

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CAMPUS CURITIBA
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ANDERSON WESLLEY DA SILVA ZAMPOLI
BRUNO MIGUEL ABIB
FELIPE MOREIRA DAQUILA

**ANÁLISE DO CONSUMO DE ENERGIA DE UM ÔNIBUS ELÉTRICO HÍBRIDO NA
CIDADE DE CURITIBA NA LINHA 203 DA URBS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA
2015

ANDERSON WESLLEY DA SILVA ZAMPOLI
BRUNO MIGUEL ABIB
FELIPE MOREIRA DAQUILA

**ANÁLISE DO CONSUMO DE ENERGIA DE UM ÔNIBUS ELÉTRICO HÍBRIDO NA
CIDADE DE CURITIBA NA LINHA 203 DA URBS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado a disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso Superior de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Profa. Dra. Keiko Veronica Ono Fonseca, D.E.E.

Coorientador: Prof. Dr. Marcelo de Oliveira Rosa

CURITIBA

2015

Dedicamos este trabalho às pessoas de grande importância em nossas vidas: Roseli Zampoli, Karina Daquila e Deise Faga Abib pelos exemplos de vida.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradecemos a Deus por nos dar sabedoria para construirmos, oportunidade de vivermos e força para combatermos as adversidades nessa etapa da vida.

Aos nossos sábios pais, primeiros professores, que desde o início desenvolveram o seu amor incondicional e a sua dedicação por nós, mesmo em momentos de dificuldades nos encorajando, buscando sempre o nosso melhor. Se no futuro próximo seremos engenheiros, devemos isso a eles.

À nossa orientadora, Professora Dra. Keiko Veronica Ono Fonseca, pela sua orientação segura, objetiva, pelo tempo dedicado e pela paciência e sabedoria com que nos conduziu no decorrer deste trabalho.

Agradecemos ao nosso Coorientador, Professor Dr. Marcelo de Oliveira Rosa, pela sua orientação, paciência e dedicação colocada neste trabalho.

Para Déborah Perrotta e Marco Feller, um especial agradecimento, por propiciarem suas ajudas espontâneas e necessárias, que a generosidade e cortesia de vocês sejam alimentadas e reconhecidas sempre.

Aos nossos familiares e amigos pela paciência e compreensão nos momentos em que estivemos ausentes.

À UTFPR pela oportunidade de tornarmos Engenheiros Eletricistas.

*“Whatever you are, be a good one”
– Abraham Lincoln*

RESUMO

ZAMPOLI, Anderson W. S.; ABIB, Bruno M.; DAQUILA, Felipe M. **Análise Do Consumo De Energia De Um Ônibus Elétrico Híbrido Na Cidade De Curitiba Na Linha 203 Da URBS**. 2015. 71 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso Superior de Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

Este trabalho apresenta uma análise do consumo de energia de um ônibus elétrico híbrido na cidade de Curitiba na linha 203 da URBS. Foi calculado o consumo de energia e comparado com ônibus de tecnologias já existentes no mercado como o Elétrico e o à Combustão. Foram estudados os ônibus PHEV (suas diferentes configurações e funcionamento) e o BRT (sua implantação e característica) na linha 203 da URBS, Santa Cândida - Capão Raso. Estudos sobre tecnologias de veículos elétricos e do modelo de operação do sistema de transporte público permitiram estabelecer um modelo do ciclo de condução. Dados reais da operação da linha e de um ônibus foram aplicados para calcular a demanda de energia associada à operação e ao tipo de ônibus através de um modelo. Assim, comparou-se o resultado encontrado de energia total da rota utilizando parâmetros de eficiência dos motores de um ônibus totalmente elétrico, um híbrido e um à combustão. No geral, os resultados deste estudo de caso indicam que um veículo híbrido plug-in apresenta maior potencial benéfico de consumo de energia do que um à combustão e possui maior flexibilidade de implantação do que um totalmente elétrico.

Palavras-Chaves: Ônibus Elétrico Híbrido, Elétrico, Combustão, PHEV, BRT, Consumo de Energia, Ciclo de Condução.

ABSTRACT

ZAMPOLI, Wesley A. S.; ABIB, Bruno M.; DAQUILA, Felipe M. **Analysis Power Consumption of a Hybrid Electric Bus In Curitiba City on Line 203 from URBS.** 2015. 71 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso Superior de Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

This monograph presents an analysis of power hybrid electric bus consumption in the city of Curitiba on line 203 of URBS. It was calculated the energy consumption and compared to existing bus technologies in the market as the electric and the combustion. Buses PHEV were studied (their different configurations and operation) and BRT (its implementation and feature) on line 203 of the URBS, Santa Candida – Capão Raso. Studies on electric vehicle technologies and the public transport system operation model allowed to establish a model of the driving cycle. Actual data of the line operation and of a bus were applied to calculate the energy demand associated with the operation and the type of bus through a model. Therefore, it was compared the results found for the total route energy using engines of efficiency parameters of a completely electric bus, a hybrid and combustion. In general, the results of this study indicate that a plug-in hybrid vehicle has higher potential beneficial power consumption than a combustion vehicle, and it has greater flexibility implantation than a fully electric.

Keywords: Hybrid Electric Bus, Electric, Combustion, PHEV, BRT, Power Consumption, Driving Cycle.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Gráfico de funcionamento de um veículo híbrido.	20
Figura 2 – Transmissão série.	23
Figura 3 – Transmissão paralela.	24
Figura 4 – Transmissão Série/Paralelo.	25
Figura 5 – Evolução da Rede integrada de transporte de Curitiba.	29
Figura 6 – Via Compartilhada.	31
Figura 7 – Rede integrada de transporte de Curitiba.	32
Figura 8 – Composição da frota de ônibus de Curitiba	33
Figura 9 – Caminho da rota 203 terminal Santa Cândida/Terminal Capão Raso	37
Figura 10 – Perfil de elevação da rota 203 Santa Candida/Terminal Capão Raso	38
Figura 11 – Forças em superfícies inclinadas.....	40
Figura 12 – Gráfico <i>Driving Cycle</i>	46
Figura 13 – Característica topográfica da rota 203.	47
Figura 14 – Ciclo de condução	50
Figura 15 – Torque do ciclo de condução.....	51
Figura 16 – Energia do Ciclo de condução.....	52
Figura 17 – Potência instantânea.....	54
Figura 18 – Trajeto Terminal Sta Cândida, S1 e ET Herculano.....	56
Figura 19 – Energia consumida na rota 203 da URBS.	57
Figura 20 – Energia consumida na Rota 203.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Cidades que utilizam o sistema BRT.....	30
Tabela 2 – Característica do veículo e dados literários.....	36
Tabela 3 – Tempos <i>STOP-AND-GO</i>	44
Tabela 4 – Característica da Relação de Transmissão.....	48
Tabela 5 – Variáveis de definição de Perrota et al. (2012)	48

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

BRT – *Bus Rapid Transit*

CV – Cavalo Vapor

IPPUC – Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Curitiba

PHEV – *Plug in Hybrid Electric Vehicle*

PROCONVE – Programa de Controle de Poluição do ar por Veículos automotores

RIT – Rede Integrada de Transporte

URBS – Urbanização de Curitiba S.A.

VE – Veículo Elétrico

VC – Veículo à Combustão

VHE – Veículo Híbrido Elétrico

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. Delimitação do Tema	13
1.2. Problemas e Premissas	15
1.3. Objetivos	16
1.3.1. Objetivo Geral	16
1.3.2. Objetivos Específicos	16
1.4. Justificativa	16
1.5. Procedimentos Metodológicos	17
1.6. Estrutura do Trabalho	18
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1. Introdução aos PHEVs e HEVs	19
2.1.1. Sistema de Transmissão (<i>Drive trains</i>)	21
2.1.1.1. Transmissão Série	22
2.1.1.2. Transmissão Paralela	23
2.1.1.3. Transmissão Série / Paralela	24
2.1.1.4. Comparação entre as configurações	25
2.2. <i>Bus Rapid Transit</i> (BRT)	26
2.2.1. A evolução do BRT	27
2.2.2. Transporte público de Curitiba	30
2.3. Pesquisas relacionadas ao consumo de energia por veículos de transporte público	34
3. MÉTODO DE PESQUISA	35
3.1. Características dos dados	35
3.1.1. Características do veículo	36
3.1.2. Características da rota	36
3.1.3. Características topográficas	37
3.2. Equacionamento do Modelo	38
4. SIMULAÇÃO E RESULTADOS	43
4.1. Desenvolvimento do Simulador	43
4.1.1. Coletados valores de tempo em ciclos de <i>stop-and-go</i>	43
4.1.2. Ciclo de Condução (<i>Driving Cycle</i>)	46

4.1.3. Caixa de transmissão (<i>Gear Ratio</i>).....	48
4.2. Simulação	49
4.2.1 Resultados de um ciclo de condução	49
4.2.2 Simulação da Linha 203 da URBS.....	53
4.3. Resultados	55
4.3.1. Ciclo de condução entre o trajeto T. Capão Raso, S1 e ET. Herculano	55
4.3.2. Energia Consumida na Linha	56
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	61
5.1. Sugestões Para Trabalhos Futuros.....	63
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64
ANEXO 01 – Fluxograma Processual Do Trabalho.....	67
ANEXO 02 – Fluxograma da relação da troca de marchas.....	68
ANEXO 03 – Pontos de Paradas Rota 203 URBS.....	69
ANEXO 04 – Planilha de Cálculos Parte 01	70
ANEXO 05 – Planilha de Cálculos Parte 02	71

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho apresenta uma análise do consumo de energia de um ônibus elétrico híbrido (PHEV) em uma rota da cidade de Curitiba. A análise se fez a partir de um estudo de uma única linha, a linha 203 da URBS Santa Cândida – Capão Raso.

O objetivo foi o de calcular a energia total gasta no percurso, em termos de energia despendida para sua movimentação, comparando-a com os demais tipos de ônibus existente no mercado como o elétrico e à combustão.

Este capítulo apresenta a delimitação do tema, um histórico da evolução de transporte público em Curitiba e argumentos sobre a implantação de ônibus elétrico híbrido na frota da cidade.

1.1. Delimitação do Tema

A rede de transporte público de Curitiba é considerada modelo de integração entre planejamento urbano e políticas de transporte de massa e de organização de trânsito. Atualmente, é administrada pela Urbanização de Curitiba S.A. (URBS) que possui como missão melhorar a vida urbana e ser referência em soluções inovadoras e excelência na gestão da mobilidade urbana.

A URBS iniciou suas atividades em 1963 com o propósito de desenvolver obras de infraestrutura, programas de equipamentos urbanos e atividades relacionadas ao desenvolvimento urbano da cidade (pavimentação, iluminação, saneamento e paisagismo). Somente em 1986, passou a gerenciar o Sistema de Transporte Coletivo de Curitiba (Urbanização de Curitiba S.A., 2014).

O aumento da poluição, devido à circulação de ônibus movidos a diesel, sugere que novas ideias sejam discutidas a fim de atender a demanda de pessoas ao mesmo tempo em que propõe projetos que diminuem a emissão de poluentes. Entre algumas das soluções, possíveis benefícios e desvantagens estão:

- Metrô subterrâneo
 - Solução em longo prazo devido à sua complexa construção;
 - Ganho significativo em tempo de viagem para os passageiros e emissão de poluentes; transporta grande número de pessoas.
- Bonde elétrico
 - Possui rotas fixas e está sujeita a bloqueio do trajeto;
 - Sua construção é menos complexa por estar na superfície;
- Norma EURO V (EUR-Lex, 2014)
 - A grande frota de veículos pesados dificulta a substituição dos motores que não atendem à norma;
 - Redução na emissão de óxido de nitrogênio em até 90% (MARTINS; PIERRE, 2015).
- Ônibus do tipo *Plug in Hybrid Electric Vehicle* (PHEV)
 - Podem reduzir significativamente o consumo de combustível e a emissão de poluentes, além de ser menos complexa a sua implantação.
 - Tecnologia de baterias muito cara o que aumenta o custo dos veículos; Falta de estudos para melhor implantação.

