do ônibus a ser estudado	5
2. REVISÃO DA LITERATURA	7
2.1. Aspectos comparativos entre o motor de combustão interna e o	
motor elétrico.....	7
2.2. Configurações de veículo híbrido.....	10
2.3. Dinâmica veicular	13
2.4. Estratégias de operação.....	18
3. MODELO E SIMULAÇÃO.....	20
3.1. Dinâmica do ônibus e demanda de energia.....	20
3.2. Gerenciamento das fontes de potência.....	21
3.3. Simulação prévia para teste do modelo	24
3.4. Simulação do ônibus na Cidade Universitária.....	27
4. RESULTADOS.....	29
4.1. Simulação – Portão 1 até Portão 2 através da Av. Mello Moraes	29
4.2. Simulação – subida Av. Lineu Prestes até ICB.....	32

4.3. Simulação – descida pela Rua do Matão.....	34
5. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	38
6. CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS	40
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Coeficientes característicos do tipo de piso	16
Tabela 2.2 – Coeficiente de resistência ao rolamento, f, para diversas situações	16
Tabela 3.1 – Resumo da lógica de implementação da estratégia de gerenciamento de potência	24
Tabela 3.2 – Parâmetros físicos relacionados ao veículo e grandezas necessárias para o cálculo das forças resistivas ao movimento.....	25
Tabela 3.3 - Parâmetros para o modelo do banco de baterias.	25
Tabela 5.1 - Parâmetros utilizados nas simulações e respectivas energias consumidas.....	38

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Evolução no consumo do petróleo por setor da economia.....	1
Figura 2: Evolução, para diferentes categorias de veículos, das emissões: (a) de CO; (b) de NO _x ; (c) de CO ₂ e (d) de material particulado.	2
Figura 3: Imagem do modelo de ônibus híbrido da Neoplan	3
Figura 4: Imagem do modelo de ônibus híbrido da Scania.....	4
Figura 5: Ilustração de um ônibus atende às linhas circulares da USP.....	5
Figura 6: Trajeto de uma das linhas circulares.	6
Figura 7: Esquema das curvas de torque de um motor diesel e um motor elétrico.	9
Figura 8: Esquema de um veículo híbrido em série.....	10
Figura 9: Esquema de um veículo híbrido em paralelo.	11
Figura 10: Quatro modos possíveis de funcionamento de um veículo híbrido em paralelo.....	11
Figura 11: Esquema de um veículo híbrido misto.	12
Figura 12: Representação das forças atuantes em um veículo em terreno inclinado ..	13
Figura 13: Representação dos elementos de transmissão de potência desde o motor elétrico até os pneus	14
Figura 14: Diagrama representativo da ligação entre os componentes do sistema de propulsão	21
Figura 15: Curvas do motor OM924 LA Proconve P-7.....	22
Figura 16: Perfil de velocidades e inclinação da pista em função do tempo	26
Figura 17: Potência demandada nas rodas para cada instante de tempo. As linhas verticais tracejadas indicam os instantes em que a inclinação da pista muda.....	26
Figura 18: Evolução do SOC das baterias, o ciclo de condução e a potência do MCI utilizada em função do tempo.	27

Figura 19: Dados adquiridos do circular em serviço na USP.....	28
Figura 20: Gráfico da elevação da pista em função da distância percorrida.	28
Figura 21: Trecho simulado entre os portões 1 e 2 da USP.	29
Figura 22: Curvas aproximadas a partir dos dados coletados.	30
Figura 23: Evolução no tempo da potência demandada pelo veículo, potência fornecida pelas baterias e pelo MCI.	30
Figura 24: Energia fornecida pelas fontes energéticas do sistema.	31
Figura 25: Respectivamente as curvas do SOC, velocidade do ônibus e potência do MCI.	31
Figura 26: Trecho da simulação, subida da Av. Lineu Prestes.	32
Figura 27: Aproximação dos dados coletados de velocidade e inclinação	32
Figura 28: Evolução no tempo da potência demandada pelo veículo, potência fornecida pelas baterias e pelo MCI	33
Figura 29: Energia consumida acumulada em função do tempo das duas fontes energéticas.....	33
Figura 30: SOC das baterias, velocidade do veículo e potência fornecida pelo MCI .	34
Figura 31: Mapa destacando o trecho da rua simulado.....	35
Figura 32: Curvas de velocidade e inclinação da pista coletados.....	35
Figura 33: Evolução no tempo da potência demandada pelo veículo, potência fornecida pelas baterias e pelo MCI	36
Figura 34: Energia consumida em função do tempo das duas fontes energéticas	36
Figura 35: Estado de carga das baterias, velocidade do veículo e potência fornecida pelo MCI.....	37
Figura 36: Detalhe do gráfico de potência	41
Figura 37: Situação onde o MCI foi acionado por um período mais longo para recarga das baterias	42

1. INTRODUÇÃO

No atual cenário do setor de transportes, existe uma grande tendência em se buscar novas soluções para se reduzir o consumo de combustíveis fósseis. Dentre os meios de transporte terrestres, os veículos automotivos representam grande parte do consumo de combustíveis derivados do petróleo.

Apesar de se mostrar um produto abundante e com grande demanda no mundo todo, atualmente a exploração e consumo do petróleo trazem muitos problemas e controvérsias. Primeiramente, o petróleo, bem como os demais combustíveis fósseis, é um recurso natural não renovável e, por isso, sua disponibilidade no futuro é um dos pontos mais críticos acerca deste produto.

Como pode ser visto na figura 1, o maior consumidor de petróleo entre os setores da economia no mundo é o setor de transportes. Segundo Baran (2009), tal setor representava 61,7% de participação no ano de 2009.

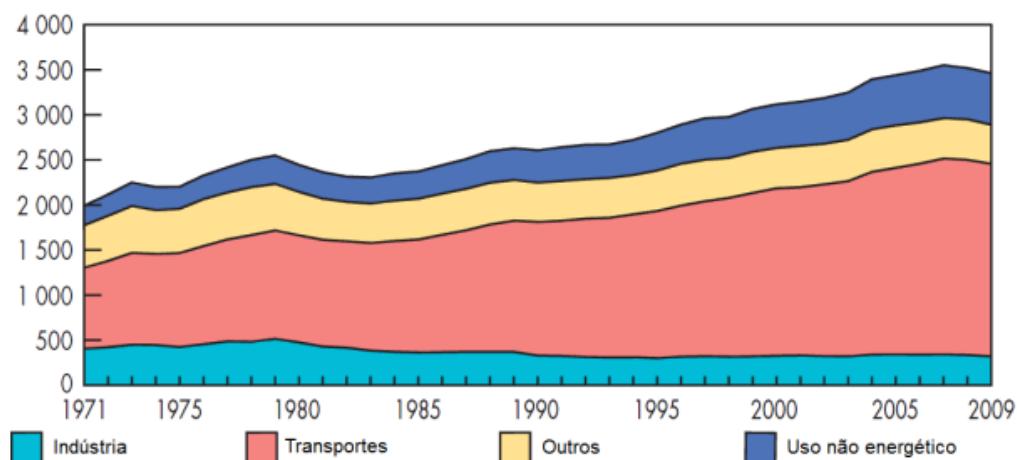


Figura 1: Evolução no consumo do petróleo por setor da economia. (Baran, 2009)

Além disso, a combustão dos derivados do petróleo libera gases como o monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x) e materiais particulados. Tais substâncias emitidas na atmosfera provocam diversos problemas, entre eles pode-se citar o aumento do Efeito Estufa e o agravamento de doenças respiratórias em áreas urbanas.

Do ponto de vista do cenário nacional, as projeções do Ministério do Meio Ambiente (2011) indicam que as emissões de CO, NO_x e particulados segue uma

tendência de queda por conta das inovações tecnológicas. Já a emissão de CO₂ tende a subir pois mesmo com a melhora no rendimento dos motores atuais, a frota em circulação brasileira tende a aumentar até 2020. A figura 2 mostra o histórico de emissões de diferentes substâncias acompanhado de projeções para diferentes categorias de veículos.

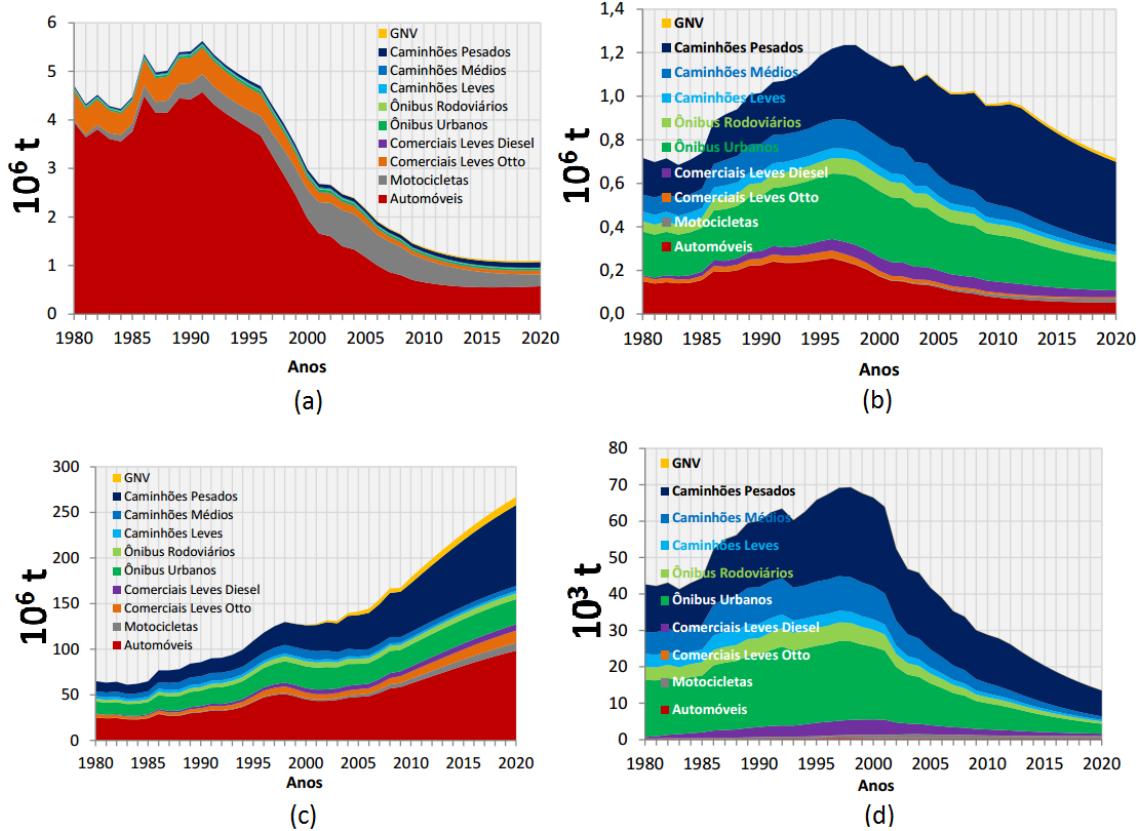


Figura 2: Evolução, para diferentes categorias de veículos, das emissões: (a) de CO; (b) de NO_x; (c) de CO₂ e (d) de material particulado. (Ministério do Meio Ambiente, 2011)

Observando estas previsões, buscam-se alternativas para substituir ou minimizar o consumo de combustível dos veículos automotivos. Entre as soluções propostas, pode-se destacar o desenvolvimento de motores movidos a combustíveis de fontes renováveis como o etanol, biodiesel e outros movidos a energia elétrica.

Segundo a linha de soluções com motores que consomem uma menor quantidade de combustíveis fósseis, o desenvolvimento de veículos de propulsão híbrida é visto como uma das opções mais promissoras para se alcançar um cenário onde os meios de transporte utilizem, mesmo que parcialmente, tecnologias mais sustentáveis.

Em uma outra categoria de soluções propostas, existem estratégias para se reduzir o número de veículos em tráfego através da coletivização dos meios de

transporte. Principalmente em grandes centros urbanos, a redução da quantidade de automóveis em circulação por conta de uma rede de transporte coletiva impactaria numa redução de motores em operação, o que acarretaria na redução do consumo de combustíveis fósseis e das emissões de gases provenientes de sua queima nestes locais.

Observados estes dois pontos (os sistemas de propulsão híbridos e a coletivização do transporte), modelos de ônibus híbridos elétricos foram desenvolvidos em alguns países.

No Brasil, observando a figura 2, os ônibus urbanos apresentam uma parcela considerável na contribuição da emissão de óxidos de nitrogênio, gás carbônico e de material particulado. Portanto medidas quanto à diminuição da queima de diesel por parte destes veículos pesados afetariam diretamente na qualidade do ar das grandes cidades.

1.1 Exemplos de ônibus híbridos

A seguir, estão listados alguns exemplos de modelos que utilizam a tração híbrida projetados e fabricados em outros países.

1.1.1. Neoplan Metroliner MIC N8012 GE



Figura 3: Imagem do modelo de ônibus híbrido da Neoplan. (Andersson, 2001)

Este modelo híbrido, produzido na Alemanha, possui as seguintes especificações:

- Massa de 8,5 toneladas e comprimento de 10m;
- Potência do grupo motor gerador de 125kW;
- Potência dos motores elétricos de 2x55kW;
- Capacidade de 57 passageiros.

Este modelo é consideravelmente leve para um ônibus, a potência transmitida do motor à combustão ao motor elétrico é alta o suficiente para suprir o pico de potência necessário durante sua operação. Durante trechos de frenagem, as baterias são recarregadas por meio de sistemas de recuperação de energia.

1.1.2. Scania Citybus 1200 MKII



Figura 4: Imagem do modelo de ônibus híbrido da Scania. (Andersson, 2001)

Este modelo híbrido, projetado na Suécia, possui as seguintes especificações:

- Massa de 12,5 toneladas e comprimento de 12m;
- Potência do grupo motor gerador de 55kW;
- Potência dos motores elétricos de 2x75kW;
- Capacidade de 66 passageiros.

O ônibus acima é maior e mais robusto, por outro lado carrega um número maior de passageiros do que o modelo do item 1.1.1. Este veículo também conta com sistemas de regeneração de energia. Para suprir a potência máxima de tração, é necessária a ação conjunta da potência fornecida pelo motor à combustão e as baterias.

1.2. Descrição do ônibus a ser estudado

Neste trabalho de formatura, o objetivo é estudar os efeitos da aplicação de um sistema de potência híbrido nos ônibus, conhecidos como circulares, da USP. Estes veículos realizam diariamente os trajetos de duas linhas circulares que ligam diversos institutos no interior do campus da Universidade e a estação de metrô Butantã.



Figura 5: Ilustração de um ônibus atende às linhas circulares da USP. (PUSP, 2011)

Por conta do número de atividades envolvidas dentro da universidade e da sua dimensão, estes ônibus transportam diariamente centenas de passageiros, compostos principalmente de estudantes e funcionários da instituição.

Atualmente, não há diferença entre os circulares e um ônibus convencional de mesmas dimensões do ponto de vista da propulsão. Os motores de combustão são projetados e construídos para serem alimentados por diesel ou biodiesel.

Com relação à condição de operação do veículo, por se tratar de um transporte coletivo público e urbano, os circulares frequentemente passam por situações de aceleração e desaceleração. Existem muitas paradas para o embarque e desembarque de passageiros durante o trajeto, além de semáforos, lombadas e o próprio tráfego que forçam o circular a ter que acionar os freios. Essas variações de velocidade podem tornar o emprego de um sistema híbrido ou elétrico mais interessante, uma vez que tais sistemas podem contar com uma parte de regeneração de energia na frenagem.