A partir de Janeiro de 2012, iniciou-se a primeira fase de um programa do Ministério do Meio Ambiente chamado PROCONVE P7 (GERULAITES, 2012), na tentativa de normatizar os veículos pesados, movidos a diesel, que se utiliza das normativas EURO 5, padrão Europeu de emissões (EUR-Lex, 2014).

Nesta primeira fase, em Janeiro de 2013, iniciou-se a comercialização de um combustível com menor percentual de enxofre. Na tentativa de diminuir ainda mais a emissão de gases poluentes, a prefeitura de Curitiba apresentou, em 2009, um ônibus movido a biodiesel 100% vegetal proporcionando a redução de até 30% na emissão de monóxido de carbono (URBS SUSTENTABILIDADE, 2014).

A tentativa de reduzir a emissão de gases poluentes continua com a proposta de implantar o PHEV. Este veículo é equipado com bateria de grande capacidade de armazenamento e com acesso externo, para que possa ser carregada de maneira eficiente e rápida (SUSTAINABLE ENERGY IRELAND, 2007). Além do mais, para que

a energia armazenada na bateria seja utilizada de maneira eficiente, a implantação do PHEV requer um estudo prévio do modelo de operação do veículo: a rota, o consumo de energia, melhor localização de centros de recarga, por exemplo. Vale ressaltar que ferramentas computacionais podem aperfeiçoar tal estudo e, se bem utilizadas, podem fornecer dados sobre o consumo de energia ao longo da trajetória do veículo.

1.2. Problemas e Premissas

De acordo com o cenário do transporte público no Brasil, o município de Curitiba possui uma Lei Municipal de Mudanças Climáticas (BRASIL, Lei 17133 de 25 de Abril de 2012) que prevê a substituição de ônibus a diesel por veículos verdes. Nesse contexto, o estudo do ônibus elétrico híbrido (HEV) é de grande importância.

Os ônibus HEV combinam motor a diesel, um motor elétrico para a tração e um banco de baterias para armazenamento de energia elétrica. Com o ônibus híbrido a redução na emissão de poluentes chega a 90% (SBCTRANS, 2013). Devido a esses ônibus também serem tracionados com energia elétrica, um dos quesitos de maior grau de relevância é saber quanto de energia elétrica o banco de baterias deverá armazenar para conseguir realizar o deslocamento do ônibus de um ponto a outro sem a necessidade de reabastecimento. As características mecânicas ligadas às perdas no deslocamento do veículo como resistência do ar, atritos e inerciais são as maiores responsáveis pelo consumo de energia e combustível de um veículo, e são estes dados que precisam ser coletados para o cálculo da quantidade de energia necessária. Outras características como resistência elétrica e atrito interno dos motores estão diretamente relacionadas ao rendimento dos motores.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo Geral

Analisar o consumo de energia de um ônibus elétrico híbrido na cidade de Curitiba na linha 203 da URBS.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Desenvolver um modelo para analisar o consumo de energia dos ônibus com motores elétrico, híbrido e à combustão.
- Analisar os benefícios da implantação de um elétrico híbrido no sistema de transporte público na cidade de Curitiba através do consumo de energia despendida para sua movimentação, e compará-lo com o ônibus elétrico e à combustão.

1.4. Justificativa

Grandes cidades, incentivadas pelas leis ambientais de emissão de gases, veem nos veículos elétricos, híbridos e no transporte coletivo a resposta para um ambiente menos poluído e melhor qualidade de vida. Um novo patamar de consumo de energia deve ser estudado visando à maior eficiência destes novos veículos.

Conforme dados obtidos pela Volvo, estima-se que entre 30% e 40% dos poluentes emitidos pelos veículos à combustão se dá quando ele está parado e durante sua partida com o aumento da rotação. Entre os poluentes reduzidos estão materiais particulados, Óxido de Nitrogênio e Gás Carbônico (BAZANI, 2012).

Segundo Perrotta et al. (2014) mesmo com o grande desenvolvimento computacional nos últimos anos, ainda é pequeno o número de ferramentas e métodos para avaliar com precisão o desempenho dos ônibus elétricos em ambientes urbanos, por exemplo, ferramentas que permitam a correta representação das rotas a serem analisadas.

1.5. Procedimentos Metodológicos

Primeiramente, foi realizado o levantamento e revisão bibliográfica encontrada em artigos técnicos dedicados ao mesmo tema de estudo deste trabalho. Da literatura foi escolhido um modelo a ser usado para o cálculo da demanda de energia do ônibus. Também, foi escolhido como modelo um ônibus HEV e a linha 203 da URBS para o estudo de caso. Após essa etapa, foi iniciada a coleta de dados da rota, do perfil de elevação e de característica de fabricação do veículo, junto à URBS, Google Earth e VOLVO, respectivamente, necessários para obter os resultados desejados a partir desse modelo.

O conhecimento matemático adquirido no curso de engenharia, especificamente em física, máquinas elétricas e computação, forneceu a base para o início da construção deste trabalho.

Com o equacionamento matemático já desenvolvido foi estabelecido um modelo no *software* Excel®, para o cálculo do consumo de energia do veículo em um ciclo de condução.

O consumo do ciclo calculado foi aplicado em todo o percurso da rota estudada (Cálculo baseado no ciclo de condução obtido na etapa anterior). Comparações de resultados em projetos similares foram realizadas e analisadas.

1.6. Estrutura do Trabalho

O trabalho é estruturado em cinco capítulos, sendo eles:

CAPÍTULO 1 – Introdução: Apresentação da proposta, definição do tema, definição dos objetivos e motivação para a realização do trabalho.

CAPÍTULO 2 – Fundamentação teórica: Revisão bibliográfica e fundamentação teórica sobre tema. Abordagem de conceitos gerais sobre o HEV, o *Bus Rapid Transit* (BRT) e os estudos relacionados ao consumo de energia por veículos de transporte público.

CAPÍTULO 3 – Método de Pesquisa: Detalhamento do desenvolvimento das Coletas de dados analisadas e apresentação das equações utilizadas para o estudo.

CAPÍTULO 4 – Resultado e Análise: Coleta de dados *STOP-AND-GO*, aplicação do modelo, apresentação dos resultados obtidos através da programação do simulador realizada e resultados finais.

CAPÍTULO 5 – Conclusões, considerações finais sobre os resultados obtidos, e sugestões para trabalhos futuros.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Introdução aos PHEVs e HEVs

Os veículos elétricos híbridos estão entre um seleto grupo de tecnologias de veículos que podem aumentar significativamente a economia de combustível, além de reduzir a emissão de gases (*UNION OF CONCERNED SCIENTISTS*, 2013).

O elétrico híbrido (PHEV) é diferente do híbrido diesel-elétrico (HEV); a principal diferença está na fonte de energia: o ônibus híbrido gera a própria energia por meio do motor e da recuperação de energia cinética nas frenagens, enquanto o elétrico híbrido é um *plug-in*, que pode ser carregado por uma rede elétrica suspensa (REIS, 2015).

O *Plug in Hybrid Electric Vehicle* (PHEV) nada mais é do que um veículo elétrico híbrido que permite o acesso às baterias fazendo com que o sistema possa ser alimentado diretamente de uma tomada ou um sistema de distribuição. O Sistema *Plug-in* aumenta a autonomia do modo elétrico, enquanto reduz o consumo de combustível e a emissão de CO₂ em mais de 50% (U.S DEPARTMENT OF ENERGY, 2013).

O Veículo híbrido elétrico (HEV) é todo veículo que combina duas ou mais fontes de energia para executar movimento. De modo simplificado, é um veículo acionado por um motor elétrico, cuja energia é suprida por um gerador e/ou um banco de baterias instalado a bordo, e por um motor a combustão interna. A combinação permite que o motor elétrico e baterias ajudem o motor convencional a operar de forma mais eficiente, reduzindo o uso de combustível (ABVE, 2014).

Os HEVs em situações que exigem maior torque, o motor elétrico, que possui melhor eficiência nestas situações, consome a energia armazenada nas baterias enquanto o motor à combustão interna mantém melhor desempenho em casos de torque constante. Alguns híbridos podem recuperar energia cinética durante a frenagem, que normalmente é dissipada na forma de calor nos freios, gerando eletricidade. Este tipo de freio é muitas vezes chamado de "Frenagem Regenerativa". Conforme Figura 1 podemos observar o funcionamento de ambos os motores, elétrico e a combustão (PAREDES, 2014). Quando o veículo está parado ele não consome

energia. Durante a partida, o motor elétrico entra em funcionamento até atingir velocidade de cruzeiro. Depois de atingida a velocidade de melhor eficiência do motor a combustão, ele é acionado e, após o motor entrar no ponto de estabilização da velocidade de cruzeiro, o motor elétrico agora vira gerador, fornecendo energia à bateria. Supondo que houvesse uma subida ou uma elevada aceleração para compensar o aumento dessa energia, o motor elétrico novamente entra em funcionamento. Após uma frenagem, o motor a combustão é desativado e os freios regenerativos juntos com o gerador elétrico entram em funcionamento, gerando-se assim energia para a bateria, fechando o ciclo.

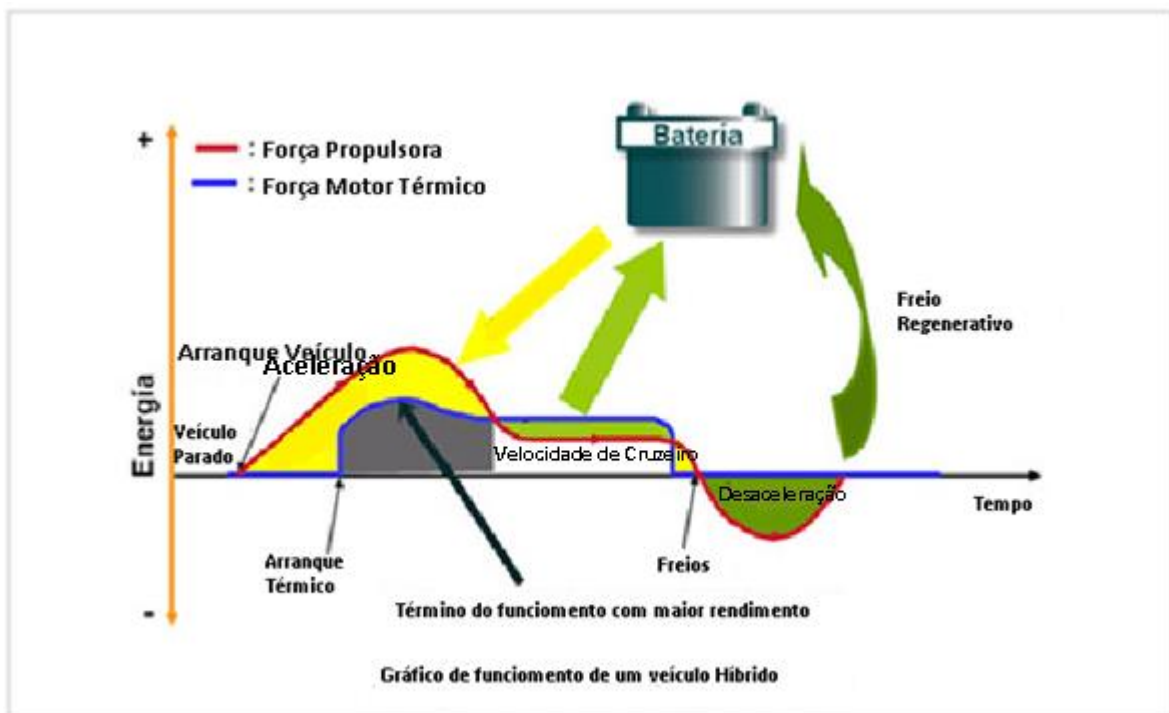


Figura 1 – Gráfico de funcionamento de um veículo híbrido.
Fonte: Paredes, 2014.