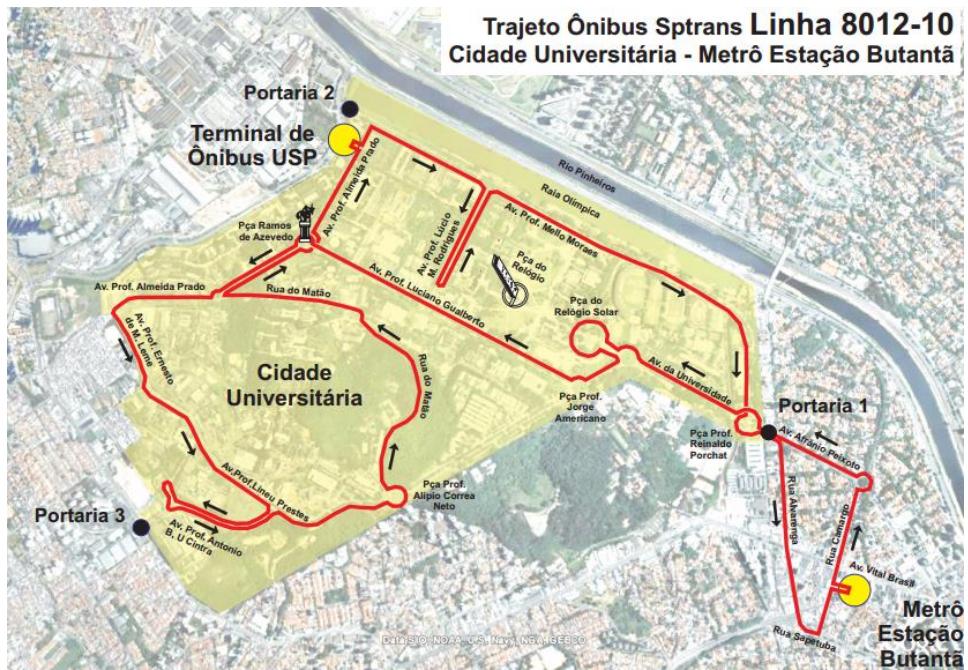


Figura 6: trajeto de uma das linhas circulares. (USP)

O próprio terreno onde se situa o campus possui pontos de maior elevação, o que faz com que as linhas apresentem trechos de subida e descida e que podem ser regiões de interesse para se realizar a simulação de um modelo híbrido, conforme será discutido futuramente neste trabalho.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Um veículo de transporte híbrido combina diferentes fontes de energia para alimentação de seus motores. Atualmente, os automóveis mais comuns nesta categoria são movimentados pelo conjunto de um motor de combustão interna e um motor elétrico.

O conceito do veículo híbrido está relacionado a aliar duas formas de energia distintas de maneira que os pontos fortes de cada uma possam compensar as desvantagens da outra.

2.1. Aspectos comparativos entre o motor de combustão interna e o motor elétrico

2.1.1. Densidade de energia e energia específica

O termo densidade de energia está relacionado à quantidade de energia que pode ser retirada de uma unidade em massa ou volume de um produto.

No caso do diesel como combustível, tem-se um poder calorífico inferior entre 42 a 44MJ/kg (Biomass Energy Databook, 2011) e para a gasolina comercial para automóveis esse valor é cerca de 40MJ/kg no Brasil (Brunetti, 2012). Por outro lado, uma bateria Li-ion recarregável apresenta energias específicas menores do que 1MJ/kg. Em termos de quantidade de energia embarcada em um veículo, a queima de combustíveis é mais vantajosa do que se dispor de um banco de baterias, mesmo levando-se em consideração os rendimentos médios de um motor elétrico e um motor de combustão interna.

2.1.2. Tempo para recarga

O tempo para se recarregar uma bateria por completo para carros elétricos é da ordem de algumas horas, uma vez que envolve o intervalo para ocorrência de processos eletroquímicos. Por outro lado, é possível reabastecer um tanque de combustível em questão de poucos minutos.

Contudo, deve-se notar que ao contrário dos motores a combustão interna, o sistema de tração elétrica pode atuar também no sentido inverso. Desta forma, a restituição de energia pode ser feita durante o funcionamento do veículo, em momentos de desaceleração.

2.1.3. Emissões de ruídos e resíduos

Neste aspecto é necessária uma abordagem em duas partes. Em primeiro lugar, do ponto de vista das emissões locais, o motor elétrico é silencioso e não libera gases para a atmosfera. O funcionamento de motores de combustão interna envolve explosões e impactos mecânicos que tornam a emissão acústica um ponto relevante para o conforto do usuário. Além disso, o processo de combustão libera gases e partículas para o ambiente.

Por outro lado, a longo prazo as baterias dos veículos elétricos, ao serem descartadas, precisam de um local adequado para seu depósito. Caso contrário, provocam a poluição de água, lençóis e solo caso o processo seja realizado de maneira incorreta.

2.1.4. Utilização de energia renovável

Este aspecto necessita de um ponto de vista mais amplo para ser analisado. A utilização de energia elétrica depende da origem do abastecimento elétrico da região.

Em muitos países, a produção de energia elétrica é feita, por exemplo, através de usinas termoelétricas e nucleares. Portanto, os usuários de veículos híbridos e elétricos utilizariam de forma indireta, e com mais perdas por conta de conversões e transmissões, uma fonte não renovável de energia transformada em energia elétrica para carregar suas baterias.

2.1.5. Torque em função da rotação

Um motor híbrido apresenta a capacidade de unir o alto torque em baixas rotações de um motor elétrico ao elevado torque em altas rotações de um motor de combustão interna. A figura 7 apresenta um gráfico esquemático das curvas de torque dos dois tipos de motores e a curva que representaria a combinação deles trabalhando em conjunto.

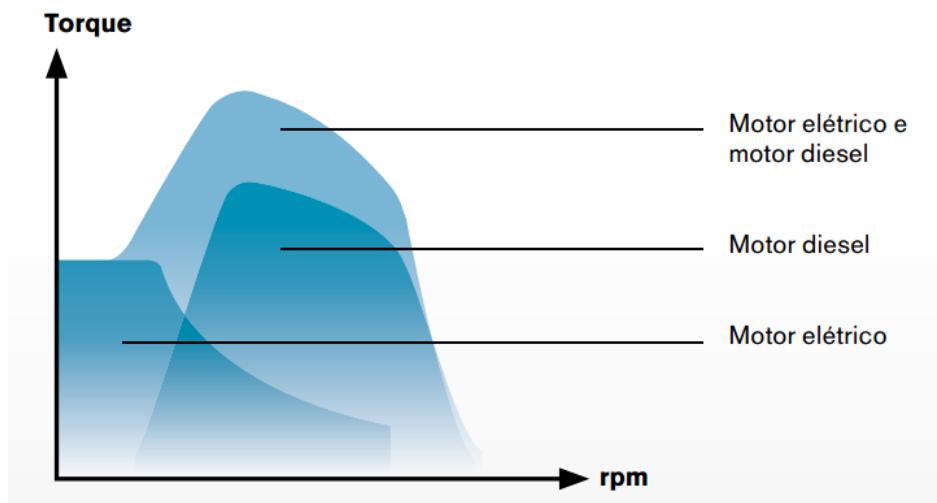


Figura 7: Esquema das curvas de torque de um motor diesel e um motor elétrico. (Volvo Buses)

Este aspecto seria de grande interesse para aplicações urbanas, onde as paradas durante as viagens são mais frequentes. Dessa forma, o veículo contaria com um torque de partida mais alto e uma maior eficiência a baixas rotações se comparado a um veículo equipado apenas com um motor à combustão interna convencional.

2.2. Configurações de veículo híbrido

Nas seções a seguir, será feita uma revisão da literatura quanto às principais configurações presentes em veículos híbridos que combinam motores à combustão interna (MCI) e motores elétricos para sua propulsão.

2.2.1. Veículo híbrido em série

Um veículo híbrido em série consiste na forma construtiva onde o motor à combustão não está ligado mecanicamente ao eixo de saída das rodas. O eixo do motor térmico está conectado a um gerador que converte a energia mecânica em eletricidade que pode tanto alimentar o motor elétrico como recarregar as baterias.

Este sistema recebe este nome pois a potência fornecida pelo motor à combustão passa inevitavelmente pelo motor elétrico, uma vez que os dois estão ligados em série, como pode ser observado na figura 8.

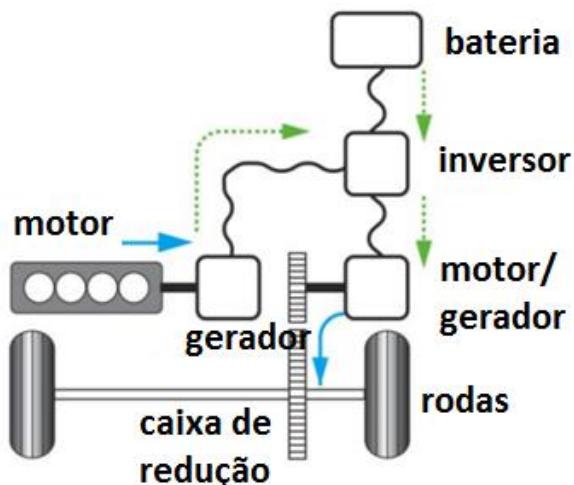


Figura 8: Esquema de um veículo híbrido em série. (Adaptado de Wroclaw University of Science and Technology)

Uma grande vantagem desta forma construtiva é que o motor à combustão pode funcionar em um regime constante independente das solicitações sobre as rodas do pneu. Portanto o motor à combustão funciona em sua faixa ótima de operação e sua potência pode tanto ser transmitida para o movimento, quanto armazenada.

2.2.2. Veículo híbrido em paralelo

Nesta forma construtiva, tanto o motor a combustão quanto o motor elétrico podem ser ligados diretamente ao eixo das rodas do veículo.

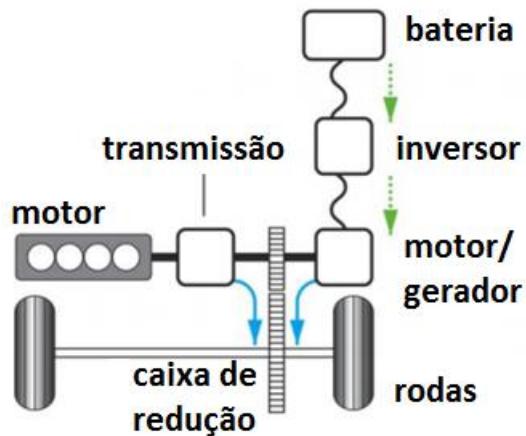


Figura 9: Esquema de um veículo híbrido em paralelo. (Adaptado de Wrocław University of Science and Technology)

Como pode ser visto na figura 9, diferentemente do híbrido em série, na construção em paralelo o motor à combustão pode ser ligado diretamente por meio de elementos mecânicos até o eixo das rodas. Este sistema mostra-se versátil uma vez que a utilização de acoplamentos controlados pode fazer com que o veículo apresente diferentes configurações de operação, como ilustrado na figura 10.

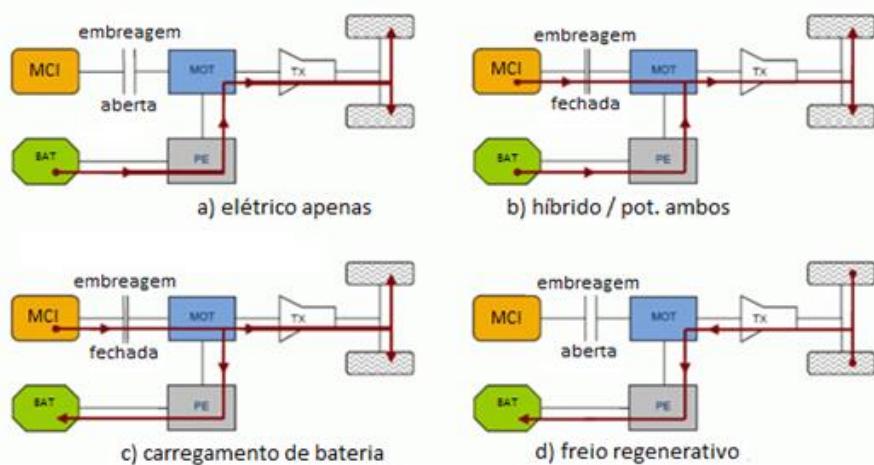


Figura 10: Quatro modos possíveis de funcionamento de um veículo híbrido em paralelo. (Adaptado de Wrocław University of Science and Technology)

Por um lado, essa configuração é mais flexível do que a construção em série, porém o motor à combustão fica sujeito a variações de rotação e torque pois está ligado diretamente às rodas e exige uma estratégia de controle mais complexa.

2.2.3. Veículo híbrido série-paralelo

Como o próprio nome indica, esta configuração visa combinar as características dos dois sistemas citados anteriormente. Imbasciati (2012) e Lopes (2008) citam que um conjunto de acoplamentos e um sistema de controle mais refinado permite que este sistema mude sua configuração entre série e paralelo dependendo das condições encontradas pelo veículo.

Por exemplo, em baixas rotações ou trechos de muitas paradas, o sistema em série é acionado. Em viagens mais longas e de maiores velocidades, como trechos de rodovias, o sistema muda para paralelo, adaptando-se para alcançar uma maior eficiência.

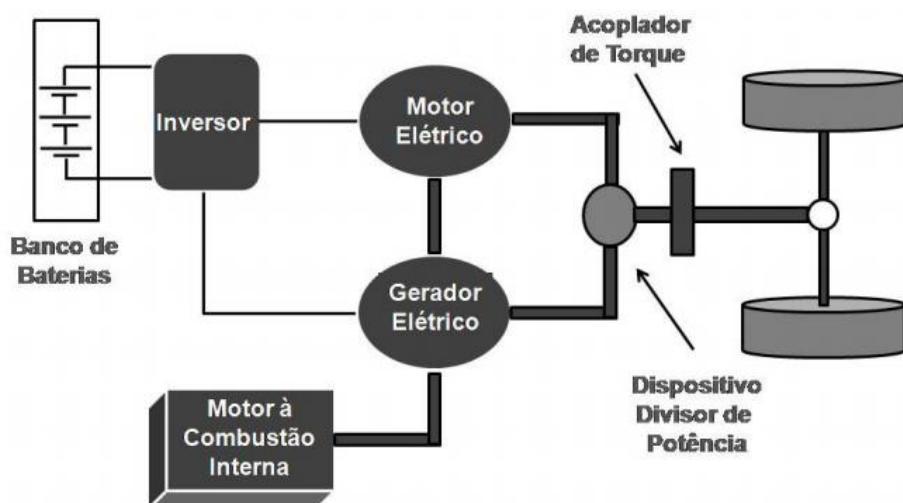


Figura 11: Esquema de um veículo híbrido misto. (Lopes, 2008)

Estes veículos apresentam um maior número de componentes e possuem um sistema de propulsão mais complexo, com duas ou mais embreagens, alguns veículos com transmissão planetária, além de uma estratégia de acionamento muito mais desenvolvida, o que se traduz em preços mais elevados.

2.3. Dinâmica veicular

Nesta seção serão tratadas as equações que descrevem a dinâmica de um veículo em movimento. Espera-se que, a partir do equilíbrio de forças, seja possível modelar a dinâmica de um veículo automotor para determinar a potência necessária para mantê-lo em movimento.

O grau de detalhamento e complexidade do modelo podem variar dependendo de qual é o foco de estudo. Por exemplo, no estudo de vibrações do chassi ou conforto dos usuários, seria importante a modelagem transversal e deslocamento vertical da suspensão. Já para estudos sobre a facilidade de condução e segurança do automóvel, uma modelagem de curva seria mais essencial. No caso deste trabalho, o objetivo é determinar a análise do consumo de energia, dependente do desempenho em acelerações e frenagens de um veículo, bem como as forças de resistência ao movimento. Desta forma, o modelo escolhido será o das forças que atuam longitudinalmente ao veículo durante seu movimento.

A modelagem e equacionamentos apresentados a seguir podem ser encontrados na literatura, como em Brunetti (2012) e modelos semelhantes servem como base para trabalhos envolvendo gestão energética em veículos híbridos como Lopes (2008) e Revoredo (2007).