Vantagens de um veículo HEV:

- A tecnologia híbrida possibilitou tornar o consumo de combustível de cerca de 20% a 60% mais baixo do que nos veículos convencionais comparáveis.

- A eficiência do uso de combustível é maximizada, uma vez que os motores a combustão interna são fabricados considerando o melhor desempenho do veículo híbrido.
- Redução de emissão de gases nocivos ao meio ambiente e os seres vivos.
- Redução de ruídos prejudiciais a ambientes urbanos.

Desvantagens de um veículo HEV:

- Os veículos híbridos têm menor potência do que os veículos convencionais equivalentes. No entanto, o avanço desta tecnologia tem como objetivo reduzir esta lacuna e, por consequência, a velocidade máxima do veículo poderá se equiparar com veículos a combustão.
- Um maior peso do que um automóvel convencional (adição de motor elétrico e baterias), e, assim, um aumento da energia necessária para movê-lo. Porém, o peso do veículo pode ser reduzido utilizando carrocerias mais leves, como de alumínio, fibra de carbono ou fibra de vidro.
- Maior complexidade, o que torna difícil a manutenção de veículos e reparos.
- O investimento inicial é maior para adquirir um "híbrido" do que para adquirir um "convencional diesel" comparável. No entanto, pode-se ter um retorno financeiro em longo prazo, gastando menos energia.

2.1.1. Sistema de Transmissão (*Drive trains*)

O sistema de transmissão é composto pelos componentes que são responsáveis pela transferência de energia para as rodas motrizes do seu veículo. Com híbridos elétricos existem três possíveis configurações para o sistema de transmissão que faz ligação entre os dois motores: Transmissão Série, Transmissão Paralelo, e a Transmissão Série/Paralelo (*UNION OF CONCERNED SCIENTISTS, 2013*).

2.1.1.1. Transmissão Série

Esta é a configuração híbrida mais simples. Em uma transmissão série, o motor elétrico é o único meio de fornecer energia para suas rodas. O motor recebe energia a partir das baterias ou de um gerador acionado pelo motor a combustão. Um computador determina o quanto de potência vem da bateria ou o conjunto motor-gerador. Tanto o motor-gerador quanto a frenagem regenerativa recarregam a bateria. O motor a combustão geralmente é menor em uma transmissão série, pois ele só pode atender às demandas do gerador. A capacidade do banco de baterias é maior do que a dos híbridos paralelos, a fim de suprir as necessidades de energia de condução de pico restante. Esta maior demanda por armazenamento de energia, juntamente com o gerador, tornando híbridos em série mais caros do que os híbridos paralelos.

Enquanto o motor em um veículo convencional opera de forma ineficiente para satisfazer a maior demanda de energia em variações de torque, o híbrido em série possui melhor desempenho em tais condições. Isto acontece, pois o motor a combustão de um híbrido de série não está ligado às rodas, conforme Figura 02. Isso significa que o motor não está mais sujeito às grandes variações de energia normalmente exigidas nas paradas e partidas, e pode operar em uma faixa estreita de máxima eficiência de energia. Isto também elimina a necessidade de uma transmissão de várias velocidades e embreagens.

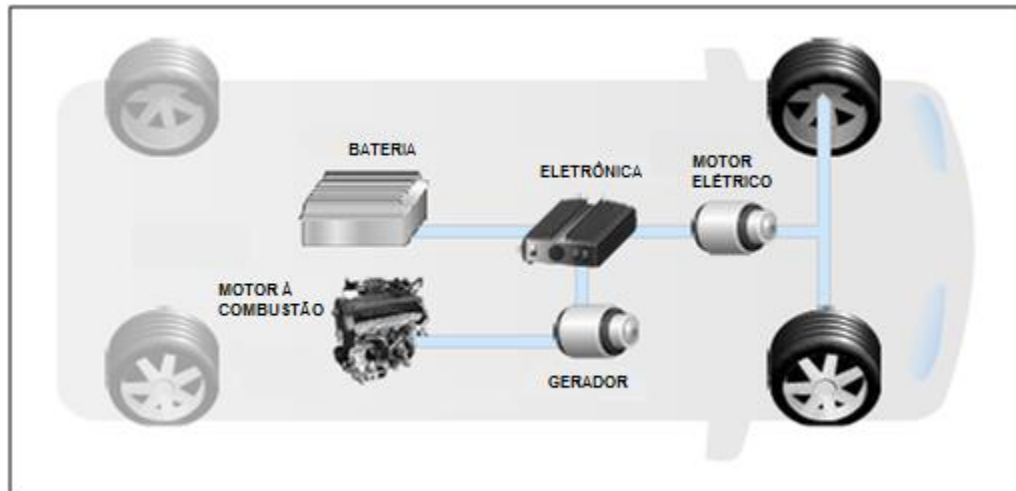


Figura 2 – Transmissão série.
Fonte: UNION OF CONCERNED SCIENTISTS, 2013.

2.1.1.2. Transmissão Paralela

Com um veículo elétrico híbrido paralelo, tanto o motor a combustão quanto o motor elétrico são acionados para acionar as rodas. A adição de controles de computador e uma transmissão permitem que esses componentes funcionem juntos. Híbridos paralelos dependem, sobretudo, de frenagem regenerativa e/ou outra forma de suprimento elétrico para carregar as baterias. No entanto, quando a demanda de energia é baixa, os híbridos paralelos também utilizam o motor como um gerador para recarregar as baterias, como um alternador em carros convencionais, conforme Figura 3, uma vez que o motor é conectado diretamente com as rodas nesta configuração, ele elimina a ineficiência da conversão de energia mecânica em elétrica, o que torna estes híbridos bastante eficientes em rodovias.

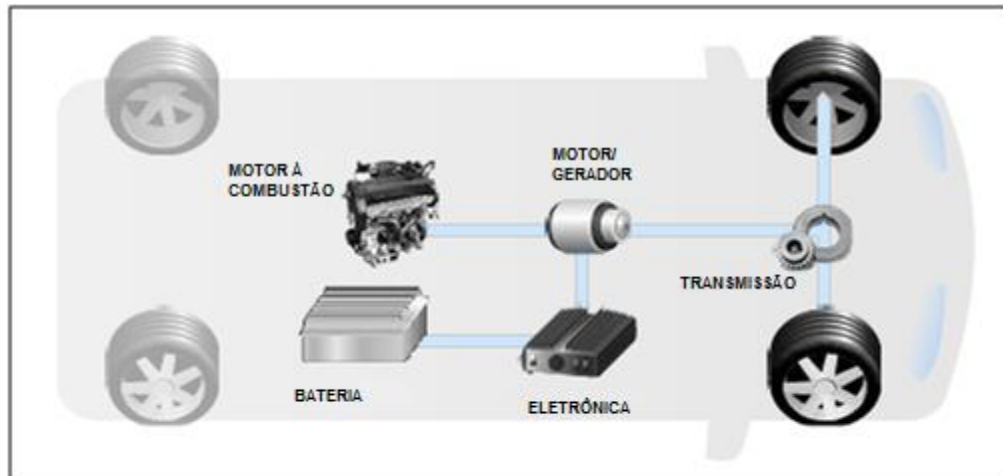


Figura 3 – Transmissão paralela.

Fonte: *UNION OF CONCERNED SCIENTISTS*, 2013.

2.1.1.3. Transmissão Série / Paralela

Esta transmissão mescla as vantagens e desvantagens das transmissões série e paralela. Ao combinar os dois modelos o motor a combustão pode conduzir as rodas diretamente (como no sistema de transmissão em paralelo) e ser efetivamente desligada das rodas de modo que apenas a potência do motor elétrico tracione (como no sistema de transmissão série). Como resultado desta dupla mecânica, o motor opera próximo da eficiência ótima com maior frequência. Em momentos de maior torque, acelerações e subidas, o sistema funciona com transmissão série, enquanto que em situações que exigem menos tração, velocidade de cruzeiro, onde o sistema de transmissão série é menos eficiente, o sistema assume a transmissão paralela. Este sistema incorre em custos mais elevados do que um híbrido paralelo puro, uma vez que precisam de um gerador e uma bateria maior, e uma melhor programação para controlar os dois sistemas, conforme Figura 4.

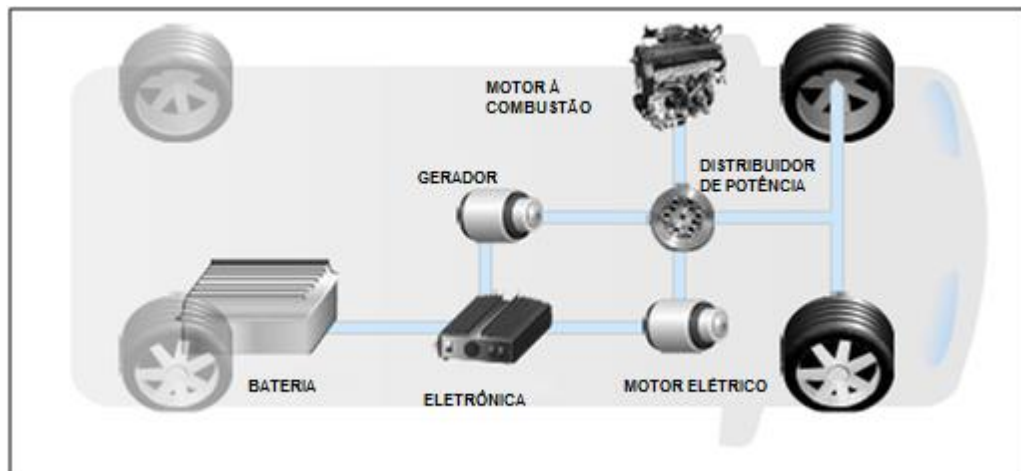


Figura 4 – Transmissão Série/Paralelo.

Fonte: UNION OF CONCERNED SCIENTISTS, 2013.

2.1.1.4. Comparação entre as configurações

Em termos de consumo e emissões, a configuração série é a mais adequada para situações que não requerem alta demanda de potência e as velocidades não sejam elevadas, por exemplo, num circuito urbano. A configuração paralela possui maior eficiência energética quando a potência média requerida pelo veículo e a sua velocidade são mais elevadas, ou seja, em circuitos extras urbanos. Quanto à configuração série/paralelo, ela consegue unir as vantagens das duas configurações acima descritas, podendo retirar partido dessa capacidade, contudo tem um grau de complexidade maior o que dificulta o controle (TAYLOR, 2001).

É possível concluir que a configuração em série apresenta um menor rendimento energético quando comparado com a configuração paralela. Contudo, é possível melhorar o rendimento na configuração em série, utilizando motores térmicos mais eficientes, melhor utilização da frenagem regenerativa, entre outros (XIN, 2007).

2.2. *Bus Rapid Transit* (BRT)

O transporte público é, sem dúvida, um meio de transporte essencial na vida dos cidadãos para que estes tenham fácil acesso as demais localidades e bairros da cidade. Quando esse transporte é de qualidade e realmente funciona este se torna um atrativo para que a população o utilize. Além do fato de que ele acaba sendo mais barato que um carro, por exemplo, devido aos impostos, taxas para estacionar, seguro e alto preço dos combustíveis.

Porém, existe um problema decorrente da utilização dos ônibus à combustão. Eles são altamente poluentes por conta das paradas e acelerações, e também da condução ineficiente dos motoristas. Uma solução é investir em novas tecnologias para redução da poluição.

Os sistemas BRTs também têm demonstrado potencial para reduzir as emissões de CO₂, uma vez que, com uma implantação bem planejada, é realizada uma otimização das rotas existentes. Um exemplo do impacto do BRT na mudança do clima é a operação do Metrobus (BRT da Cidade do México), que, com a inauguração de sua quarta linha, em 2012, está reduzindo 110.000 toneladas de CO₂ emitidas por ano, ao mesmo tempo em que melhora a mobilidade de 200 milhões de passageiros por ano. Este sistema BRT foi concebido e implantado para servir pelo menos 800 mil passageiros por dia (EMBARQ BRASIL, 2013).