As principais forças aplicadas em um veículo em movimento estão presentes de forma ilustrativa na figura 12 abaixo.

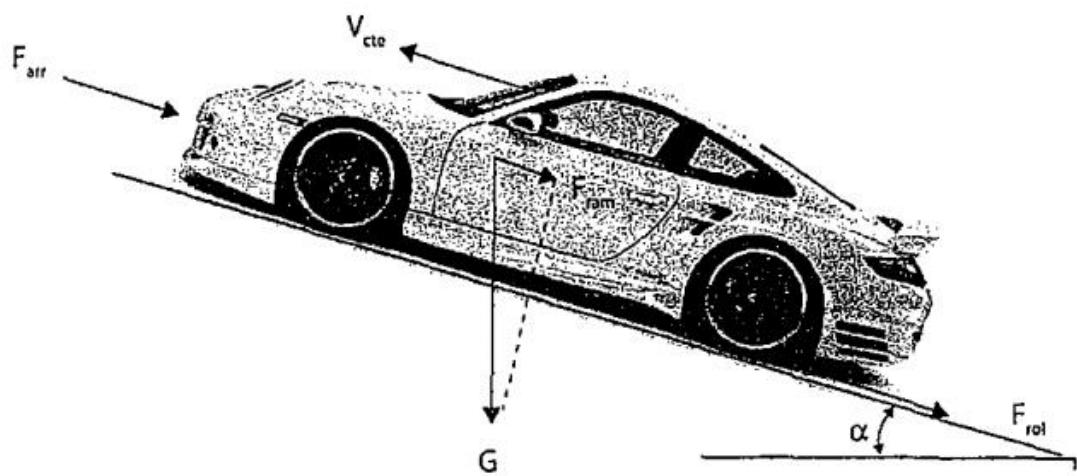


Figura 12: Representação das forças atuantes em um veículo em terreno inclinado. (Brunetti, 2012)

Vale notar que as forças resistivas listadas aparecem para qualquer veículo automotivo em movimento e não dependem do modo de propulsão. A partir disso, será trabalhada a dinâmica de um ônibus híbrido. Utilizando o Teorema do Movimento do Baricentro (TMB), é possível a relação das forças externas com a dinâmica longitudinal do corpo, que no caso é o próprio veículo, mostrada abaixo.

$$M \cdot a = M \cdot \dot{v} = F_{tr} - F_{arr} - F_{rol} - F_g \quad (2.1)$$

Os termos da equação acima são respectivamente:

- M : massa do veículo
- a ou \dot{v} : aceleração longitudinal do veículo
- F_{tr} : força de tração aplicada nos pneus
- F_{arr} : força de arrasto ou resistência aerodinâmica
- F_{rol} : força de resistência ao rolamento
- F_g : força gravitacional agindo na direção longitudinal do corpo

Em outras palavras, a força resultante no veículo será a diferença entre a força de tração, fornecida pelos motores, e as forças resistivas ao movimento. Nas seções a seguir, cada termo listado será tratado com mais detalhes.

2.3.1. Força de tração

O torque aplicado pelo motor passa pelas rodas e se apresenta como força atuante para movimentar o veículo na direção longitudinal. Para se encontrar a relação entre este torque e a força, é preciso observar o caminho que a potência transmitida segue até chegar no contato entre pneu e solo.



Figura 13: Representação dos elementos de transmissão de potência desde o motor elétrico até os pneus.

Considerando um torque de saída do motor elétrico, chamado de T_M , o momento de inércia do eixo de transmissão, J_{tr} , a rotação dada por ω , pode-se determinar o torque resultante no eixo de transmissão como:

$$T_{tr} = T_M - J_{tr} \cdot \dot{\omega} \quad (2.2)$$

Analogamente, o torque de saída do eixo de transmissão é transferido para os eixos ligados às rodas por meio do diferencial. O torque de saída nas rodas será:

$$T_R = T_{tr} \cdot i_D - J_R \cdot \dot{\omega}_R \quad (2.3)$$

Onde T_R é o torque nas rodas, i_D o fator de redução do diferencial, J_R é o momento de inércia das rodas junto aos eixos ligados a ela e ω_R a rotação das rodas, com sua derivada sendo sua aceleração. Sendo R o raio do conjunto pneu e rodas, a força de tração no veículo é finalmente:

$$\begin{aligned} F_{tr} &= \frac{T_R}{R} \\ &= [(T_M - J_{tr} \dot{\omega}) \cdot i_D - J_R \cdot \dot{\omega}_R] \cdot \frac{1}{R} \\ &= \frac{T_M \cdot i_D}{R} - \frac{(J_{tr} \dot{\omega}_R \cdot i_D^2 + J_R \cdot \dot{\omega}_R)}{R} \end{aligned}$$

A força de tração é determinada na equação 2.4, na qual pode-se destacar mais um termo em função da derivada da velocidade de rotação. Lembrando ainda da relação entre velocidade longitudinal do veículo e rotação das rodas:

$$F_{tr} = \frac{T_M \cdot i_D}{R} - \frac{(J_{tr} \cdot i_D^2 + J_R)}{R^2} \cdot \dot{v} \quad (2.4)$$

O termo mais à direita, que representa a inércia rotativa dos elementos de transmissão pode então ser apresentado como uma constante, denominada massa equivalente dos componentes de transmissão, M_{eq} . Substituindo a equação 2.4 na equação 2.1, o lado esquerdo da equação ganha mais uma parcela.

$$(M + M_{eq}) \cdot \dot{v} = M_{ap} \cdot \dot{v} = \frac{T_M \cdot i_D}{R} - F_{arr} - F_{rol} - F_g \quad (2.5)$$

$$\text{Onde: } M_{eq} = \frac{(J_{tr} \cdot i_D^2 + J_R)}{R^2}$$

Como observação, é válido notar que a massa equivalente dos componentes de transmissão é função de seus momentos de inércia, dependentes da massa e do quadrado de seus raios. Considerando suas dimensões, a massa equivalente destes componentes representa uma parcela muito menor que a da massa do veículo. A soma destas duas massas é representada por uma massa aparente (M_{ap}).

2.3.2. Força de arrasto aerodinâmico

A força de resistência que o ar aplica sobre o veículo durante seu deslocamento é uma parcela importante de dissipação de potência dependendo da velocidade relativa. No livro de Brunetti (2012), a força de arrasto é função de fatores como forma do veículo, atrito superficial, sustentação, entre outros. Segundo este autor e a literatura de mecânica dos fluidos, a força de arrasto pode ser calculada pela seguinte equação.

$$F_{arr} = \frac{1}{2} C_a \rho_{ar} A_{fr} v_{rel}^2 \quad (2.6)$$

Nesta equação, os termos presentes são:

- C_a é o coeficiente de arrasto aerodinâmico
- ρ_{ar} é a densidade do ar no ambiente
- A_{fr} é a área frontal do veículo
- v_{rel} é a velocidade relativa entre o veículo e o ar.

Como a carcaça de um ônibus possui dimensões maiores e um formato menos aerodinâmico do que em um carro de corrida ou passeio, por exemplo, os valores de sua área frontal e coeficiente de arrasto são maiores.

2.3.3. Força de resistência ao rolamento

Os pneus dos veículos em contato com o solo estão sujeitos a deformações, tanto por conta da elasticidade da borracha, quanto pela compressão da câmara de ar. Brunetti (2012) cita que cerca de 90 a 95% das perdas causadas durante a rolagem de um pneumático estão associados à histerese e dissipação de calor. Tais perdas, segundo o autor, são influenciadas pela velocidade de rotação do pneu, a carga, as condições do pneu e do tipo de solo.

Segundo a literatura, a resistência ao rolamento pode ser determinada, de forma geral, pela equação seguinte:

$$F_{rol} = f \cdot G \cdot \cos \alpha \quad (2.7)$$

Essa equação leva em conta que não há diferenças significativas na carga e condições dos pneus traseiros e dianteiros. O termo $G \cos \alpha$ é a força normal atuante em uma inclinação. A variável f é um coeficiente de resistência ao rolamento e existem muitas referências para sua determinação. Neste trabalho, será adotada uma abordagem presente em Brunetti (2012) por se tratar de valores f para veículos médios e pesados, como ônibus, caminhões e camionetas. O coeficiente é calculado por:

$$f = (0,0068 + 0,000046 \cdot v) \cdot s \quad (2.8)$$

Sendo o adimensional s dado por tabelas dependendo do tipo de piso.

Tabela 2.1 – Coeficientes característicos do tipo de piso. (Brunetti, 2012)

Tipo de piso	Concreto ou asfalto	Dureza média ou terra	Areia
s	1,316	7,017	26,316

Alternativamente, existem valores já tabelados do coeficiente de resistência ao rolamento que desconsideram a influência da velocidade. Este tipo de abordagem é citada em Brunetti (2012) e utilizada em trabalhos como o de Lopes (2008). A tabela a seguir apresenta estes valores.

Tabela 2.2 – Coeficiente de resistência ao rolamento, f , para diversas situações. (Brunetti, 2012)

Veículo	Concreto ou Asfalto	Dureza média ou terra	Areia
De passeio	0,015	0,080	0,300
Pesados	0,012	0,060	0,250
Tratores	0,020	0,040	0,200

2.3.4. Força gravitacional

Ao se deslocar sobre um terreno inclinado, surge uma componente de força na direção longitudinal que é a projeção do peso do veículo. Esta força em particular pode aparecer tanto a favor (descidas) quanto contra o movimento (subidas). A fórmula que fornece esta força é simples de ser calculada.

$$F_g = M \cdot g \cdot \operatorname{sen}\alpha \quad (2.9)$$

Onde, M é a massa do veículo, g é a aceleração da gravidade (adotado $9,81\text{m/s}^2$) e α é o ângulo da inclinação (ver figura 12).

Quando se trata de um ônibus urbano, com trajeto e operação conhecidos, Khanipour; Ebrahimi; Seale (2007) apresentaram que o efeito da inclinação sobre a potência demandada nos motores pode ser significativo. Considerando também que a massa de um ônibus é cerca de 10 a 15 vezes maior que a massa de um automóvel de passeio, a força gravitacional tem um efeito muito significativo na dinâmica de um veículo automotivo pesado.

Na prática, muitas vezes é mais fácil aproximar um trecho percorrido para uma rampa e medir sua projeção horizontal e vertical, o que fornece a tangente do ângulo α . Caso este ângulo seja pequeno, é possível a aproximação do valor de $\operatorname{sen}\alpha = \operatorname{tana}$ dependendo do nível de precisão desejado.

A tangente do ângulo de inclinação é frequentemente empregada na literatura como um valor em porcentagem, por se tratar de valores na casa dos centésimos.

2.4. Estratégias de operação em veículo híbridos em série

Nesta seção, são discutidas algumas estratégias adotadas para se operar o sistema de propulsão de um veículo híbrido. A eficiência de um veículo híbrido, do ponto de vista de desempenho e redução de consumo ou emissões de poluentes, depende do funcionamento coordenado entre os diferentes sistemas de propulsão.

A intenção da hibridização é aproveitar ao máximo as vantagens tanto do MCI quanto do motor elétrico. Portanto quanto mais eficiente for o sistema de gestão de potência, maior será o aproveitamento dos pontos fortes dos diferentes componentes.

Como citado por Liu (2017), o desenvolvimento de uma estratégia de gestão de potência é complexo e pode envolver diversos desafios, tais como operar o motor térmico e elétrico nos pontos de maior rendimento, minimizar a dinâmica dos componentes mecânicos, otimizar a captura de energia por frenagem regenerativa, otimizar o desempenho do veículo dependendo da utilização.

Normalmente, estas estratégias se tratam de lógicas para que se decida qual fonte de energia ativar, junto ao gerenciamento do banco de baterias. O sistema de tração híbrida em série porta um controlador para se garantir um funcionamento que siga uma estratégia de operação eficiente. Lopes (2008) descreve duas estratégias básicas adotadas: são as chamadas *thermostat* e *power split*.

A estratégia *thermostat* regula o estado de carga (“*state of charge*” ou SOC) da bateria, que é uma relação entre a carga armazenada das baterias e sua capacidade total, indicada em porcentagem. Mantendo o SOC em um faixa ideal, a vida útil da bateria é favorecida. O controlador regula este estado a partir do funcionamento do MCI, ou seja, caso a carga da bateria diminua abaixo de um valor tolerável, o MCI alimenta as baterias até que se chegue ao valor ideal.

Por sua vez, a estratégia *power split* regula a potência fornecida por cada fonte energética. Um MCI possui um intervalo de operação em que seu consumo específico alcança seus valores mais baixos. Desta forma, é definida uma faixa de potências ideal para acionar o motor térmico com o mínimo de consumo de combustível.

Caso a potência demandada pelo veículo esteja abaixo desta faixa, o banco de baterias fica responsável por fornecer energia para propulsão. O MCI é acionado caso se necessite de uma potência dentro dos valores ideais. Por outro lado, se a demanda ultrapassar esta faixa, então tanto o MCI quanto as baterias são solicitadas.

Estes dois tipos de estratégia podem funcionar em conjunto, garantindo a operação do motor térmico perto de sua condição ideal ao mesmo tempo que gerencia o funcionamento e prolongamento da vida útil das baterias.

Como será discutido nas seções a seguir, as estratégias *thermostat e power Split* serão utilizadas no modelo do ônibus híbrido para as simulações.

3. MODELO E SIMULAÇÃO

Nesta seção será apresentado o modelo matemático utilizado para simular o ônibus híbrido. Partindo-se das forças que regem a dinâmica do veículo, pretende-se encontrar a demanda energética para se operar o ônibus.

3.1. Dinâmica do ônibus e demanda de energia

Boa parte da dinâmica para o caso deste trabalho já foi apresentada na seção 2.3, quando foram apresentados os conceitos para um veículo genérico. A equação da dinâmica do ônibus híbrido é obtida a partir da equação 2.1 e substituindo cada termo de força desenvolvido entre as seções 2.3.2 a 2.3.4.

$$M\ddot{v} = F_{tr} - \frac{1}{2}C_a\rho_{ar}A_{fr}v^2 - (0,0068 + 0,000046.v).s.G.\cos\alpha - mg.\sen\alpha$$

Rearranjando os termos, a força de tração necessária para movimentar o veículo é dada por:

$$F_{tr} = M.\dot{v} + K_2v^2 + K_1v + K_0 \quad (3.1)$$

Onde as novas constantes são definidas como:

$$K_2 = \frac{1}{2}C_a\rho_{ar}A_{fr}$$

$$K_1 = 0,000046.s.G.\cos\alpha$$

$$K_0 = 0,0068.s.G.\cos\alpha + mg.\sen\alpha$$

A potência demandada pelo sistema é então calculada por:

$$P_{tr} = F_{tr}.v = (M.\dot{v} + K_2v^2 + K_1v + K_0).v \quad (3.2)$$

A energia demandada pode ser determinada integrando-se a potência:

$$E_{tr} = \int P_{tr}(t).dt \quad (3.3)$$

3.2. Gerenciamento das fontes de potência

Até este ponto, foram apresentadas equações para o cálculo de demanda de potência e energia para movimentar o veículo. Na seção 2.4 foram discutidas duas estratégias de operação simples para determinar qual fonte energética será utilizada para uma dada situação.

No caso deste trabalho, as duas opções possíveis são a energia armazenada nas baterias que é convertida em energia elétrica, ou a potência de saída de um MCI movido a diesel e acoplado a um gerador que converte energia mecânica em elétrica.