Segundo Sebastiani (2014), o BRT foi criado para ser um dos mecanismos de baixo custo para as cidades desenvolverem rapidamente um sistema de transporte público que possa alcançar uma rede completa, bem como oferecer um serviço rápido e de alta qualidade. Ainda em seus primeiros anos de aplicação, o conceito BRT ofereceu o potencial para revolucionar a maneira de transporte urbano.

O BRT é um sistema de transporte que oferece uma rápida mobilidade aos seus passageiros. É confiável, eficiente e, além de ótima qualidade, possui bom custo-benefício. Esse tipo de sistema custará tipicamente 4 a 20 vezes menos do que um veículo elétrico sobre trilhos (espécie de metrô de superfície) ou bonde elétrico (trem) e

de 10 a 100 vezes menos do que um sistema de metrô convencional (WRIGHT E HOOK, 2007).

Na maioria dos BRT implantados com sucesso, as seguintes características estão presentes:

- Corredores dedicados para a circulação do transporte coletivo;
- Embarque e desembarque no mesmo nível dos veículos, tornando o processo mais rápido;
- Sistema de pré-pagamento de tarifa;
- Veículos de alta capacidade, modernos e com tecnologias mais limpas;
- Transferência entre rotas sem incidência de custo;
- Integração com outros modais de transporte;
- Centro de controle operacional;
- Priorização semafórica;
- Informação em tempo real ao usuário;
- Acessibilidade universal.

2.2.1. A evolução do BRT

Apesar de o BRT ter começado a funcionar de fato na cidade de Curitiba, o modelo que deu origem a ele surgiu em Chicago em 1939. Foi construída uma pista exclusiva para ônibus e, após isso, foi implantado em outras cidades dos Estados Unidos. No entanto o conceito não era obter um serviço de alta qualidade como o BRT, mas algo para substituir o serviço de bonde com a operação de um ônibus simples (SEBASTIANI, 2014).

Em 1972, foi feito o planejamento do sistema BRT para a cidade de Curitiba. Ele foi construído em 1973 e inaugurado no ano seguinte. Ainda não existiam as faixas exclusivas para ônibus, as chamadas “canaletas”. Sob a liderança do então prefeito

Jaime Lerner, a cidade começou um processo de desenvolvimento de corredores de vias de ônibus que emanam do centro da cidade (Urbanização de Curitiba S. A., 2015), conforme Figura 5.

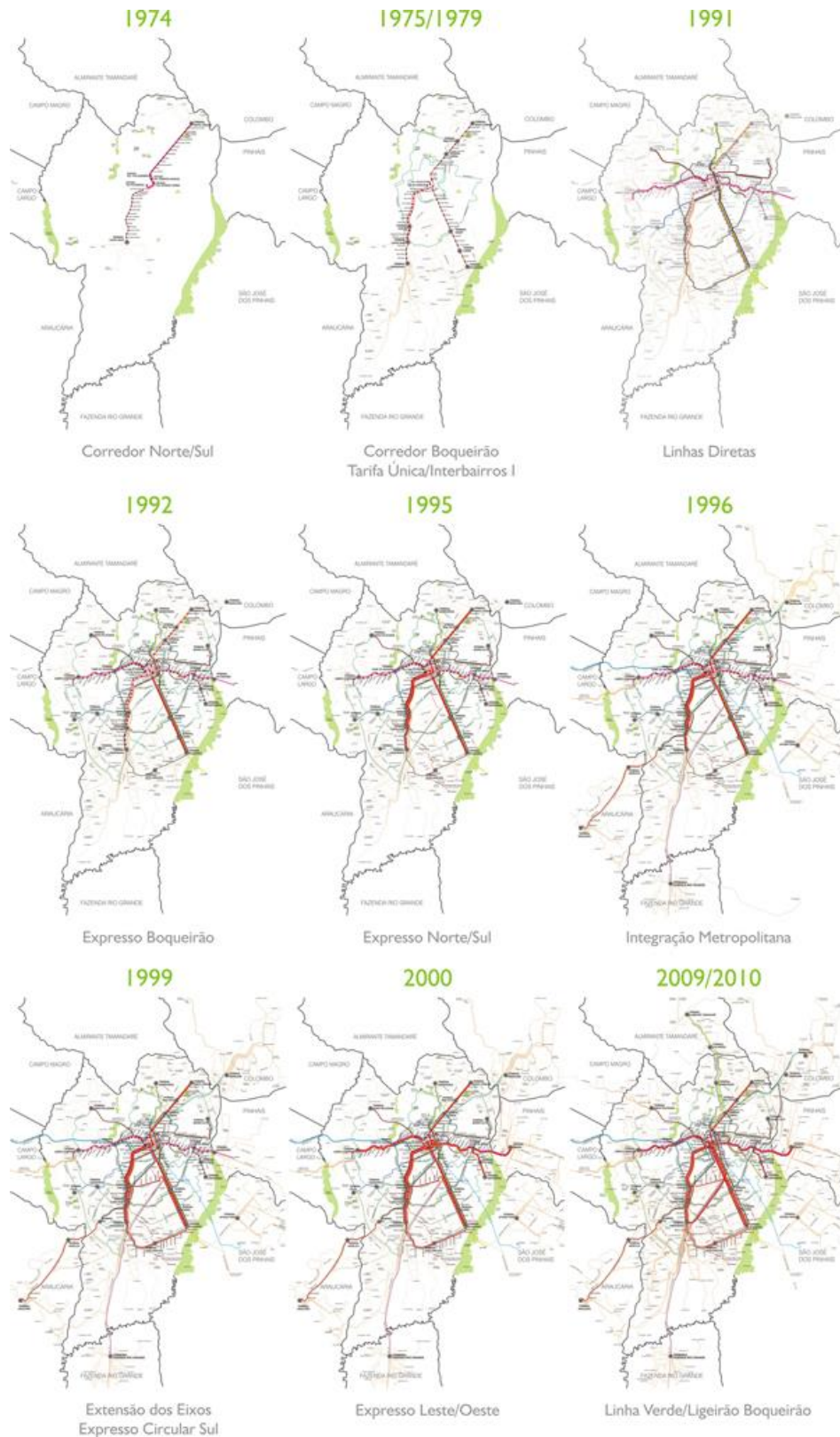


Figura 5 – Evolução da Rede integrada de transporte de Curitiba.
Fonte: URBANIZAÇÃO DE CURITIBA S.A., 2015.

Este sistema inspirou muitos outros semelhantes em todo o Brasil e no mundo, como o Trans Milênio, em Bogotá, Colômbia, inaugurado em 2000. Em novembro de 2013, mais de 166 cidades tinham implantado sistemas BRT, respondendo por 4.336 quilômetros de corredores de ônibus. Estima-se que cerca de 27 milhões de passageiros utilizam este sistema de transporte público em todo o mundo diariamente, dos quais cerca de 17 milhões estão na América Latina, região que tem a maioria dos sistemas (URBANIZAÇÃO DE CURITIBA S.A., 2014).

A Tabela 1, mostra uma lista de cidades que utilizam o sistema BRT pelo mundo:

Tabela 1 – Cidades que utilizam o sistema BRT.

Continentes	País	Cidade com sistema BRT
Ásia	China	Pequim, Hangzhou, Kunming
	Índia	Pune
	Indonésia	Jakarta
	Japão	Nagoya
	Coréia do Sul	Seul
	Taiwan	Taipei
Europa	França	Caen, Clermont Ferrand, Lyon, Nancy, Nantes, Nice, Paris, Rouen, Toulouse
	Holanda	Amsterdam, Eindhoven, Utrecht
	Reino Unido	Bradford, Crawley, Edinburgh, Leeds
	Alemanha	Essen
América Central e do Sul	Brasil	Curitiba, Goiânia, Porto Alegre, São Paulo
	Chile	Santiago
	Colômbia	Bogotá, Pereira
	Equador	Quito, Guayaquil
	Guatemala	Guatemala City
América do Norte	México	Cidade do México, León
	Estados Unidos	Boston, Eugene, Los Angeles, Miami, Orlando Pittsburgh
	Canadá	Ottawa
Oceania	Austrália	Adelaide, Brisbane, Sydney

Fonte: SEBASTIANI (2014).

2.2.2. Transporte público de Curitiba

O sistema de transporte de Curitiba tem como fundamento o uso integrado das vias e política de transporte ao longo dos principais corredores radiais da cidade. Cada um dos eixos estruturais foi desenvolvido como um sistema trinário de vias. A via

central contém uma “canaleta” central, que é exclusiva para a circulação da linha expressa, e também duas vias lentas para veículos particulares. As outras vias são estruturais, paralela à via central (uma via do lado esquerdo e outra do lado direito). São duas vias para que todos os veículos particulares trafeguem do centro aos bairros e dos bairros ao centro, conforme Figura 6.



Figura 6 – Via Compartilhada.
Fonte: Bem Paraná.

A Rede Integrada de Transporte (RIT)¹ permite ao usuário a utilização de mais de uma linha de ônibus, conforme Figura 7. O processo de integração ocorre a partir de terminais de integração onde o cidadão pode desembarcar de uma linha e embarcar em qualquer outra dentro daquele espaço. Assim, o usuário pode compor o seu próprio trajeto para se deslocar por diversos bairros de Curitiba e municípios da Região Metropolitana. Ao todo, são 13 cidades interligadas por esta rede de linhas que

¹ No dia 30/01/2015 Comec anuncia fim de negociações por tarifa única da RIT (MARCHIORI, 2015).

proporciona ampla mobilidade a mais de dois milhões de pessoas diariamente (URBS, 2014).

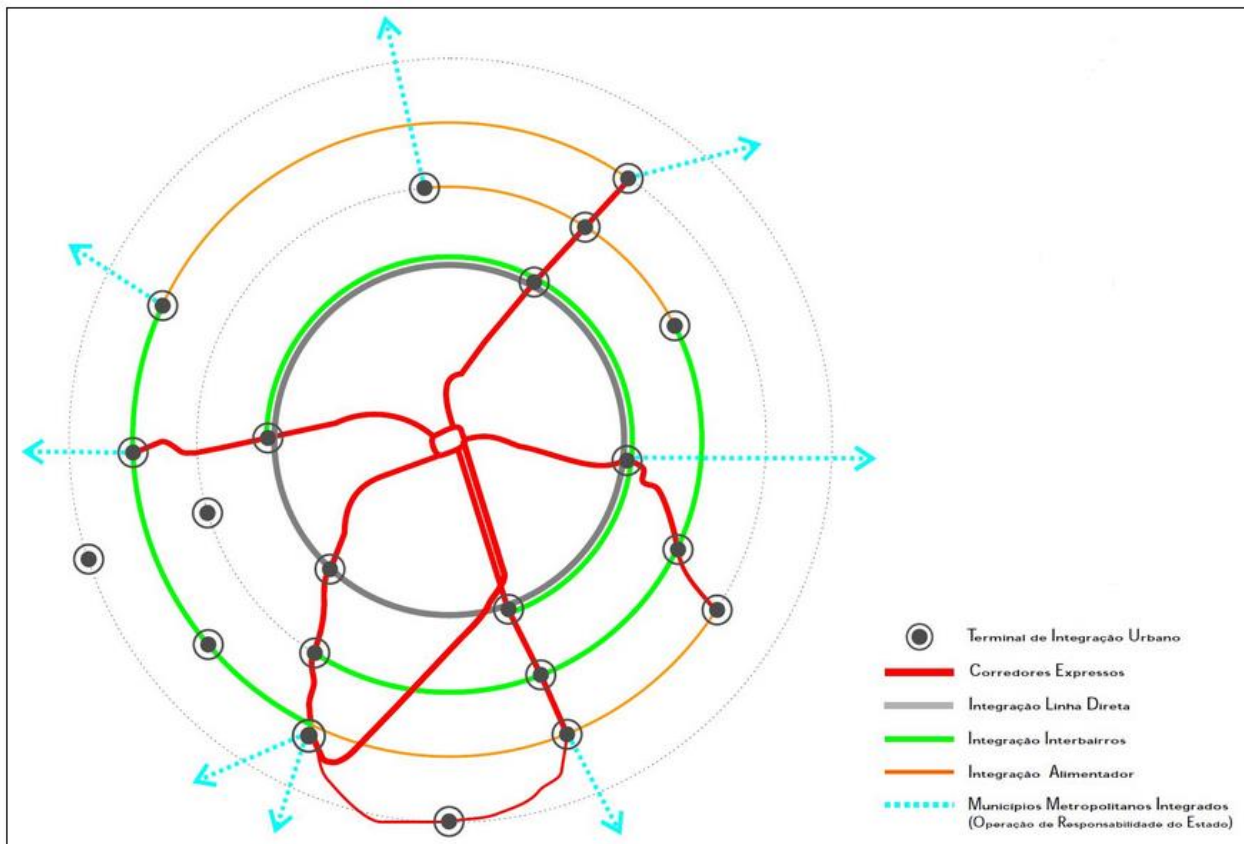


Figura 7 – Rede integrada de transporte de Curitiba.
Fonte: URBANIZAÇÃO DE CURITIBA S.A., 2015.