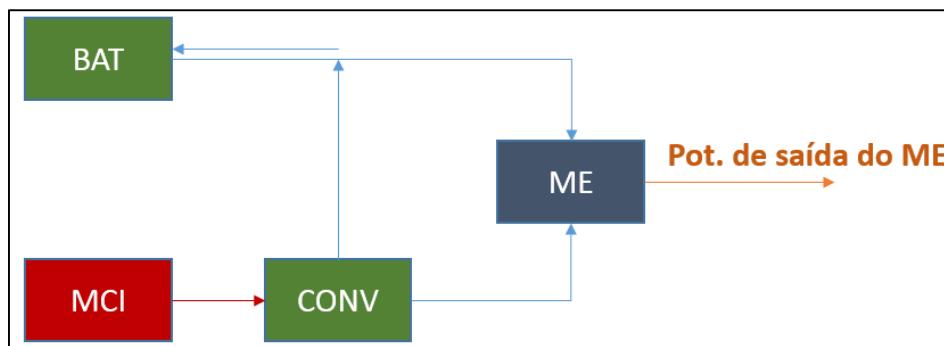


Figura 14: Diagrama representativo da ligação entre os componentes do sistema de propulsão.

A figura 14, acima, ilustra um diagrama de como estão ligados os componentes de interesse para esta simulação. Independente do caso, um motor elétrico deve ser alimentado para transformar energia elétrica de entrada em torque e rotação de saída para as rodas.

Cabe neste momento definir o intervalo de potências sobre o qual serão definidas as estratégias de gestão de potência do sistema de propulsão. O modelo utilizará dados baseados no motor OM 924La Proconve P-7 da fabricante Mercedes-Benz, empregado em ônibus voltados ao transporte urbano. As curvas do motor estão apresentados na figura 15, retirados do datasheet do conjunto chassi-motor.

A partir dos dados, o intervalo do motor com maior eficiência, ou menor consumo específico está presente entre 1100 e 1600rpm, região onde a curva de torque alcança um valor máximo. O intervalo de potência do motor à combustão ligada a esta faixa está entre $P_{mci,min}=90\text{ kW}$ e $P_{mci,max}=130\text{ kW}$.

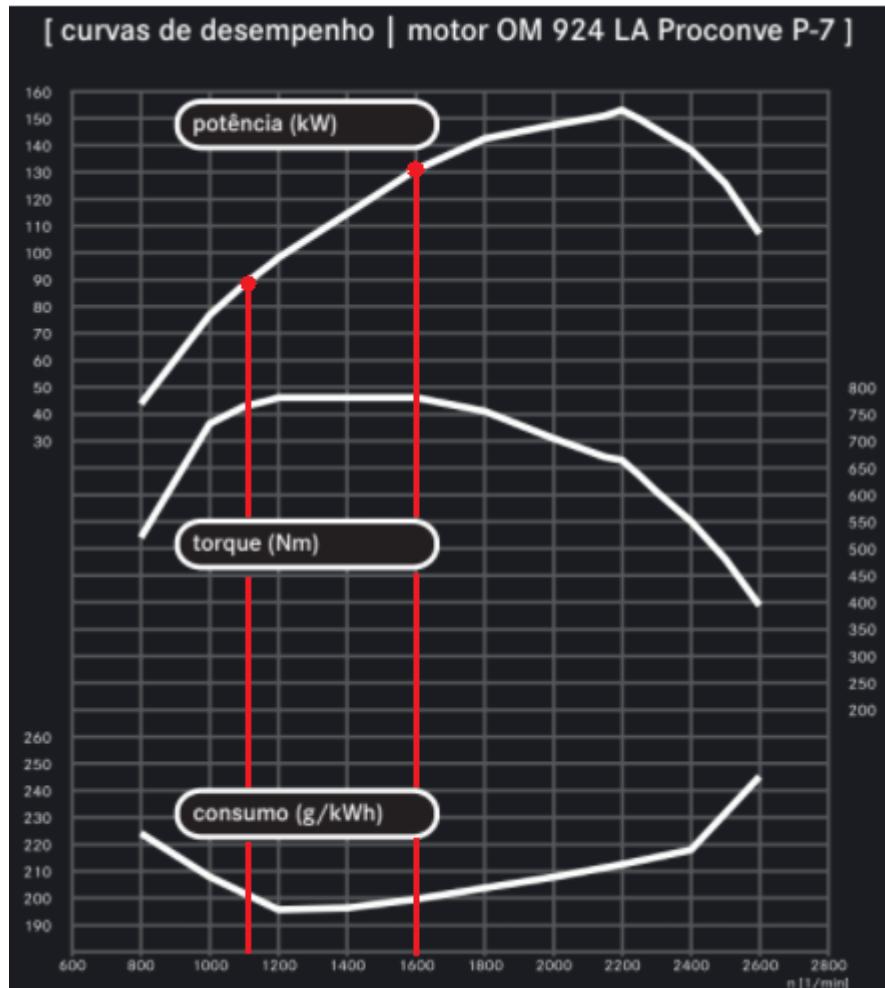


Figura 15: Curvas do motor OM924 LA Proconve P-7. (Mercedes-Benz)

Em seguida, serão definidas duas potências de saída mínima e máxima associadas às potências do MCI transmitidas às rodas.

$$P_{\max} = P_{\text{mci},\max} \cdot \eta_{\text{conv}} \cdot \eta_{\text{me}} \cdot \eta_{\text{dif}} \quad (3.4)$$

$$P_{\min} = P_{\text{mci},\min} \cdot \eta_{\text{conv}} \cdot \eta_{\text{me}} \cdot \eta_{\text{dif}} \quad (3.5)$$

Definidos estes valores, os casos a serem considerados durante o trajeto para a estratégia *power-split* são:

- (i) $P_{\text{dem}} > P_{\max}$
- (ii) $P_{\min} \leq P_{\text{dem}} \leq P_{\max}$
- (iii) $P_{\text{dem}} < P_{\min}$

Como já foi citado em 2.4, a estratégia *power-split* está baseada na faixa de potência de maior eficiência do MCI, delimitada por um valor máximo e mínimo.

Durante a operação, ainda será monitorado o estado de carga da bateria (SOC), que é uma relação entre a carga armazenada nas baterias e a carga total nominal que poderia ser estocada. Os trabalhos de Ferreira (2007) e Pereira (2007) apresentam uma visão mais detalhada do modelamento nas baterias.

Para este trabalho, será adotada a hipótese de que a tensão da bateria assume um valor constante, de tal forma que a corrente da bateria será calculada através da potência demandada pela bateria.

$$I_{bat} = \frac{P_{bat}}{U_{bat}} \quad (3.6)$$

De acordo com as referências e a literatura, o estado de carga (SOC) da bateria pode então ser estimado pela seguinte equação:

$$SOC(\%) = SOC_{ini}(\%) - \frac{100}{3600 \cdot C_{Ah}} \int I_{bat} dt \quad (3.7)$$

Onde, SOC_{ini} é o estado de carga no início da simulação e C_{Ah} é a capacidade da bateria, expressa em Ah no lugar da unidade do SI (Coulomb). Revoredo (2007) discute que a conveniência de usar este tipo de unidade se deve ao fato de que um Coulomb representa apenas o fluxo de apenas um Ampère por um segundo, o que seria uma quantidade de energia baixa em aplicações tais como movimentação de veículos.

As duas estratégias serão combinadas para a realização da simulação. A primeira (*power-split*) gerencia a potência de demanda de acordo com o ponto ótimo do MCI. A segunda estratégia (*thermostat*) atua de forma a garantir que o estado de carga da bateria permaneça em uma faixa de valores também ideal. Neste segundo caso, o controle do SOC é vantajoso para aumentar a vida útil da bateria, pois em determinados valores a bateria apresenta um número de ciclos de carga e descarga maiores. Em resumo, as estratégias estão representadas na tabela a seguir.

O tipo de arquitetura híbrida que será utilizado neste trabalho não exige que o ônibus fique parado e ligado à rede elétrica para recarregar o banco de baterias. Tal recarga será realizada durante a própria operação do ônibus, através da recuperação de energia pelas frenagens e pela energia excedente gerada pelo MCI.

Em resumo, o banco de baterias atuará como fonte energética nas baixas demandas energéticas e também como fonte extra nas altas demandas. Além disso, será

um elemento que pode armazenar energia que normalmente não é aproveitada em um veículo puramente movido a motor de combustão.

Tabela 3.1: Resumo da lógica de implementação da estratégia de gerenciamento de potência.

Caso	se $SOC < SOC_{min}$	se $SOC > SOC_{min}$
(i)	O MCI opera em sua potência máxima enquanto as baterias completam a potência para atender à demanda	
(ii)	Somente o MCI opera na sua potência máxima e o excedente carrega a bateria	Somente o MCI opera para atender a potência demandada
(iii)	Somente o MCI opera na sua potência máxima e o excedente carrega a bateria	Somente as baterias fornecem energia e o MCI fica desligado

Um ponto a ser lembrado é que uma vez que o SOC fica abaixo de SOC mínimo, também foi adicionada uma condição em que o MCI permanece ligado carregando as baterias até que o SOC alcance valores mais altos. Isso evita uma situação em que o SOC flutua em torno do valor mínimo, exigindo que o MCI ligue e desligue com muita frequência.

3.3. Simulação prévia para teste do modelo

As informações que faltam para a realização da simulação são referentes a velocidade que se deseja realizar durante o trajeto e a inclinação do terreno. Em trabalhos como Ferreira (2007) e Lopes (2008), foram utilizados dois ciclos de condução. O primeiro é o ciclo nova iorquino e o segundo é o ECE 15. Estes dois ciclos são referências para a realização de simulações e testes pois retratam condições próximas de operação de veículos em grandes cidades.

Neste trabalho, será utilizado o ciclo europeu ECE 15. Nele pode-se observar tanto acelerações/desacelerações quanto paradas de alguns segundos. A velocidade máxima alcançada é de 50km/h. Por estas características, outros autores também adotaram este ciclo para simular a operação de um ônibus de transporte público urbano.

De posse da teoria levantada nas seções anteriores mais o ciclo de condução, uma simulação foi realizada utilizando o programa MATLAB. Os parâmetros adotados estão listados nas tabelas 3.2 e 3.3.

Tabela 3.2: Parâmetros físicos relacionados ao veículo e grandezas necessárias para o cálculo das forças resistivas ao movimento.

Parâmetros gerais	Valor
Massa aparente do ônibus	16000 kg
Raio dos pneus	0,5 m
Aceleração da gravidade	9,81 m/s ²
Coeficiente de arrasto aerodinâmico	0,8
Área frontal do ônibus	8 m ²
Densidade do ar	1,23 kg/m ³
Coeficiente característico do asfalto	1,316
Rendimento do ME	0,9
Rendimento do conversor	0,9
Rendimento do diferencial	0,9
Pot. Do MCI máxima	130kW
Pot. Do MCI mínima	90kW

Para a implementação do gerenciamento de potência, também serão necessários alguns valores ligados ao banco de baterias. Estes dados foram baseados nos trabalhos de Ferreira (2007), Lopes (2008) e Pereira (2007).

Tabela 3.3: Parâmetros para o modelo do banco de baterias.

Parâmetro do banco de baterias	Valor
Capacidade	40 Ah
Número de células	200
Tensão nominal da célula	3,2 V
Rendimento do banco	0,95
SOC máximo para recarregamento	75%
SOC mínimo	60%
Massa do conjunto	1120 kg
Corrente máxima	200 A

Como pode-se observar na figura 16, a simulação foi realizada repetindo-se o ciclo ECE 15 quatro vezes. O veículo percorre 3976,1 metros durante 780s ou 13 minutos. O ônibus passou por dois trechos planos, um de subida e um de descida para se observar efeitos da força gravitacional sobre a dinâmica veicular.

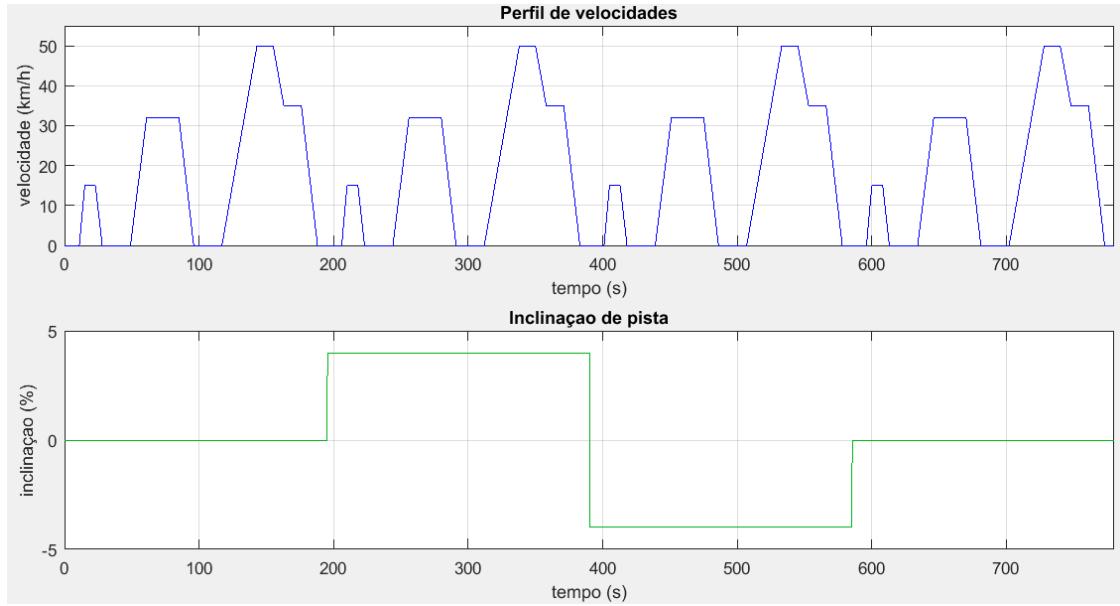


Figura 16: Perfil de velocidades e inclinação da pista em função do tempo.

Nos gráficos a seguir, estão apresentadas as potências e energia que o veículo demanda nos pneus para percorrer o trajeto com as velocidades desejadas.

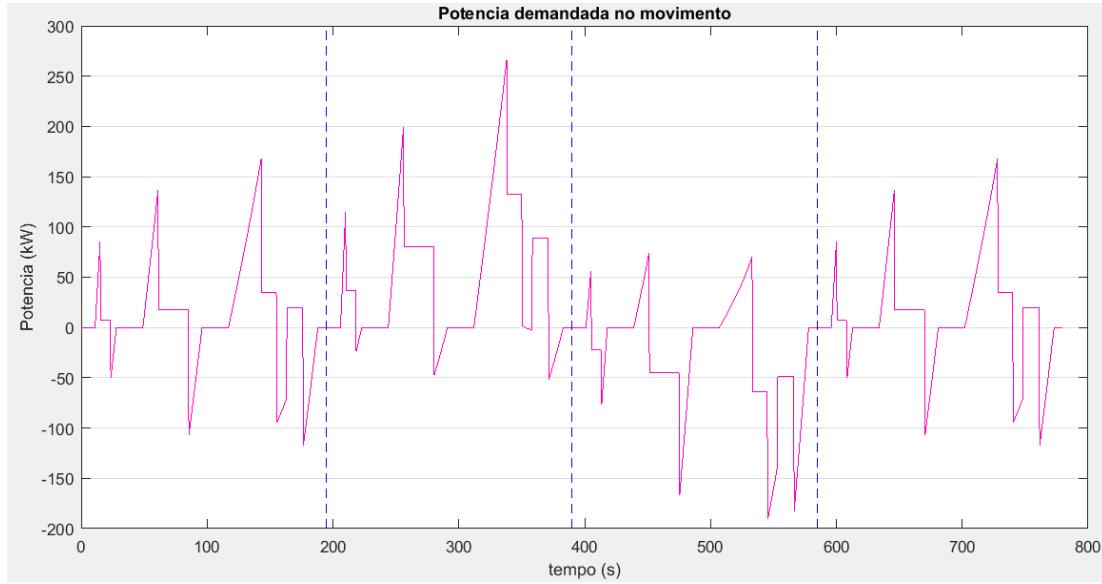


Figura 17: Potência demandada nas rodas para cada instante de tempo. As linhas verticais tracejadas indicam os instantes em que a inclinação da pista muda.