Na Figura 8 é possível ver que os ônibus são classificados e divididos por cores de acordo com suas funções.








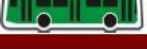

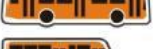










COMPOSIÇÃO DA FROTA 2015						
RIT - REDE INTEGRADA DE TRANSPORTE						
CATEGORIA DE LINHA	TIPOS DE VEÍCULO	CAPACIDADE / VEÍCULO	FROTA OPERANTE		QTDE LINHAS	
			Subtotal	Total		
EXPRESSO LIGEIRÃO	BIARTICULADO 	250	29	29	02	
EXPRESSO	BIARTICULADO 	230/250	118	151	05	
	ARTICULADO 	170	33			
LINHA DIRETA	ARTICULADO 	150	39	258	15	
	PADRON 	110	219			
INTERBAIRROS	ARTICULADO 	140	101	113	08	
	PADRON 	100	2			
	HÍBRIDO 	79	10			
ALIMENTADOR	ARTICULADO 	140	83	467	129	
	COMUM 	85	355			
	MICRO ESPECIAL 	70	29			
TRONCAL	ARTICULADO 	140	5	88	15	
	COMUM 	85	79			
	MICRO ESPECIAL 	70	4			
CONVENCIONAL	COMUM 	85	106	247	74	
	HÍBRIDO 	79	20			
	MICRO ESPECIAL 	70	116			
	MICRO 	40	5			
CIRCULAR	MICRO 	40	9	9	01	
TURISMO	DOUBLE-DECK 	65	6	6	01	
TOTAL			1.368		250	

Figura 8 – Composição da frota de ônibus de Curitiba.
Fonte: URBANIZAÇÃO DE CURITIBA S.A., 2015.

De acordo com a Urbanização de Curitiba S.A. (2015) algumas escalas de operações da cidade de Curitiba são apresentadas a seguir:

- A cidade opera com 356 linhas de ônibus;
- 357 estações tubo;
- Existem 60 km de “canaletas” exclusivas de ônibus;
- 30 terminais de integração;
- 2.270.000 passageiros transportados (dia útil).

2.3. Pesquisas relacionadas ao consumo de energia por veículos de transporte público

Para analisar o consumo de energia de um veículo os principais dados a serem coletados são as características físicas e mecânicas tais como: peso, área frontal, capacidade de passageiros, e as forças que trabalham contra seu movimento e relações de transmissões envolvidas, respectivamente, ou seja, características do veículo e da rota. São as características do tipo de rota que o veículo percorre como: topografia, velocidade média, número médio de arrancadas e características da via.

Esses dados e os equacionamentos dessas forças serão aplicados posteriormente no Capítulo 3, a fim de desenvolver um modelo de simulação para a rota.

O estudo toma como referência para executar a simulação o artigo de Perrotta et al. (2012), onde utiliza-se os modelos de Larminie e Lowry (2003) para calcular o desempenho dos ônibus elétricos e analisar o consumo de energia, criando ciclo de aceleração e desaceleração. Além de características de fenômenos naturais como: gravidade local, densidade do ar e coeficiente de arrasto aerodinâmico.

Para um bom resultado também é importante considerar o desempenho do motorista, pois há diferentes maneiras de condução entre eles. Alguns aceleram muito e freiam rapidamente ao chegar a um ponto de parada ou semáforo vermelho. Outros quando se aproximam de um semáforo vermelho reduzem a velocidade para não precisarem frear totalmente o veículo até que fique verde.

3. MÉTODO DE PESQUISA

Neste capítulo serão apresentados assuntos pertinentes à coleta de dados e ao equacionamento do modelo, para posteriormente ser aplicado no simulador.

O ônibus escolhido para análise foi um biarticulado, pois existem projetos previstos pela URBS em parceria com a VOLVO para a instalação do mesmo na cidade de Curitiba.

A modelagem de consumo de energia de um elétrico híbrido é representada no fluxograma do Anexo 01. As etapas dos capítulos posteriores explicam como os dados foram coletados, a aplicação dos dados em um ciclo de condução e o uso do modelo na linha 203 Santa Cândida/Capão Raso.

3.1. Características dos dados

Para realizar esse estudo foram coletados dados de 4 diferentes locais sendo:

- Literatura: Artigo de Perrotta et al. (2012), onde foram utilizados os modelos de Larmine e Lowry (2003) para calcular o desempenho dos ônibus elétricos e analisar o consumo de energia. Também são consideradas características de fenômenos naturais como: gravidade local, densidade do ar e coeficiente de arrasto aerodinâmico;
- URBS: Dados referentes ao BRT e as características da linha 203 – Santa Cândida/Capão Raso, como pontos de paradas em terminais, estações tubo e semáforos;
- Volvo: Dados ligados ao veículo foram coletados diretamente com o fabricante²;
- Dados topográficos: Como altitudes iniciais/finais e distâncias em cada trecho foram realizados com a ajuda do *software* livre Google *Earth*.

² Com a ajuda do engenheiro Marco Feller, um dos responsáveis pelo estudo de demanda do veículo elétrico na empresa VOLVO.

3.1.1. Características do veículo

Os dados do veículo foram coletados diretamente com o fabricante do veículo estudado (VOLVO). Este se trata de um biarticulado VOLVO modelo B340M, com motor eletrônico DH12E 340 cv, 1700 N.m e caixa de câmbio automática, com implantação para ônibus PHEV transmissão série-paralela (VOLVO BUSES, 2015).

A Tabela 2 contém as constantes que são necessárias para o estudo da demanda de energia.

Tabela 2 – Característica do veículo e dados literários.

Massa bruta total do veículo	40500 kg
Raio do pneu mais a roda	0,5022 m
Capacidade de passageiros	250 pessoas
Área frontal	9,126 m ²
Aceleração da gravidade	9,8 m/s ²
Densidade do ar	1,2 kg/m ³
Coeficiente de arrasto aerodinâmico	1,17
Caixa de transmissão	Vide seção 4.1.3 Caixa de transmissão (<i>Gear Ratio</i>)

Fonte: Adaptado Volvo BUSES, 2015.

3.1.2. Características da rota

Foram levantados junto à URBS dados referentes ao BRT e as características da linha 203 – Santa Cândida/Capão Raso, como pontos de paradas em terminais, estações tubo e semáforos.

Os pontos de parada da linha estão dispostos no Anexo 03.

3.1.3. Características topográficas

Para realizar a coleta dos dados topográficos foi necessária a utilização do *software* livre Google Earth. Primeiramente, foi inserida a rota 203, Santa Cândida/Capão Raso, que está representado em azul no mapa da Figura 9.

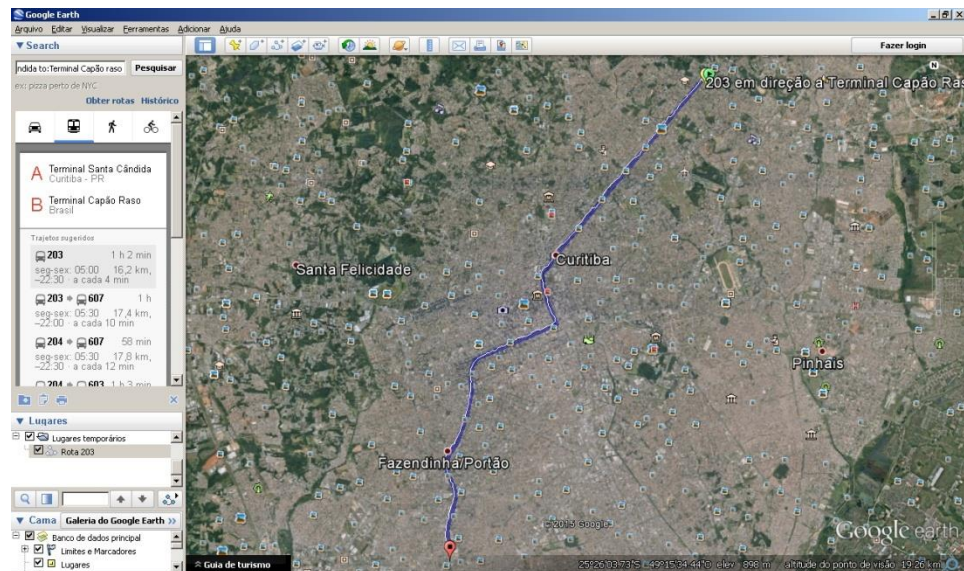


Figura 9 – Caminho da rota 203 Terminal Santa Cândida/Terminal Capão Raso.
Fonte: Google Earth, 2014.

Através do *software* é possível também, realizar uma visualização da topografia (Perfil de Elevação) da rota especificada, como mostra a Figura 10.

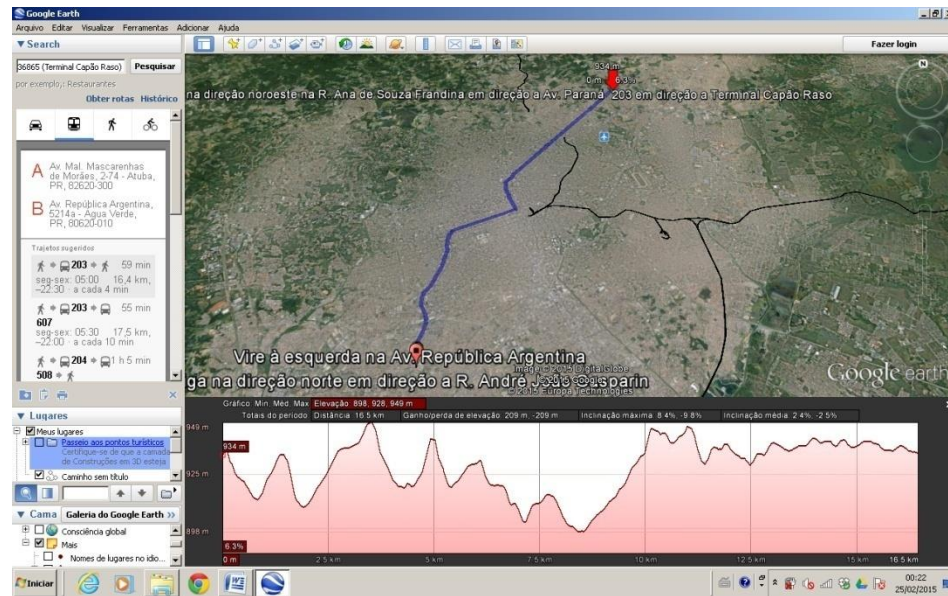


Figura 10 – Perfil de elevação da rota 203 Santa Cândida/Terminal Capão Raso. Fonte: Google Earth, 2014.

3.2. Equacionamento do Modelo

As equações, utilizadas para o modelamento do problema, foram retiradas do trabalho realizado por Perrotta et al. (2012), um estudo de demanda de energia elétrica de um ônibus elétrico em uma rota urbana na cidade de Oporto.