Com os dados da demanda energética para movimentar o ônibus, foi possível utilizar as estratégias de operação para determinar quando o MCI ou as baterias seriam solicitadas. Na figura 18, estão apresentados, respectivamente, a evolução do estado de carga do banco de baterias, o perfil de velocidades e a potência de saída do motor à combustão interna ao longo do tempo de simulação.

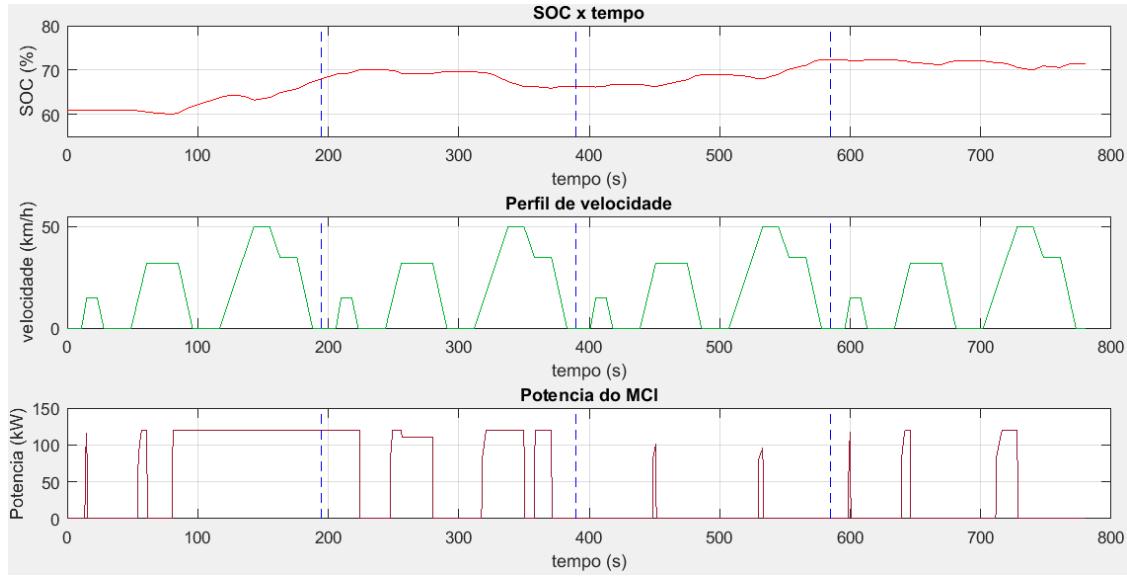


Figura 18: Evolução do SOC das baterias, o ciclo de condução e a potência do MCI utilizada em função do tempo.

O pico de potência se deu próximo de 270kW em trecho de aceleração e piso inclinado, valor que é condizente se comparado a valores encontrados por Lopes (2008) que também utilizou o ciclo ECE 15. As simulações de Pereira (2007) para um ônibus utilizando diversas condições de operação apresentaram potências demandadas em torno de 234kW a 400kW. No trabalho de Khanipour, Ebrahimi e Seale (2007) diversas simulações foram feitas e, embora não tenham utilizado o mesmo ciclo, apresentaram potências nesta ordem de grandeza para velocidades próximas de 50 km/h.

3.4. Simulação do ônibus na Cidade Universitária

A fim de se realizar a simulação do ônibus de propulsão híbrida no campus da USP, foram extraídos alguns dados do veículo convencional em serviço. A velocidade do veículo foi medida através de um aplicativo de celular chamado Ulysse Speedometer, que utiliza a posição do GPS para gravar e mostrar a velocidade em função da posição do usuário no trajeto. A figura 19 apresenta uma das medidas realizadas em trecho do percurso feito pela linha 8022-10.

Em seguida, foram passadas curvas para o MATLAB cujos dados são aproximações das velocidades medidas, com menos flutuações. Tais flutuações poderiam estar ligadas à imprecisão de medição e poderiam causar problemas na simulação por representarem acelerações muito abruptas.

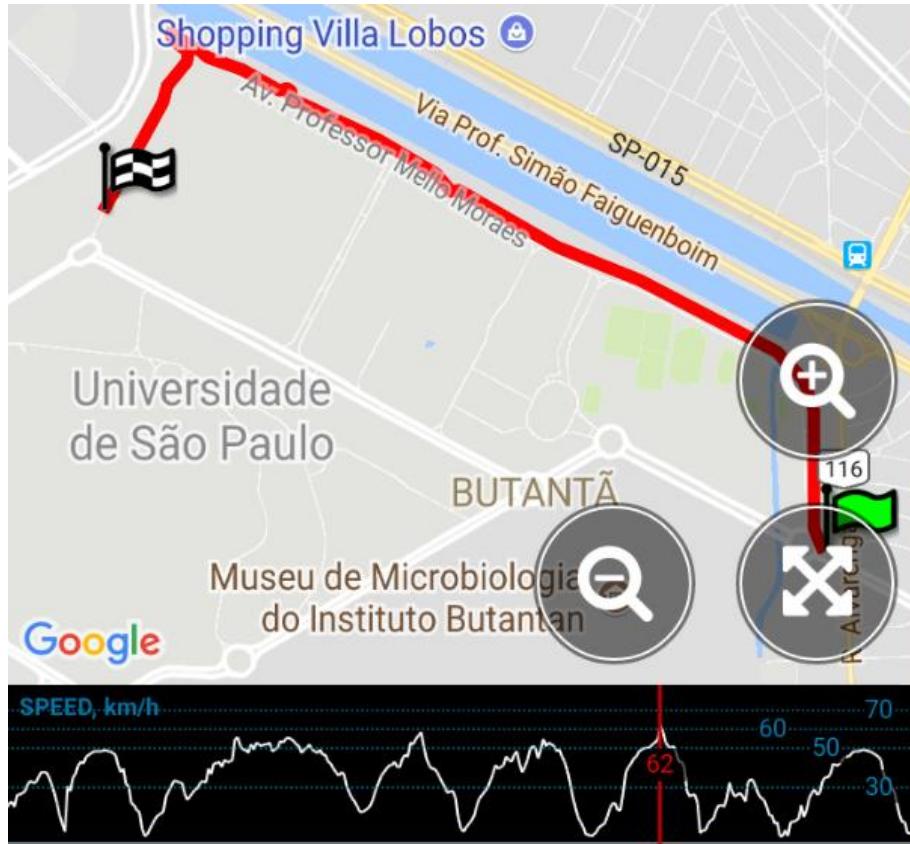


Figura 19: Dados adquiridos do circular em serviço na USP.

Adicionalmente às medições de velocidade, também foi necessário a obtenção da inclinação da pista por onde o ônibus percorria. Para isso, foi realizado o traçado de trechos do itinerário dos ônibus no programa Google Earth. A partir do percurso fornecido, o programa é capaz de fornecer a altitude em cada ponto, bem como medir a distância percorrida.

A partir da diferença de altitudes e da distância, é possível estimar a inclinação aproximada entre os pontos. A figura 20 mostra o gráfico da elevação do terreno em um trecho traçado no programa que serviu de base para a curva de inclinação da pista implementada na simulação.



Figura 20: Gráfico da elevação da pista em função da distância percorrida.

4. RESULTADOS

Simulações foram realizadas para dois trechos do itinerário da linha circular 8022-10 e um trecho da linha 8012-10. O primeiro trecho foi medido entre a entrada pelo Portão 1 da Cidade Universitária até percorrer toda a extensão da Avenida Professor Mello Moraes, que segue paralela à Raia Olímpica. A segunda simulação se trata da parte de subida do veículo na Avenida Lineu Prestes. A terceira simulação foi feita por conta da declividade na Rua do Matão, pois pode indicar resultados de grande interesse.

4.1. Simulação – Portão 1 até Portão 2 através da Av. Mello Moraes

No trecho em questão, o ônibus não encontra terrenos muito irregulares. Por outro lado, a avenida é extensa e não apresenta muitas curvas, o que torna esta parte do trajeto uma das mais rápidas do itinerário. A figura 21 apresenta um mapa destacando o trecho simulado, desde a entrada pelo portão principal da USP até percorrer toda a Avenida Professor Mello Moraes sentido portão 2.

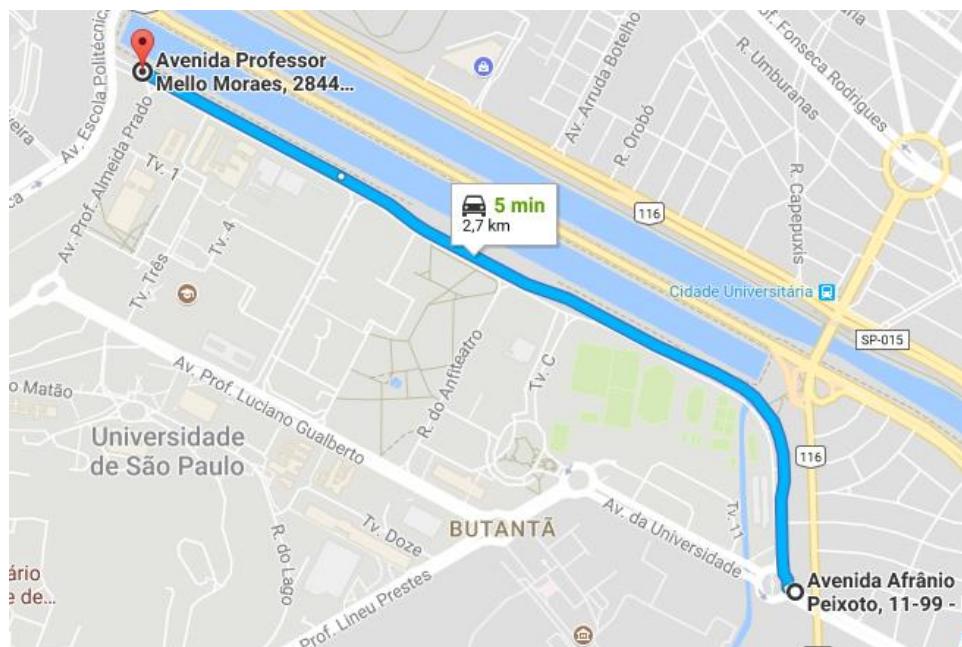


Figura 21: Trecho simulado entre os portões 1 e 2 da USP. (Fonte: Google maps)

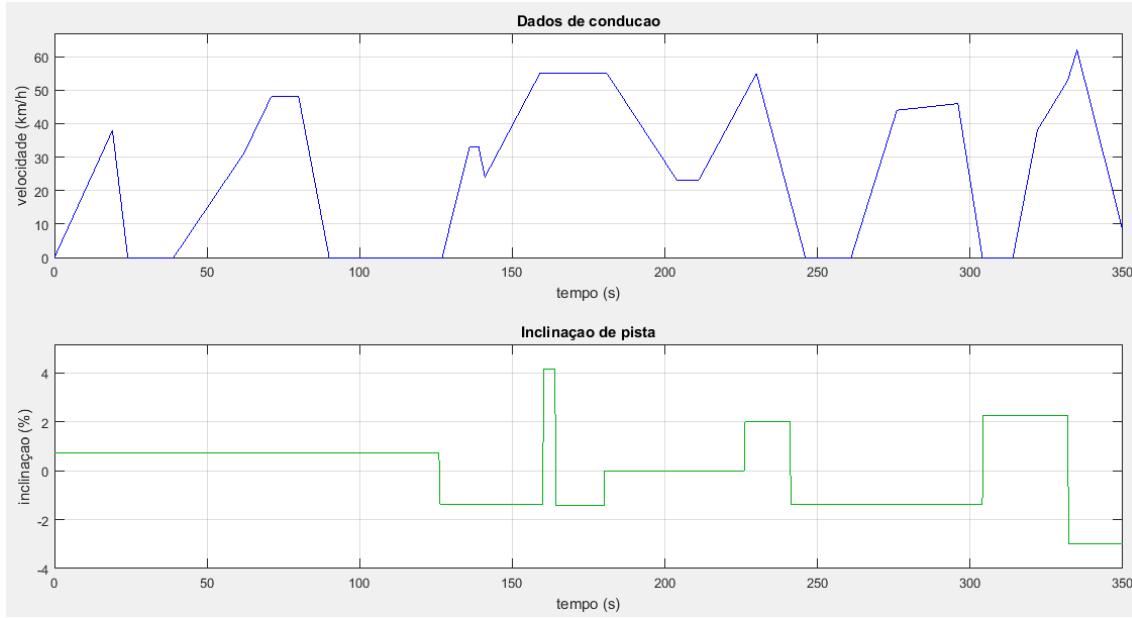


Figura 22: Curvas aproximadas a partir dos dados coletados.

A figura 22 apresenta o perfil de velocidade e relevo da pista aproximados para o caso real. De posse das equações da dinâmica veicular e da estratégia de gestão de potência é possível realizar a simulação e encontrar as curvas de potência geradas por cada fonte energética (figura 23).

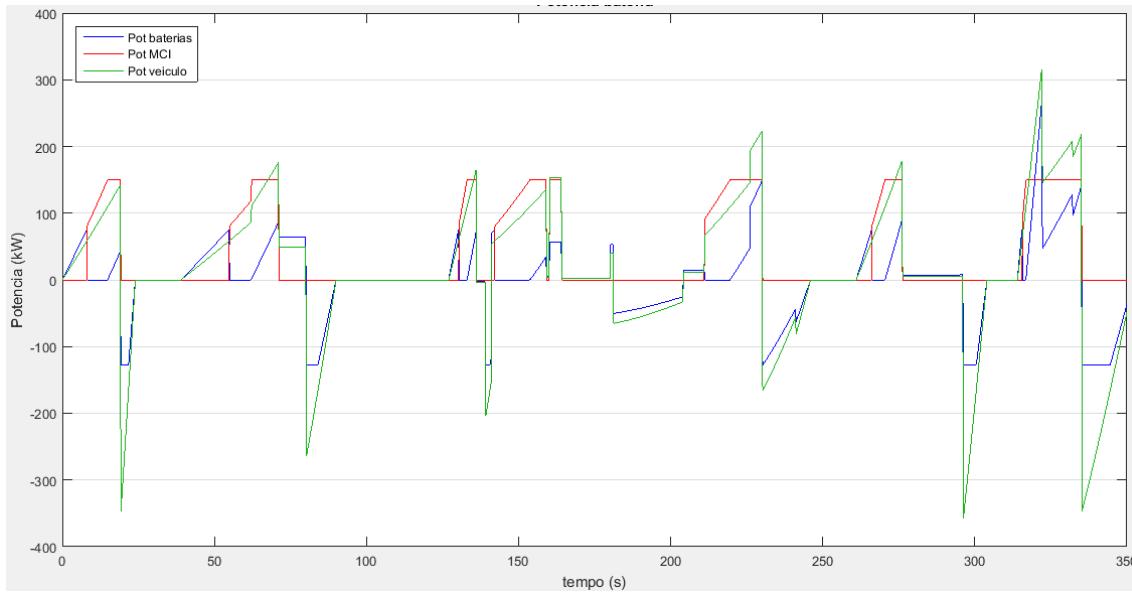


Figura 23: Evolução no tempo da potência demandada pelo veículo, potência fornecida pelas baterias e pelo MCI.

A partir da potência, é possível determinar a evolução da energia fornecida por cada fonte energética no decorrer do trajeto, mostrado na figura 24.

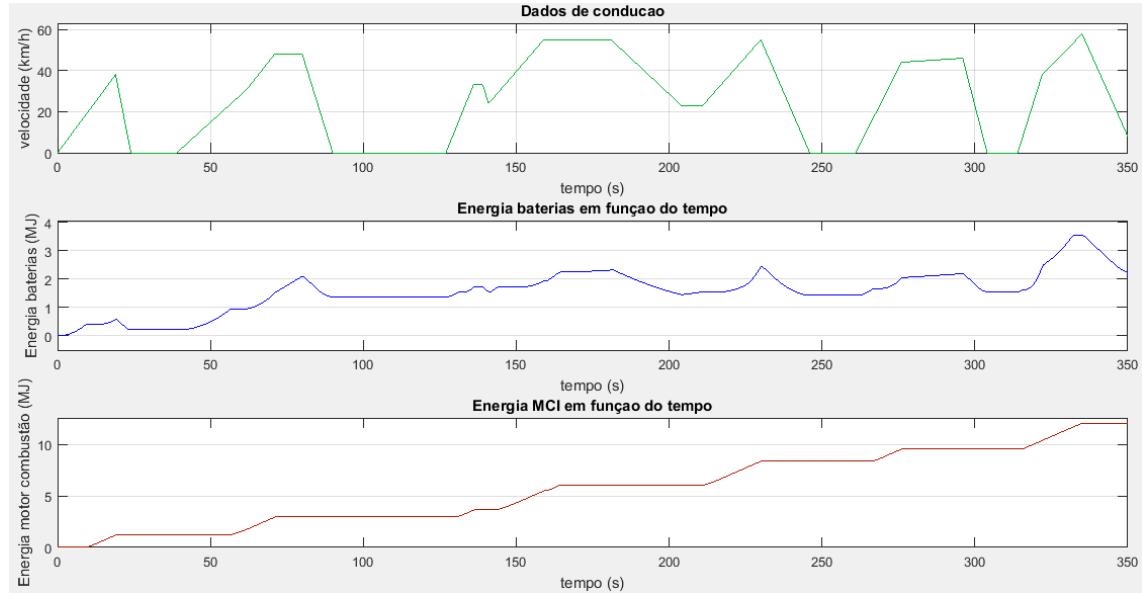


Figura 24: Energia fornecida pelas fontes energéticas do sistema.

A Figura 25 apresenta as curvas do SOC do banco de baterias junto à potência fornecida pelo MCI que são os dois elementos envolvidos na lógica de estratégia de gestão de potência.

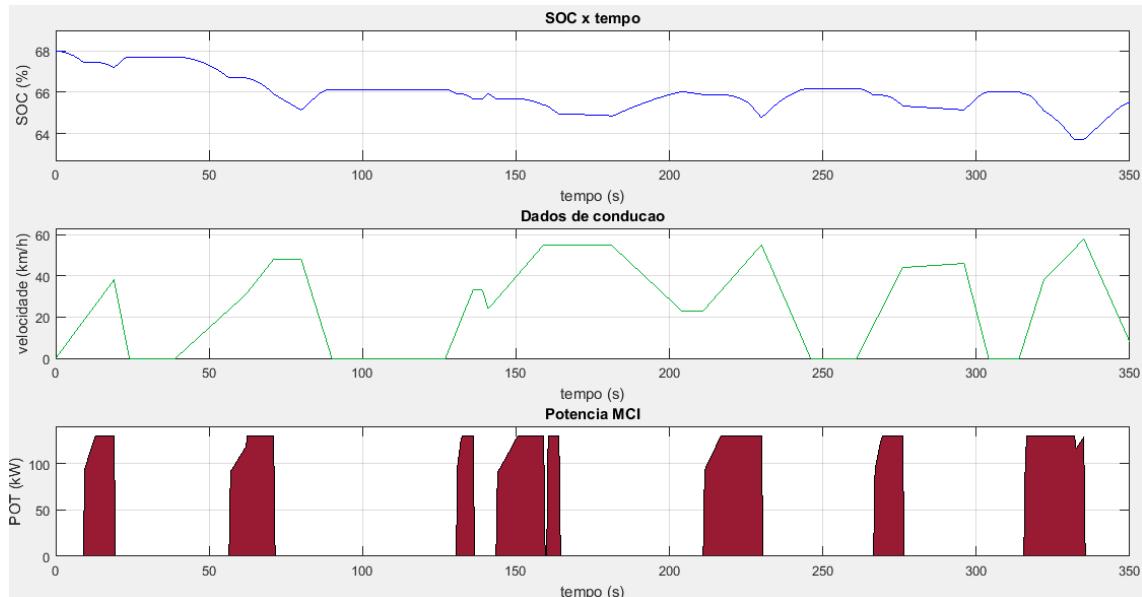


Figura 25: Respectivamente as curvas do SOC, velocidade do ônibus e potência do MCI.

4.2. Simulação – subida Av. Lineu Prestes até ICB

O próximo trecho simulado é a subida através da Avenida Lineu Prestes, região íngreme e quase retilínea. Neste trecho, a atuação do peso do ônibus no sentido contrário ao movimento é maior do que no caso anterior. A figura 26 apresenta o trecho mencionado, cujos dados foram coletados entre o ponto em frente ao prédio da História e Geografia até o semáforo próximo ao ICB.

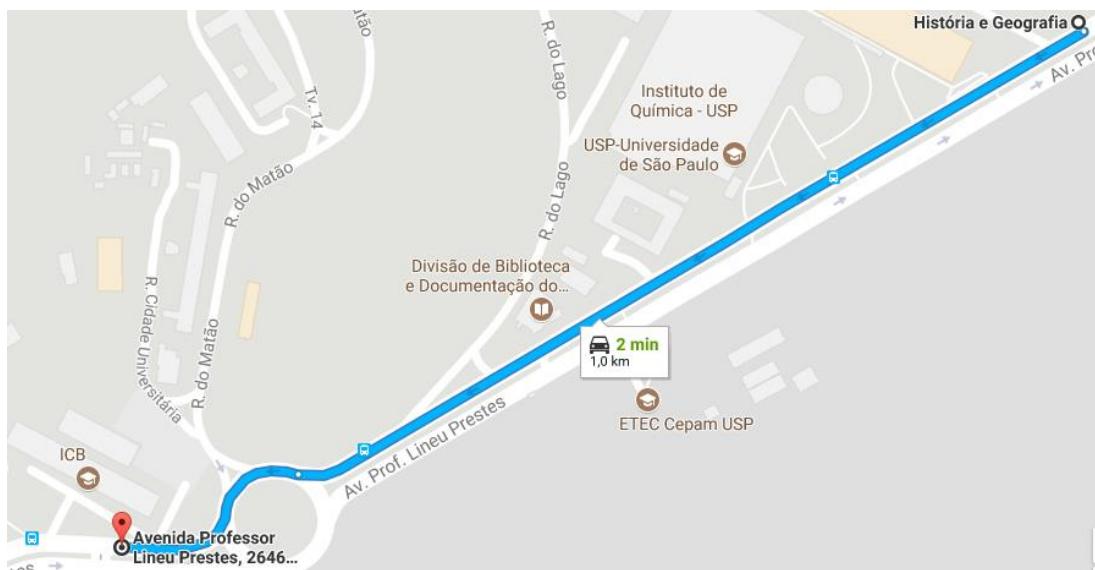


Figura 26: Trecho da simulação, subida da Av. Lineu Prestes. (Fonte: Google maps)

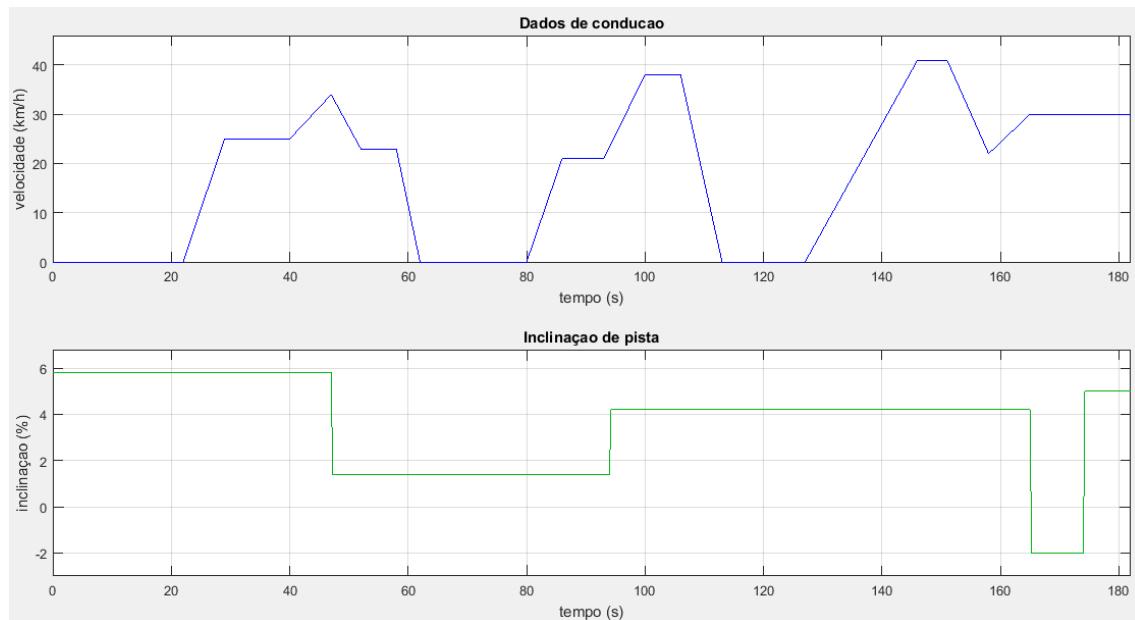


Figura 27: Aproximação dos dados coletados de velocidade e inclinação.

Nota-se pelos dados no gráfico da figura 27, que o ônibus alcança velocidades menores em comparação à operação anterior e a inclinação é quase totalmente positiva. A seguir, apresentam-se os gráficos de potência e energia consumida acumulada em função do tempo para esta simulação.

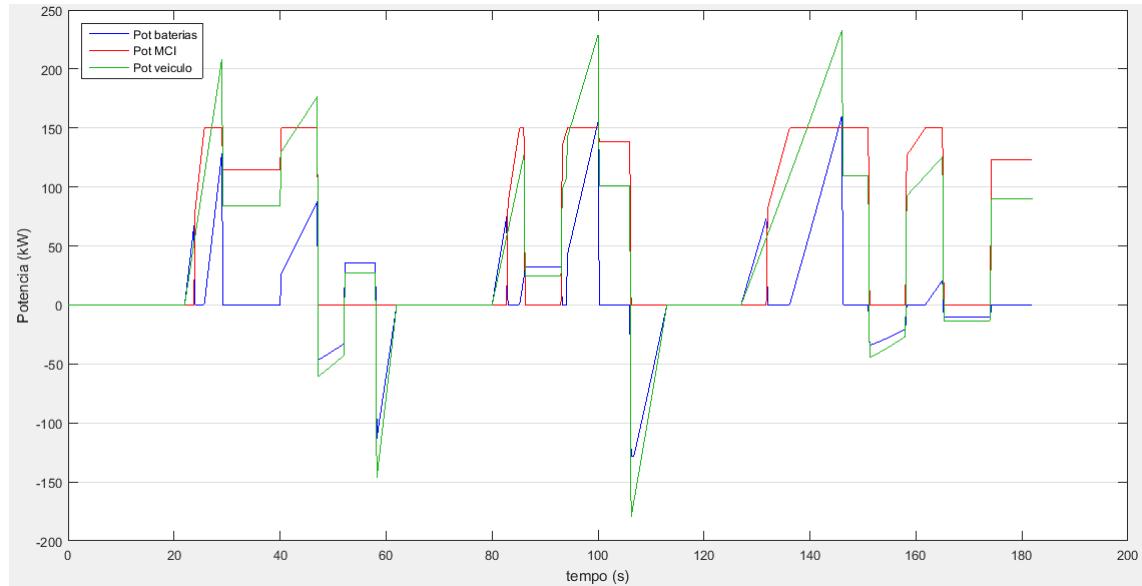


Figura 28: Evolução no tempo da potência demandada pelo veículo, potência fornecida pelas baterias e pelo MCI.

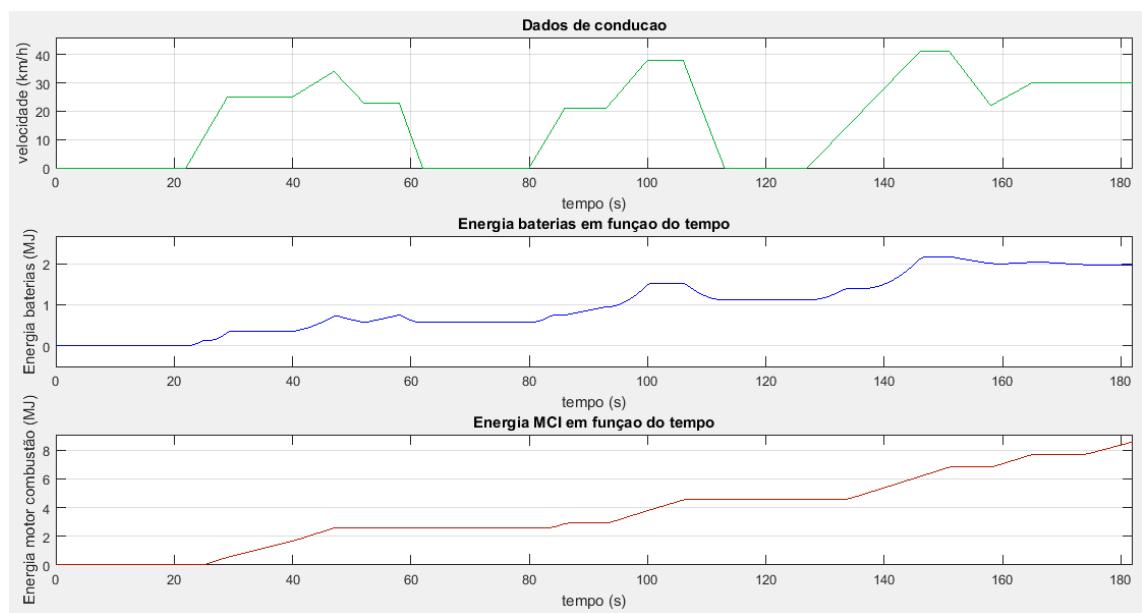


Figura 29: Energia consumida acumulada em função do tempo das duas fontes energéticas.

O próximo gráfico mostra a evolução do estado de carga das baterias ao longo do tempo, bem como a potência que o motor diesel forneceu ao sistema para o movimento do veículo neste trecho.

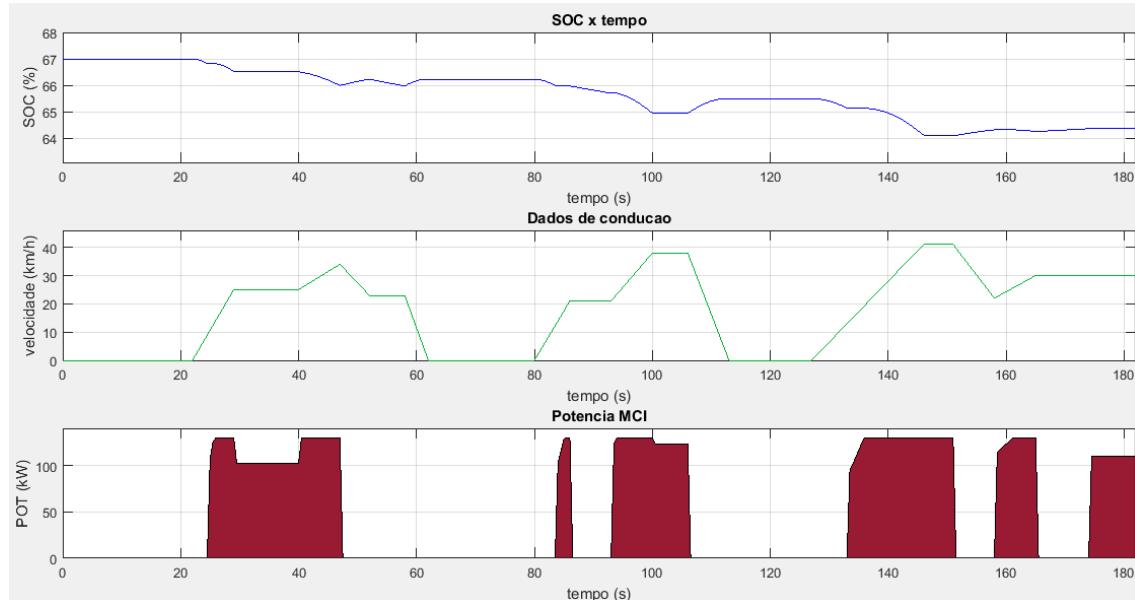


Figura 30: SOC das baterias, velocidade do veículo e potência fornecida pelo MCI.