São diversas forças que incidem sobre o veículo, de forma a produzirem uma resistência ao movimento, mas, segundo o modelo apresentado por Perrotta et al. (2012), quatro são de maior relevância sobre o veículo em movimento, sendo:

- I. Resistência do ar: Quando um corpo se movimenta na atmosfera, uma força, produzida pelo atrito e arrasto aerodinâmico, atua opondo-se ao movimento. Esta força, conhecida como força de arrasto, depende de fatores ligados ao corpo e à densidade do ar. A força de arrasto cresce proporcionalmente ao quadrado da velocidade do corpo em relação ao ar. O arrasto é definido pela seguinte equação (BOSCH, 2005):

$$F_{\text{arrasto}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C \cdot S \cdot v^2 \quad (1)$$

Onde ρ é a densidade do ar, C é o coeficiente de arrasto, este depende do formato aerodinâmico do veículo, S é a área frontal do corpo e v é a velocidade relativa entre o corpo e o ar.

- II. Resistência de rolamento dos pneus: As forças de atrito que existem entre os pneus e a superfície do asfalto é o atrito estático, que, no caso do rolamento, exerce um papel importante na força motora necessária ao movimento do veículo, mas este papel é apenas exercido pelos pneus tracionadores. Entretanto todos os pneus atuam como apoio de carroceria e estes exercem uma força contrária ao movimento, que é expressa pela seguinte equação:

$$F_{\text{rol}} = f \cdot m \cdot g \quad (2)$$

$$f = (0,0041 + 0,000041 \cdot v \cdot 2,24) \cdot C_h \quad (3)$$

Onde f é o coeficiente de atrito, C_h é o coeficiente de atrito entre o pneu e o asfalto, v é a velocidade linear, m é a massa e g é a aceleração da gravidade.

- III. Força em superfícies inclinadas: A força que atua no veículo quando este se encontra subindo uma superfície inclinada é uma componente de sua massa que atuará paralela ao movimento, mas em sentido contrário à velocidade. A figura a seguir ilustra a disposição das componentes do peso de um corpo em um plano inclinado.

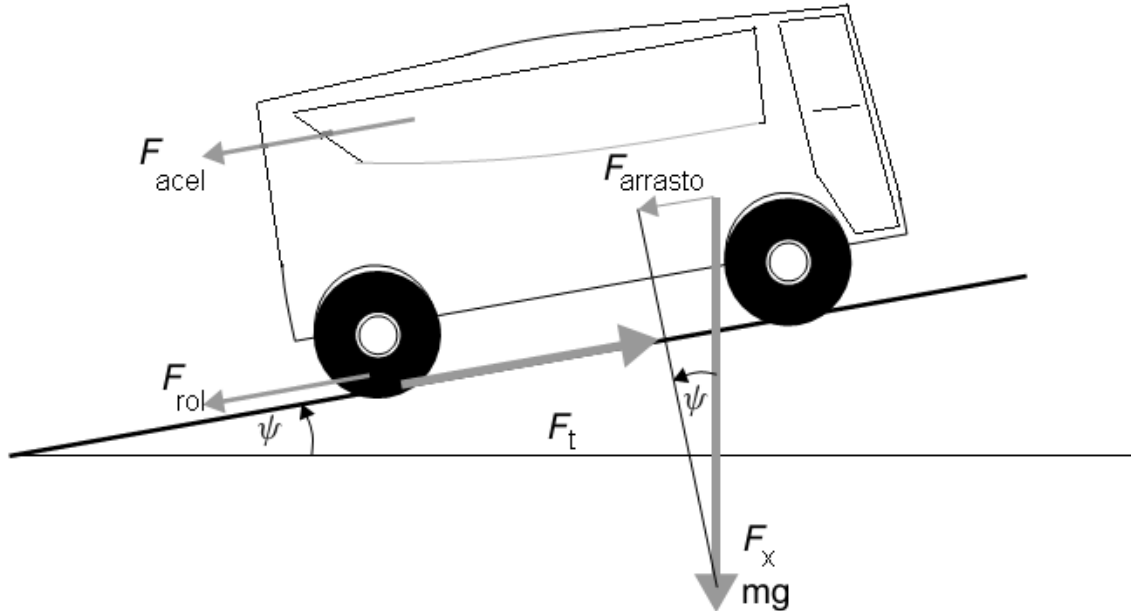


Figura 11 – Forças em superfícies inclinadas.
Fonte: Autoria Própria.

Pode-se perceber que a componente “X” do peso está se opondo ao movimento de subida. A equação que define esta força é:

$$F_x = m \cdot g \cdot \text{sen}\theta \quad (4)$$

Onde θ o ângulo de inclinação da superfície em relação ao eixo horizontal.

- IV. Força inercial: De acordo com a segunda lei de Newton, uma força, além das forças já mencionadas, deve ser aplicada a um corpo para que este varie sua velocidade. A força de aceleração é descrita pela seguinte equação:

$$F_{\text{acel}} = m \cdot a \quad (5)$$

Onde “a” é a aceleração do corpo e “m” é a massa.

Todas as forças apresentadas anteriormente atuam contra o movimento do veículo e se concentram no ponto de contato entre pneu e solo e essa é a importância do atrito estático que atua no pneu de tração. A concentração destas forças pode ser visualizada na Figura 11, onde F_t é a força total, e a somatória da mesma está representada na equação 6.

$$F_t = F_{\text{arrasto}} + F_x + F_{\text{acel}} + F_{\text{rol}} \quad (6)$$

Como o movimento do veículo se define em giros, pneu, eixo, etc., a força resultante se transforma em torque, que será exercido no eixo e transmitido ao motor através da caixa de transmissão. A equação que representa este torque está descrita abaixo.

$$T = \frac{F_t \cdot r}{G} \quad (7)$$

Onde F_t é a força total que atua contra o movimento e gera o torque no eixo da roda, T é o torque, r é o raio do pneu e G é a relação de transmissão (vide seção Relação de transmissão (*Gear Ratio*)).

Após saber qual o torque necessário para vencer as forças resistentes, é possível calcular a potência requerida pelo motor.

A potência é calculada pontualmente no trecho, pois as características dos pontos mudam no decorrer do percurso, e os resultados são integralizados ao final dos cálculos para o resultado final de consumo.

$$P = \frac{T \cdot v_m \cdot 2 \cdot \pi}{60000 \cdot \eta_m \cdot \eta_c} \quad (8)$$

$$v_m = \frac{v \cdot 60 \cdot G}{2 \cdot \pi \cdot r} \quad (9)$$

Onde P é a potência, v_m é a rotação do motor, η_m é a eficiência do motor, fornecida pelo fabricante, e η_c é a eficiência do motorista.

A energia despendida, em um determinado ciclo de condução E_C , é dada pela equação abaixo.

$$E_C = \int_{t_i}^{t_f} P * \Delta t \quad (10)$$

Onde P é a potência Δt é o tempo de duração do ciclo.

4. SIMULAÇÃO E RESULTADOS

Neste capítulo são apresentadas as etapas para o desenvolvimento da programação do simulador, a aplicação do equacionamento e dados recolhidos e apresentados no capítulo 3, e os resultados deste trabalho.

As etapas para programação do simulador podem ser visualizadas também no Anexo 01 nas Abas Simulação de um Ciclo de Condução e Simulação da Rota 203.

4.1. Desenvolvimento do Simulador

Este tópico apresenta os passos para o desenvolvimento do simulador. Para isso, foram realizadas coletas de tempo em ciclos de *stop-and-go* para o cálculo da aceleração média. Em seguida, serão apresentados conceitos sobre *Driving Cycle* (Ciclo de Condução), onde será estimada a velocidade de operação do veículo. Por fim, serão apresentados conceitos de Caixa de transmissão (*Gear Ratio*), para representar uma simulação de troca de marchas do ônibus, com isso desenvolveu-se uma ferramenta computacional para modelar a análise do consumo de energia dos ônibus.

4.1.1. Coletados valores de tempo em ciclos de *stop-and-go*

Para iniciar os cálculos e estudos da demanda de energia foram coletados valores de tempo em ciclos de *stop-and-go* (arrancada e parada).

Nos dias 15/11/2014 e 22/11/2014, entre às 09h30min e às 12h10min, percorreu-se o trajeto representativo (ida e volta, totalizando 4 viagens) da rota 203 (Santa Cândida/Capão Raso), da URBS, a bordo de um biarticulado BRT. Dessa forma partiu-se do terminal Santa Cândida até o terminal Capão Raso, com o objetivo de coletar dados de tempo para criar ciclos de paradas e arrancadas.

A coleta dos tempos foi realizada a partir de um cronômetro, e os resultados obtidos apresentam-se na Tabela 3.

Para garantir a coleta de dados foram realizadas 4 coletas em cada ponto de tempo de *stop-and-go* e foram comparadas e analisadas. Assim, ao final da coleta observou-se que os valores são pouco dispersos (variação de 10^{-1} s), o que nos dá uma margem de erro considerada insignificante.

Após as coletas de tempo de arrancadas e paradas (apenas os tempos em que a velocidade atingiu os extremos, 0 e 40 km/h ou 11,11 m/s, foram considerados, caso contrário descartou), gerou-se a Tabela 3.

Tabela 3 – Tempos STOP-AND-GO.

Tempo desacelerando (s)	Tempo acelerando (s)
5,7	17,0
6,4	14,7
7,1	20,9
5,9	17,4
8,8	15,6
7,2	16,5
7,7	13,1
8,2	15,7
8,8	16,2
9,1	14,8
6,5	17,6
9,0	19,1
6,0	14,9
9,9	15,6
6,9	15,9
5,1	17,4
5,5	13,5
5,4	14,2
6,6	14,9
5,9	14,9
7,1	16,0

Fonte: Aatoria Própria, 2015.

A partir dessa tabela obteve-se a média aritmética destes tempos de desaceleração e aceleração, com 7,09 s com desvio padrão de 1,45 s e 15,99 s com desvio padrão de 1,87 s, respectivamente. Com esses dados, foi possível calcular a aceleração média do veículo em suas arrancadas e paradas além da distância necessária para a variação da velocidade, dentro dos limites estabelecidos.

A velocidade máxima é a velocidade que se espera desenvolver pelos veículos que circulam nesta linha, conforme mostrado na seção 4.1.2.

Com os tempos coletados é possível calcular a aceleração e a distância que o veículo necessita para acelerar e parar, utilizando as seguintes equações:

$$a = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (10)$$

Onde a é a aceleração do veículo, ΔV é a variação da velocidade e Δt é a variação do tempo.

$$V^2 = V_0^2 + 2 \cdot a \cdot \Delta S \quad (11)$$

Onde V é a velocidade final, V_0 é a velocidade inicial e ΔS é a distância percorrida.

Através da média do tempo *STOP-AND-GO* acelerando e desacelerando calculou-se a sua aceleração média através da equação (10) resultando em 0,695 m/s² e sua distância através da equação (11) de 39,384 m, fez-se então o mesmo para sua desaceleração média resultando em 1,567 m/s² e distância de 88,820 m. Estes valores têm grande importância para iniciar os estudos da linha 203 da URBS, que posteriormente serão utilizados para calcular as velocidades instantâneas em cada ciclo de condução.

4.1.2. Ciclo de Condução (*Driving Cycle*)

Para a simulação da demanda de energia de um veículo, a correta montagem de um ciclo de condução é um componente crítico, pois a partir dele realizam-se todos os cálculos para analisar a demanda de energia do ônibus.

O ciclo de condução é feito considerando uma aceleração até a velocidade máxima em um terreno plano e a desaceleração, este é referência para todos os ciclos posteriormente calculados, sendo neste trabalho considerada a mesma de 11,11 m/s, como velocidade máxima de segurança da via.

Neste estudo, foi realizado um ciclo de condução que simula um *stop-and-go*, com valores de aceleração e desaceleração, conforme demonstrado na seção 4.1.1.

Como em Perrotta et al. (2012) um ciclo de condução tem período de 50 segundos, procurou-se manter esse valor para este trabalho para comparações posteriores.