4.3. Simulação – descida pela Rua do Matão

Esta simulação foi realizada para um trecho de inclinação negativa, ou seja uma descida, mais íngreme do que nos outros trechos anteriores e na linha de circular 8012-10. Os dados foram coletados desde a entrada do veículo na Rua do Matão até a parada de ônibus próxima ao estacionamento da FAU.

Espera-se que nesta situação, a frenagem regenerativa atue de forma mais significativa pois o peso do ônibus atuará a favor do movimento do ônibus. Durante o trajeto, existem três paradas e algumas lombadas para limitar a velocidade dos veículos, o que força os condutores a acionarem seus freios.

A figura 31 mostra o trecho analisado neste caso e a figura 32 apresenta as curvas obtidas com base nos dados coletados.

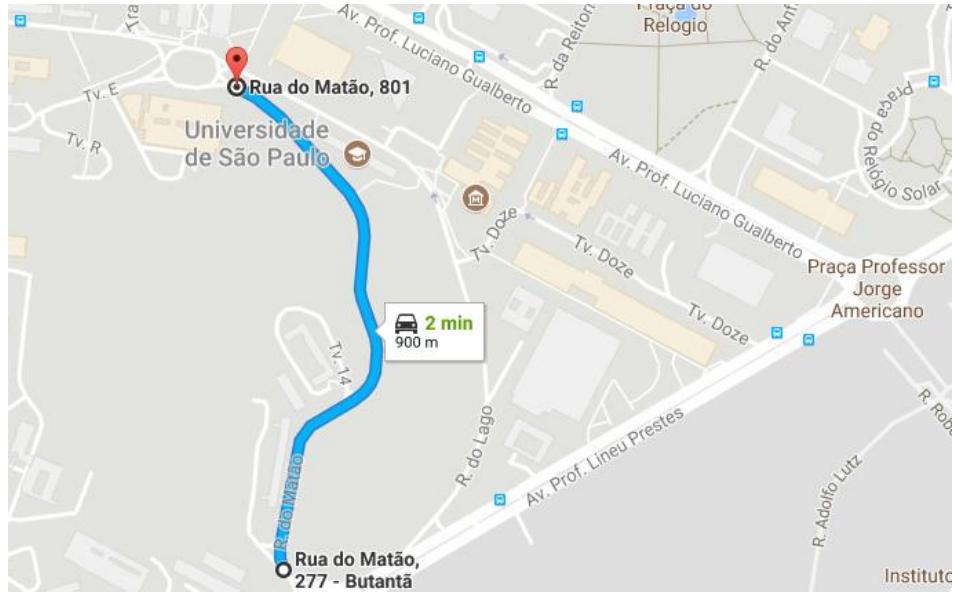


Figura 31: Mapa destacando o trecho da rua simulado. (Fonte: Google maps)

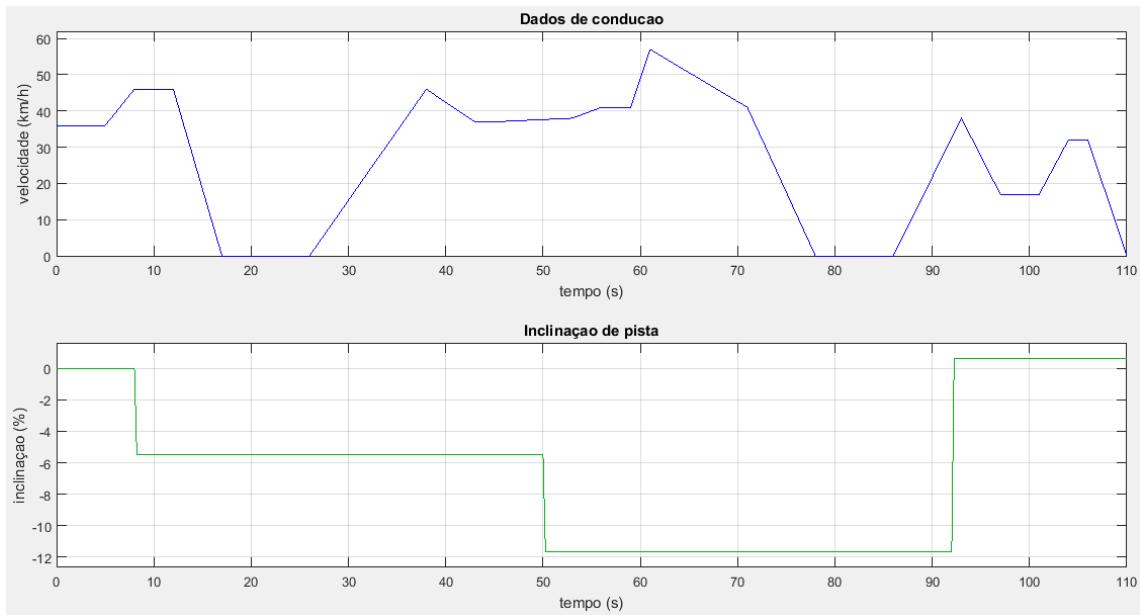


Figura 32: Curvas de velocidade e inclinação da pista coletados.

Observando as curvas acima, nota-se que o terreno tem uma declividade acentuada. A figura 33 apresenta a potência fornecida tanto pelo MCI quanto pelas baterias, em comparação à potência total demandada pelo veículo. A grande potência negativa indica que o ônibus precisa dissipar energia, tanto com o atrito dos freios mecânicos quanto uma parcela recarregando as baterias.

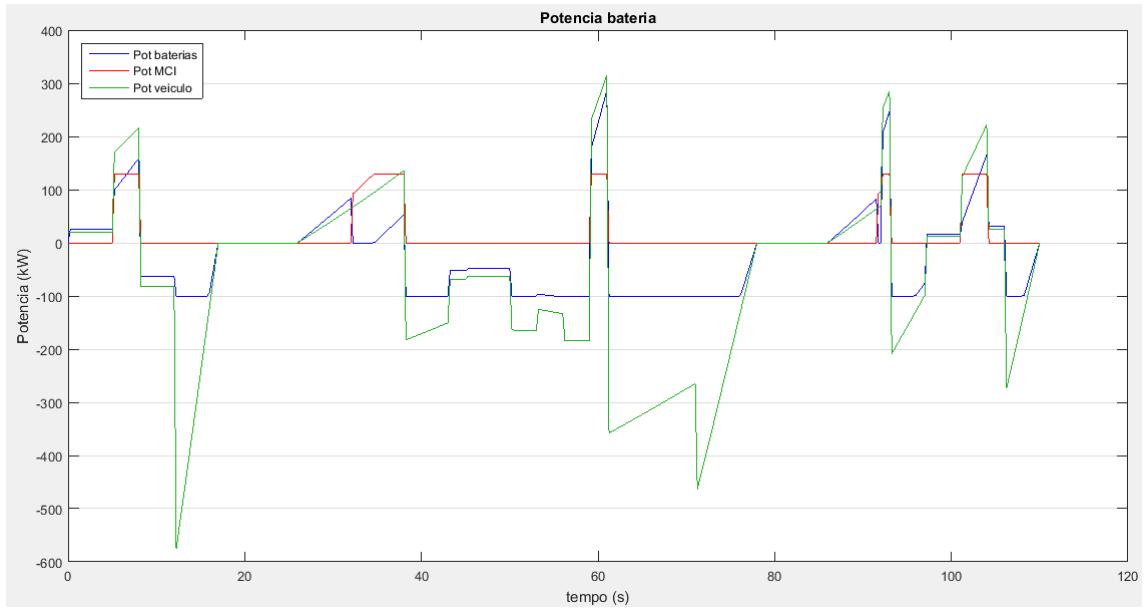


Figura 33: Evolução no tempo da potência demandada pelo veículo, potência fornecida pelas baterias e pelo MCI.

Por sua vez, o gráfico da figura 34 apresenta a energia que foi disponibilizada por cada fonte energética durante esta simulação. O motor à diesel foi pouco acionado, enquanto que as baterias receberam quase 2,5MJ.

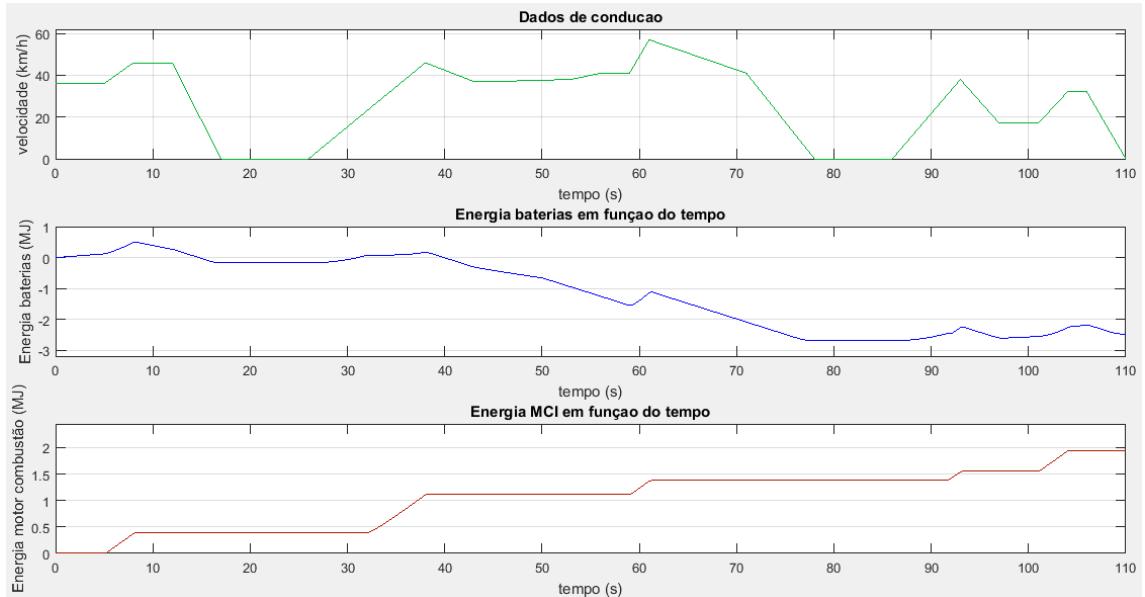


Figura 34: Energia consumida em função do tempo das duas fontes energéticas.

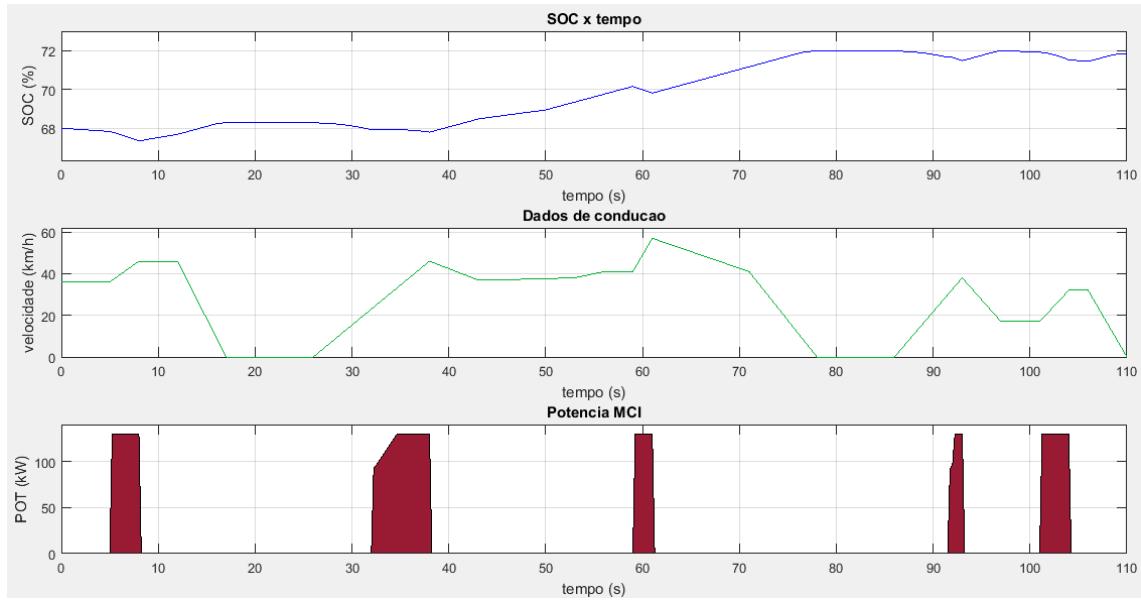


Figura 35: Estado de carga das baterias, velocidade do veículo e potência fornecida pelo MCI.

Os gráficos acima, da figura 35, mostram como o motor à combustão é pouco acionado durante o trajeto de descida. Além disso, pode-se notar como o estado de carga das baterias aumentou consideravelmente por conta da grande quantidade de energia que pode ser recuperada da frenagem nesta situação.

5. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Visando a compreender como diferentes parâmetros influenciam no consumo energético do modelo em questão, uma série de simulações foi realizada. Os parâmetros escolhidos para esta análise são a massa aparente do veículo, o coeficiente de arrasto e a faixa de potência que se deseja trabalhar o motor à combustão.

Para cada conjunto de parâmetros, foram simulados os três casos da seção 4 para se determinar a soma da energia consumida para realizar os trajetos. Os resultados estão listados na tabela 5.1 abaixo. A coluna da direita indica tanto a energia fornecida pelo motor à combustão quanto o saldo de energia que é liberado pelas baterias.

Tabela 5.1: Parâmetros utilizados nas simulações e respectivas energias consumidas.

Descrição	Massa aparente (kg)	Cd	Faixa de Pot. Do MCI (kW)	Energia fornecida (kWh)
Simulação original	16000	0,8	90 a 130	MCI: 6,07 BAT: 0,42
Acréscimo de massa	17500	0,8	90 a 130	MCI: 6,54 BAT: 0,68
Decréscimo de massa	14500	0,8	90 a 130	MCI: 5,78 BAT: 0,21
Diminuindo arrasto	16000	0,65	90 a 130	MCI: 6,05 BAT: 0,33
Acrescentando arrasto	16000	0,95	90 a 130	MCI: 6,10 BAT: 0,50
Alterando operação MCI	16000	0,8	130 a 170	MCI: 9,72 BAT: -0,62

Do ponto de vista da variação de massa do veículo, pode-se observar que houve variação considerável no consumo de energia tanto por parte do MCI quanto pelas baterias. Portanto a massa do veículo durante as viagens é um fator de grande influência para o consumo energético do veículo, principalmente por conta da parcela de aceleração nas forças que atuam contra o movimento.

Em seguida, foi feita uma análise sobre as forças dissipativas. Como já mencionado anteriormente, a força de rolagem nos pneus representa uma parcela quase negligenciável no modelo. A força a ser analisada foi então o arrasto aerodinâmico. No

entanto, a variação do coeficiente de arrasto pouco afetou o consumo energético do motor térmico, ou seja, pouca mudança do ponto de vista de queima de combustível.

O terceiro parâmetro está ligado à faixa de potências ideal do MCI. Tal variável está diretamente ligada à estratégia de gestão de potência e o dimensionamento dos componentes do veículo. Pode-se notar que o modelo é muito sensível a esta mudança pois exige que o MCI opere com potências mais altas, tornando o consumo de combustível muito mais elevado. Além disso, como as baterias passaram a trabalhar menos nas altas potências, a energia de saída nestes componentes diminuiu até um ponto em que a energia recuperada é maior que a consumida, o que explica a energia negativa das baterias.

6. CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS

O estudo das forças que atuam sobre um ônibus em movimento possibilitou a simulação e visualização de como cada parcela contribuiu para a demanda de energia do veículo no percurso.

As forças resistivas de arrasto aerodinâmico, por exemplo, apresentam menor influência durante trechos mais lentos. Pelo mesmo motivo, a parcela dependente da velocidade na força de rolamento dos pneus é quase desprezível.

A massa do ônibus torna a sua dinâmica um pouco diferente da encontrada em veículos mais leves. Como pode ser visto no gráfico da figura 17, a potência necessária nas rodas é muito maior no trecho de inclinação positiva e muito menor nas descidas, o que mostra a forte contribuição da força peso projetada na direção longitudinal em regiões inclinadas. A massa também é responsável por um aumento mais acentuado da potência demandada no começo das acelerações devido à grande inércia do ônibus.

Os gráficos 23 e 27 mostram que nos trechos onde a curva de velocidade decresce, a frenagem regenerativa permite que parte da energia seja recuperada e armazenada nas baterias. Isso seria uma vantagem em relação a um veículo convencional, o qual dissiparia esta energia nos freios na forma de calor.

Além disso, o banco de baterias nesta simulação mostrou-se capaz de suprir o movimento do ônibus por boa parte da simulação. O que contribui para um menor gasto de combustível e redução da poluição se comparado a um ônibus de propulsão puramente com motor diesel, o qual utilizaria esta fonte por todo o percurso.

Com relação à gestão de potência, a figura 36 ilustra bem como o banco de baterias supre o movimento nas potências mais baixas. Ao alcançar um valor de potência que se encaixa na faixa ideal do MCI, este passa a fornecer a energia ao sistema. Finalmente, o motor diesel chega ao seu valor máximo ideal e as baterias completam a potência que falta para movimentar o veículo.

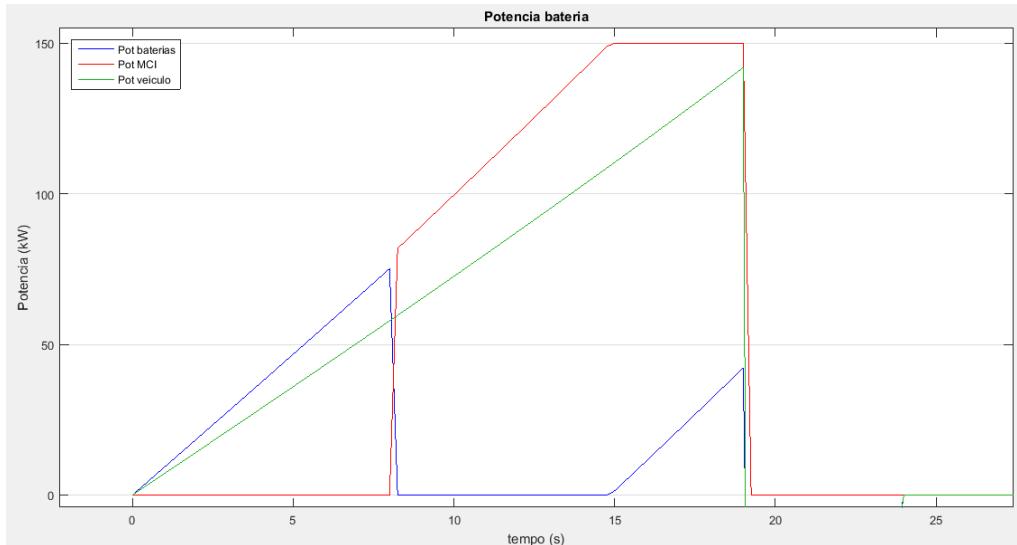


Figura 36: Detalhe do gráfico de potência.

Este gerenciamento das fontes de potência, que permite que o motor à combustão seja acionado em torno de seu máximo rendimento, aliado ao fato da possibilidade de armazenamento e recuperação de energia das baterias, se mostram um ponto forte da propulsão híbrida frente ao ônibus convencional.

Outro ponto a ser destacado, é que neste modelo as baterias são recarregadas ou por frenagem regenerativa ou recebendo a energia excedente do MCI. Desta forma, não haveria necessidade de deixar o veículo estacionado e ligado à rede elétrica para recarga das baterias.

Algumas simulações foram em seguida realizadas unindo os três trajetos da seção 4 para se analisar um período mais longo, com uma parte plana, uma subida e uma descida. Somando as energias consumidas, o gasto energético do MCI foi de aproximadamente 21,9MJ e das baterias foi de 11,9MJ, sendo que cerca de 10,4MJ foram recuperados por frenagem regenerativa.

Outra simulação foi feita partindo-se de um SOC inicial mais baixo, a fim de se observar como o ônibus trabalha com um estado de carga mais baixo. A figura 37, retirada do resultado desta simulação, ilustra que ao passar do SOC mínimo de 60%, o motor térmico é acionado para fazer a recarga das baterias até um SOC de 75%, exatamente como se esperava da estratégia de gestão de potência. Nesta situação, o MCI forneceu cerca de 38,6MJ, valor mais alto pois o componente foi responsável por movimentar o veículo por mais tempo e ainda recarregar o banco de baterias.

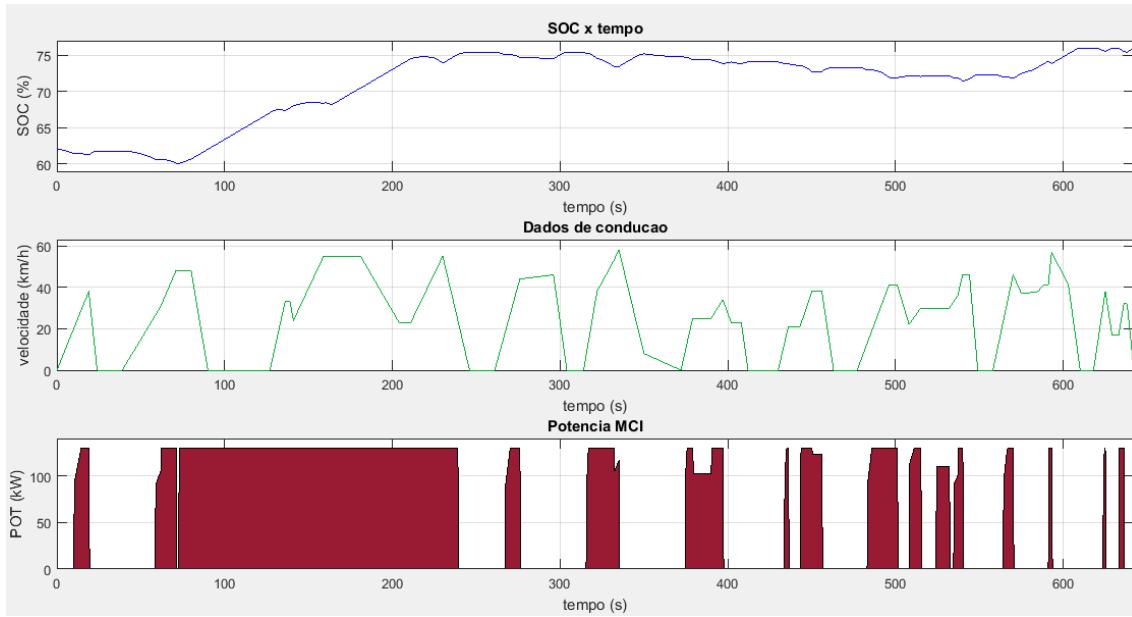


Figura 37: Situação onde o MCI foi acionado por um período mais longo para recarga das baterias.

Impondo um SOC inicial de 75% e repetindo-se os testes, o ônibus leva 11 ciclos até encontrar uma situação semelhante ao apresentado na figura 37, onde o SOC volta a ser recarregado até 75%. A soma da energia consumida nos 11 ciclos pelo MCI foi de aproximadamente 257,6MJ ou 71,57kWh, percorrendo cerca de 46,4km.

De acordo com os dados da ficha técnica do motor (figura 15), o consumo de combustível para atender esta demanda é igual a 14,3kg de diesel, ou seja, 16,76 litros. Portanto uma eficiência de 0,36 litros de combustível queimado por quilômetro rodado. Para efeito de comparação, os estudos conduzidos por D'Agosto et al. (2016) demonstraram um coeficiente de consumo de 0,402 L/km em ônibus de trajeto urbano. Portanto o modelo híbrido na simulação alcançou uma redução de consumo de cerca de 10,45% em relação a um modelo convencional.

A redução da energia fornecida pelo MCI está diretamente ligada a uma redução no consumo de combustível, bem como a diminuição da emissão de poluentes na atmosfera.

No entanto, como observado na análise de sensibilidade da seção 5, o consumo energético pode variar consideravelmente por conta da variação de massa e estratégia de gestão de potência. As variações efetuadas de massa em 1500kg poderiam corresponder, por exemplo, a subida ou descida de 20 passageiros, pesando 75kg cada, entre diferentes

horários e trechos do itinerário. Já a estratégia pode ser otimizada, implementando-se controladores ou condições mais refinadas de gestão de energia.

Na publicação de Hallmark et al. (2012), foram listados alguns casos de ônibus híbridos testados tanto por simulação em laboratório quanto em campo de prova. Os resultados apresentam uma redução de consumo de combustível entre 30 a 40% em bancada e 28% em pista de teste. No entanto estes testes não podem replicar com exatidão a aplicação nas ruas. Os autores mencionam que a redução do consumo em ônibus já em operação é de apenas 10 a 12%.

Se por um lado existe uma redução dos custos com combustível e manutenção dos componentes do motor à diesel, do outro lado surge a necessidade de um investimento inicial alto e manutenção das baterias e motor elétrico. Outro ponto a ser levantado, é que o ônibus híbrido é mais pesado do que um ônibus convencional, movido à diesel, por conta das baterias. Modelos de bateria, como os adotados por Pereira (2007), possuem massa de 5,6kg. Foram consideradas 200 unidades para formar o banco de baterias, portanto um aumento de cerca de 1120kg na massa do modelo de ônibus utilizado na simulação.

Como apontado por Liu (2012), um dos pontos mais críticos no projeto de um veículo híbrido é a evolução da tecnologia das baterias. O banco de baterias contribui para um considerável aumento de peso nos veículos elétricos e híbridos, por isso o desenvolvimento destes componentes ou de tecnologia de ponta como super-capacitores pode ser fator determinante na posição destes veículos no mercado automotivo.

Outro ponto destacado é que os custos dos veículos híbridos diminuiriam caso fosse desenvolvida uma produção em massa, a qual dependeria de toda uma evolução nas linhas de fabricação tanto de componentes do motor térmico quanto para o motor elétrico. A própria concorrência com veículos puramente elétricos entraria em questão, uma vez que a evolução do sistema elétrico poderia aos poucos se tornar mais viável do que a produção e utilização de dois sistemas de propulsão.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andersson, C. **Observations on Electric Hybrid Bus Design.** Lund, 2001. Licentiate thesis (Department of Industrial Electrical Engineering and Automation). Lund University.
- Baran, R. **A Introdução de Veículos Elétricos no Brasil: Avaliação do Impacto no Consumo de Gasolina e Eletricidade.** Rio de Janeiro, 2012. XIV, 124p. Tese (doutorado) – UFRJ, COPPE.
- Biomass Energy Databook. **Lower and Higher Heating Values of Gas, Liquid and Solid Fuels.** Disponível em:
<https://www.researchgate.net/file.PostFileLoader.html?id=54c39decd039b15c178b45ac&assetKey=AS%3A273679991148558%401442261803109>. Acesso em maio de 2017.
- Brunetti, F. **Motores de Combustão Interna: volume 1.** São Paulo: Blucher, 2012.
- D'Agosto, M. A. et al. **Comparativo de consumo de combustível entre ônibus equipados com aparelhos de ar condicionado e ônibus convencionais.** Rio de Janeiro, 2016. Relatório de estudo realizado para a COPPE/UFRJ em parceira com a Fundação COPPETEC e FETRANSPOR.
- Ferreira, A. A. **Sistema supervisório de gestão de múltiplas fontes de suprimento para aplicações em veículos elétricos.** Campinas, 2007. Tese (doutorado). Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação da Universidade Estadual de Campinas.
- Hallmark, S.L. et al. **Assessing the Costs for Hybrid versus Regular Transit Buses.** Iowa Energy Center, 2012. Disponível em:
<http://www.intrans.iastate.edu/publications>. Acesso em Outubro de 2017.
- Imbasciati, H. **Estudo descritivo dos sistemas, subsistemas e componentes de veículos elétricos e híbridos.** São Caetano do Sul, 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (engenharia automotiva). Instituto Mauá de Tecnologia.
- Khanipour A., Ebrahimi K. M., Seale W. J. **Conventional Design and Simulation of na Urban Hybrid Bus.** World Academy of Science, Engineering and Technology, 2007.

Disponível em: scholar.waset.org/1999.8/10261. Acesso em Maio de 2017.

- Liu, W. **Hybrid Electric Vehicle System Modeling and Control**, second edition. John Wiley & Sons Ltd., 2017.
- Liu, W. **Introduction to hybrid vehicle system modeling & control**. John Wiley & sons Ltd., 2013.
- LOPES J. **Estratégias de gerenciamento de consumo de potência em ônibus de transporte urbano elétrico híbrido série**. São Carlos, 2008. 108p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos – USP.
- Mi, C et al. **Hybrid Electric Vehicles: Principles and Applications with Practical Perspectives**, first edition. John Wiley & Sons, Ltd., 2011.
- Mercedes-Benz. Ficha técnica 1721. Disponível em: <https://www.mercedes-benz.com.br/resources/files/documentos/onibus/onibus-urbano/dados-tecnicos/dados-tecnicos-of-1721.pdf>. Acesso em outubro de 2017.
- Ministério do Meio Ambiente. **1º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2011.
- Oak Ridge Natinal Laboratory. Evaluation of 2004 Toyota Prius Hybrid Electric Drive System. 2006.
Disponível em: <http://www.osti.gov/bridge/servlets/purl/890029-WIfqPO/890029.PDF>. Acesso em Maio de 2017.
- Pereira, A. **Sistema de Tração de um Ônibus Elétrico Híbrido com Pilhas a Combustível e Baterias**. Rio de Janeiro, 2007 XI, 107 p. Dissertação (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Elétrica). UFRJ, COPPE.
- Prefeitura USP - Campus Capital. **Transporte**. Disponível em: http://www.puspc.usp.br/?page_id=89. Acesso em Setembro de 2016.
- Revoredo, T. C. **Modelagem e gerenciamento de potência de um veículo elétrico híbrido de célula a combustível**. Rio de Janeiro. 2007 XVI, 133 p. Dissertação (COPPE/UFRJ,M.Sc., Engenharia Elétrica, 2007). UFRJ, COPPE.
- Universidade de São Paulo. **Itinerários das linhas 8022 e 8012**. Disponível em: <https://www.ime.usp.br/images/arquivos/imagens/itinerarios.pdf>. Acesso em Outubro de 2016.

- Volvo Buses. **Volvo Híbrido.** Disponível em:

<http://www.volvobuses.com/SiteCollectionDocuments/VBC/Brasil%20-%20ILF/Downloads/Brochura%20%C3%94nibus%20H%C3%ADbrido.pdf>.

Acesso em Outubro de 2016.

- Wikipedia, The Free Encyclopedia. **Energy Density.** Disponível em: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Energy_density&oldid=743447189.

Acesso em Outubro de 2016.

- Wrocław University of Science and Technology. **Hybrid electrical vehicles.** Disponível em: http://www.ae.pwr.wroc.pl/files/20110606092353_HEV. Acesso em Outubro de 2016.