Para demonstrar esse ciclo, qualquer tempo acima de 27 segundos é válido o ciclo *stop-and-go* do ônibus, pois o tempo necessário para acelerar é de aproximadamente 16 segundos e para desacelerar é de aproximadamente 7 segundos. A Figura 12 mostra um ciclo de condução obtido na linha 203 da URBS.

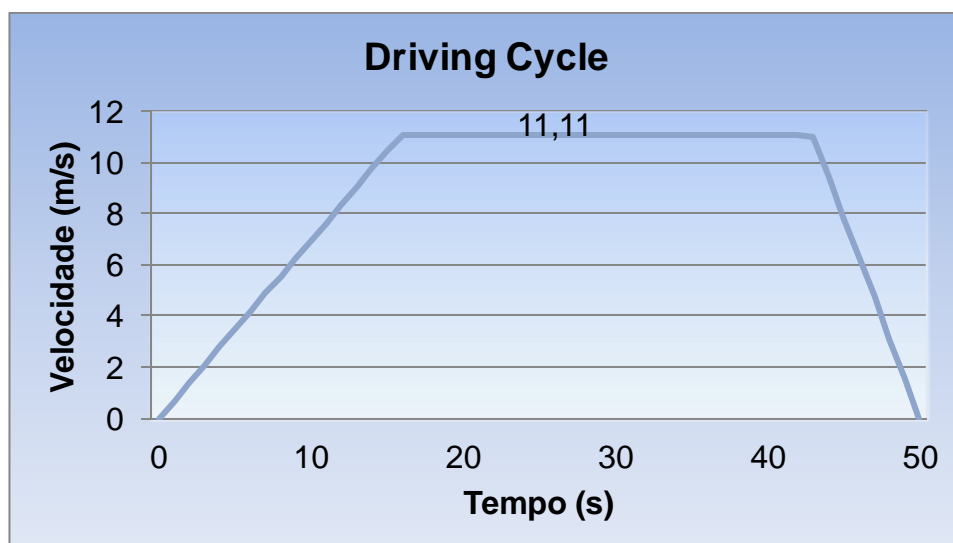


Figura 12 – Gráfico *Driving Cycle*.
Fonte: Autoria própria.

A fim de calcular a Energia no ciclo devem-se usar essas informações para calcular o torque necessário para operar o veículo em cada momento, considerando resistência do ar, resistência de rolamento dos pneus, forças em superfícies inclinadas e forças de aceleração, vide seção 3.2, e também relação de transmissão (*Gear Ratio*) que mostra qual marcha será necessária em cada trecho, vide seção 4.1.3. O torque total exercido pode ser expresso como a somatória de todas as forças aplicadas juntamente com dados do veículo. A potência é calculada considerando a velocidade de rotação do motor em rotações por minuto (RPM) e sua eficiência. Por último, para calcular a Energia no ciclo é necessário integrar a potência instantânea.

Além dos valores de tempo e distância que estes veículos precisam para acelerar, também foram obtidos os dados topográficos da rota utilizando o programa Google Earth e o posicionamento de cada estação tubo e terminais da rota, como pode ser observado na Figura 13.

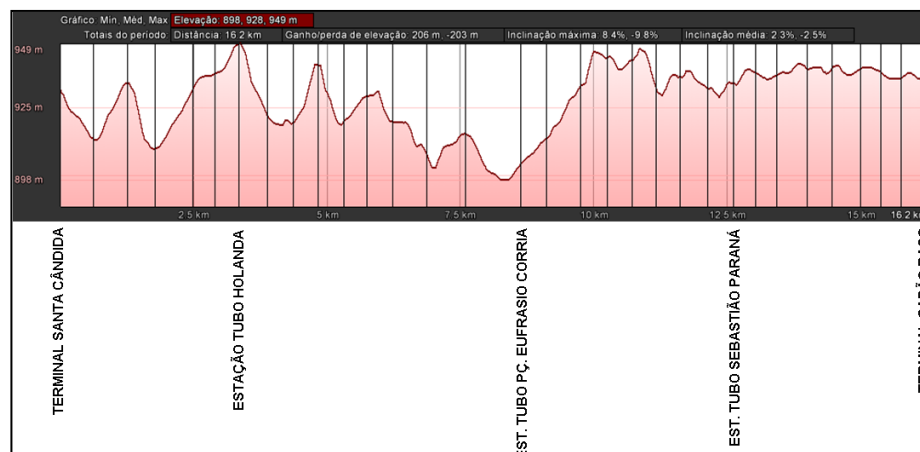


Figura 13 – Característica topográfica da rota 203.
Fonte: Autoria própria.

Os traços que cortam o gráfico representam as estações tubo desta linha e as paradas nelas duram de 20 a 40 segundos. O número de paradas nos semáforos depende muito do motorista, sendo muito discrepante a diferença entre estes valores (vide Anexo 4), pois foi perceptível durante a coleta de dados que alguns reduzem a velocidade até que o sinal fique verde enquanto outros vão com a velocidade constante

até parar no sinal vermelho. Por isso, foi utilizado um valor que coloque o veículo em maior consumo.

Neste trabalho se optou por utilizar a pior situação possível de cenário representativo onde se considera as 81 paradas em todos os semáforos, estação tubo e terminais (dados coletados na URBS), vide Anexo 3, para calcular o consumo de energia do ônibus.

4.1.3. Caixa de transmissão (*Gear Ratio*)

A caixa de transmissão é uma das peças mais importantes para determinação do torque total, pois nela é feita toda transferência de torque do motor para o eixo das rodas. A relação da caixa de transmissão para troca de marchas é apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 – Característica da Relação de Transmissão.

Marcha	Caixa de Cambio	Eixo de Tração	G	F Max(N)	T Max (Nm)	w (rpm)	Velocidade (m/s)	Velocidade (km/h)
1	7,09	7,21	51,1189	173804,26	1700	1136,127	1,18	4,248
2	5,81	7,21	41,8901	142426,34	1700	1136,154	1,44	5,184
3	4,53	7,21	32,6613	111048,42	1700	1138,069	1,85	6,66
4	3,25	7,21	23,4325	79670,51	1700	1138,68	2,58	9,288
5	1,97	7,21	14,2037	48292,58	1700	1142,333	4,27	15,372
6	0,69	7,21	4,9749	16914,66	1700	1040,09	11,1	39,96

Fonte: Adaptado B340M, 2015.

Através da Tabela 4 conseguiu-se aperfeiçoar a programação da melhor marcha para ser desenvolvida em diferentes trechos, conforme sua força máxima suportada e sua velocidade. O Anexo 2 mostra o funcionamento das trocas de marchas.

Vale lembrar também, que neste estudo admitiu-se como premissa que os ônibus teriam eficiência do motorista igual a “1” e que a troca de marcha seria automática, impactando assim em uma economia de energia do ônibus por acelerações desnecessárias.

4.2. Simulação

Antes de realizar as simulações na Linha 203 foi feito um teste com o objetivo de calcular a confiabilidade do simulador. Com a comprovação e validação do simulador, fez-se então a simulação utilizando os dados da Linha 203. Foi também comparado o ciclo de condução de Perrota com o ciclo de condução da linha para observar a diferença de energia entre os veículos. Por fim, foi apresentado o desenvolvimento da programação da linha.

4.2.1 Resultados de um ciclo de condução

O tópico tem como objetivo validar a modelagem matemática da planilha, fazendo comparações com o resultado obtido por Perrotta et al. (2012). Como o veículo utilizado por ela possui uma configuração muito distinta do veículo utilizado na rota 203, esta validação utilizou das características do veículo dela.

A Tabela 2 e a Tabela 5 mostram as variáveis de definições dos veículos que foram inseridas no simulador. Apesar de os ônibus terem características construtivas diferentes, os mesmos mantêm o mesmo padrão de processamentos de dados.

Tabela 5 – Variáveis de definição de Perrotta et al. (2012).

Massa bruta total do veículo	17.048 kg
Raio do pneu mais a roda	0,5 m
Eficiência do controlador	92%
Área frontal	10 m ²
Aceleração da gravidade	9,8 m/s ²
Densidade do ar	1,2 kg/m ³
Coeficiente de arrasto aerodinâmico	1,17
Caixa de transmissão	Primeira Marcha 1:3 Segunda Marcha 1:1 Diferencial 8,83

Fonte: Adaptado, Perrotta et al. (2012).

Para tanto, primeiramente para calcular o erro é realizado um ciclo de condução com os dados das características do ônibus de Perrotta et al. (2012), após isso é calculado seu torque do ciclo de condução, e finalmente calcula-se a energia consumida nesse ciclo.

A Figura 14 com velocidade (m/s) no seu eixo vertical e tempo (s) no seu eixo horizontal, mostra a comparação do Ciclo de condução da rota 203 da URBS e Perrotta et al. (2012). Pode-se notar que em Perrotta et al. (2012) há dois níveis de aceleração, isso se deve a sua troca de marchas que demora 10 s para chegar a sua velocidade máxima. Já na rota 203 sua aceleração é igual entre todas as trocas de marchas, até atingir a velocidade máxima (40 km/h). Esta inclinação presente no gráfico pode ser devido ao peso do ônibus.

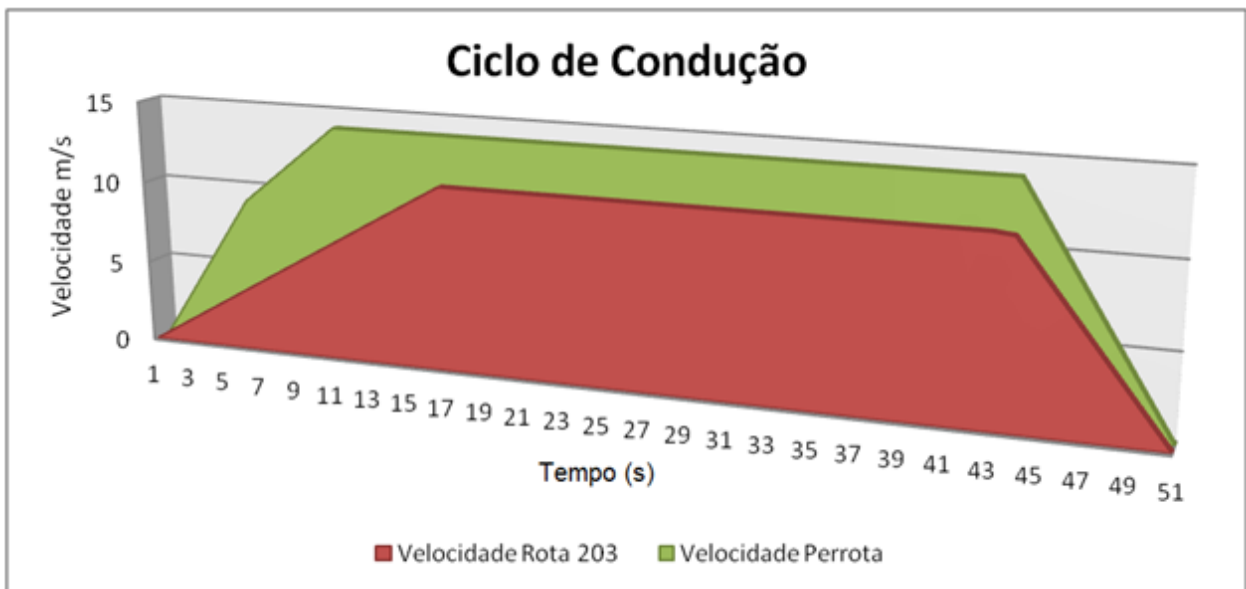


Figura 14 – Ciclo de condução.
Fonte: Autoria própria.

Após, realizado o ciclo de condução, o próximo passo é determinar o torque do ciclo de condução. A Figura 15 com torque em (Nm) no seu eixo vertical e tempo em (s) no seu eixo horizontal, mostra a comparação entre a linha 203 da URBS e Perrotta et al. (2012).

Pode-se notar também a troca de marchas realizada nos dois gráficos, onde o primeiro da linha 203 da URBS aumenta até a troca da quinta marcha, após isso muda-se para a sexta marcha que entra em torque constante, devido sua velocidade ser constante, e ser desconsiderado as forças de aceleração nesse momento, e no segundo mostra-se a mudança da primeira e segunda marcha, e após entrar em velocidade constante seu torque também fica constante.

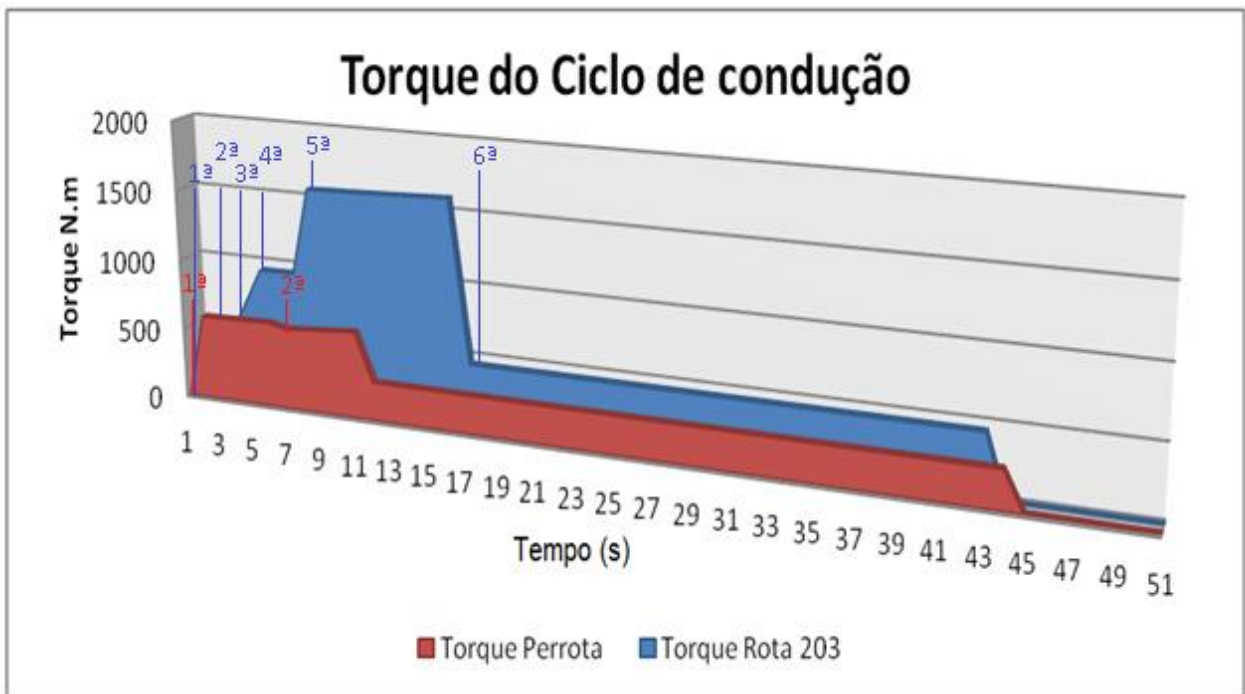


Figura 15 – Torque do ciclo de condução.
Fonte: Autoria própria.

O último passo é determinar a energia consumida no ciclo de condução e comparar os resultados que obtivemos com os dados de Perrotta et al. (2012) com os obtidos por ela no ciclo presente em seu artigo.

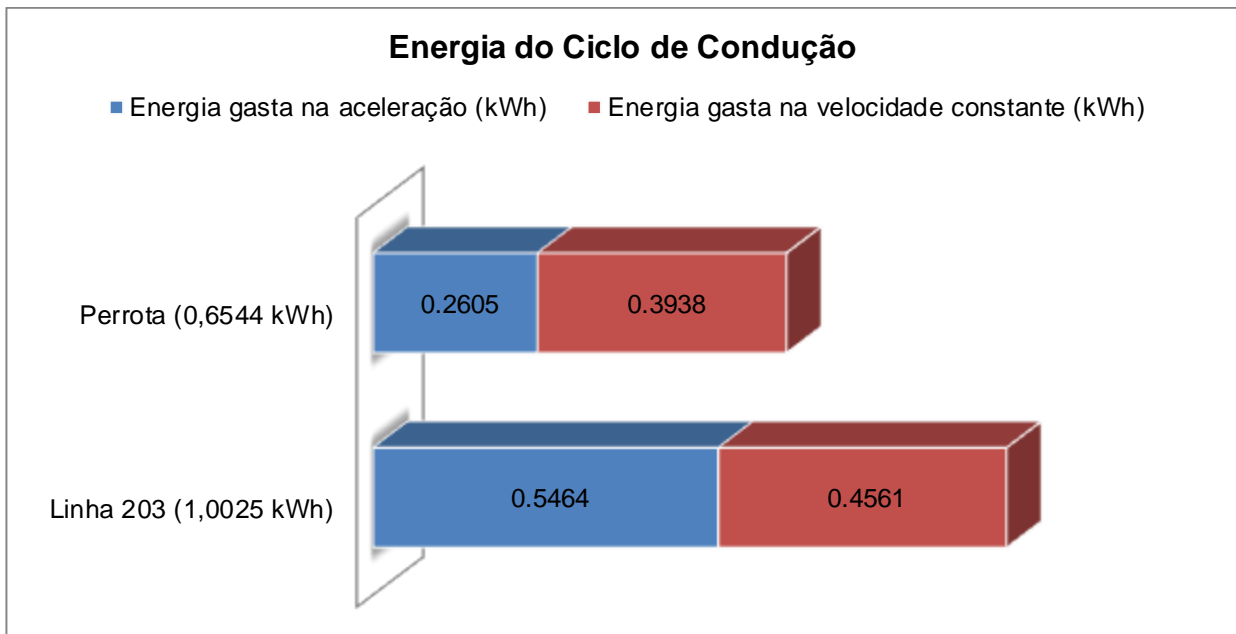


Figura 16 – Energia do Ciclo de condução.
Fonte: Autoria própria.

A Figura 16 mostra que os resultados obtidos a partir desta simulação são satisfatórios, pois conforme citado em Perrotta et al. (2012), a energia do seu ciclo de condução é de aproximadamente 656 Wh. Alimentando o modelo deste trabalho com as características de Perrotta et al. (2012) obteve-se um consumo de 654,39 Wh, ou seja, 1,61 Wh de diferença, ou 0,25%. Conclui-se que modelo pode ser aplicado na Linha 203 da URBS.

Pode-se perceber também que, houve uma diferença do consumo de energia do ônibus deste trabalho com o de Perrotta et al. (2012), 1,52 vezes maior. Tal valor se deve tanto às características construtivas, pois o ônibus escolhido desta linha tem peso de aproximadamente 3,5 vezes maior que o ônibus de Perrotta et al. (2012), e um tempo de aceleração de um ciclo de condução maior.

4.2.2 Simulação da Linha 203 da URBS

Para o desenvolvimento da programação e simulação dos dados da linha 203 da URBS, foram executados os seguintes passos:

O primeiro passo foi estimar a velocidade instantânea em cada trecho (entre pontos de parada), onde se utiliza o ciclo de condução conforme seção 4.1.2.

Após, foi necessário recolher dados do perfil de elevação da linha que é usado para obtermos o ângulo de inclinação do perfil, conforme seção 3.1.3. Assim, utilizaremos esses dados para calcular a força de inclinação que será adicionada às demais forças envolvidas. A massa total do veículo foi calculada considerando o número máximo de passageiros com média de 75 kg mais o peso bruto do veículo e, para o veículo elétrico e o híbrido, o cálculo do banco de baterias foi feito com base nos valores de Perrotta et al. (2012), 8% da massa total em um veículo elétrico.

Os resultados obtidos da programação das forças resultantes foram novamente processados, juntamente com a relação de transmissão, conforme 4.1.3, para proporcionar o torque resultante, nesse momento, a troca de marcha não pode superar a rotação máxima do motor.

Após obtidos os torques resultantes de cada ciclo, calculou-se a rotação do motor em rpm. Os mesmos dependem da velocidade instantânea do trecho; já a eficiência do motor depende do número de rotações por minuto que o motor realizou.

O cálculo da potência instantânea no ciclo de condução depende dos passos citados anteriormente. A Figura 17, mostra os resultados obtidos nos ciclos de condução da Rota 203.

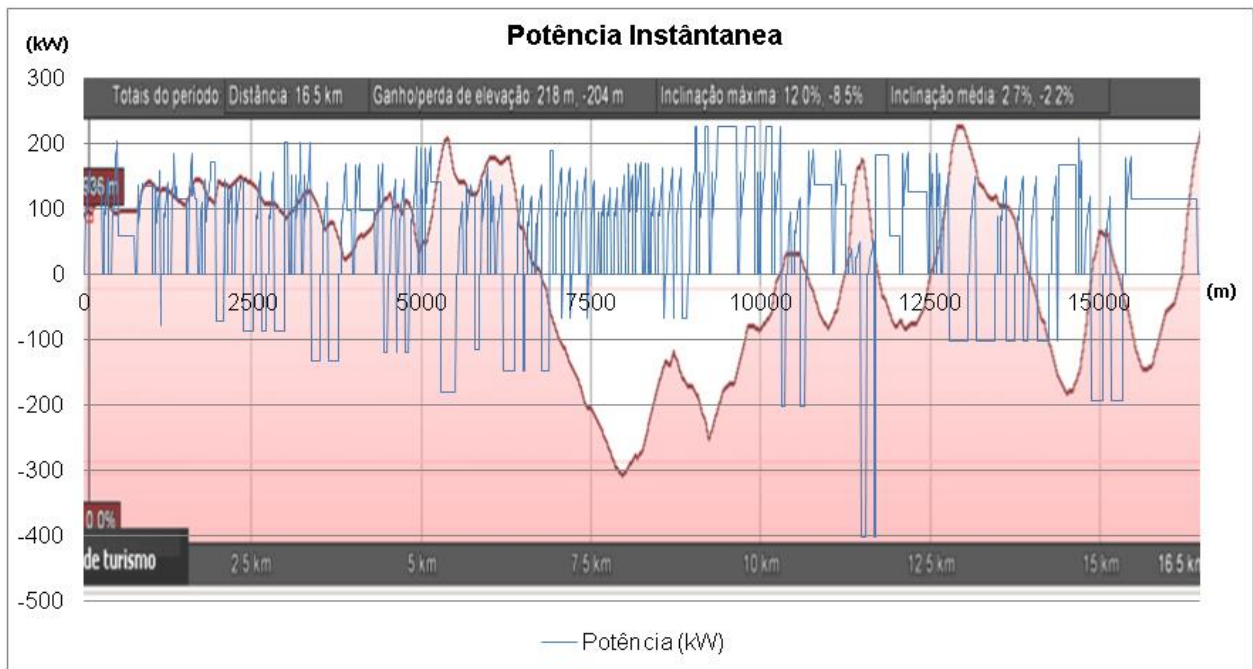


Figura 17 – Potência instantânea.
Fonte: Autoria própria, 2015.

O gráfico em azul representa a potência instantânea requerida pelo motor, eixo vertical, em relação à distância que esta potência é requerida, eixo horizontal. O gráfico vermelho representa a topografia do trecho. Pode-se notar a potência máxima demandada no trecho entre 7,5 km e 10 km com média de potência de 200 kW. Essa é a distância que se tem o maior número de paradas, pois trata-se da entrada do ônibus no centro da cidade com paradas em semáforos e estações tubo. Além disso, entre 10 km e 12,5 km tem-se um pico de potência negativa. Tal fato se deve às forças de inclinação e a aceleração serem negativas, ou seja, nesse percurso não foi utilizado energia contra movimento e sim a seu favor na forma de energia potencial, essa energia é aproveitada através da frenagem regenerativa.

A energia total em (kWh) pode ser calculada a partir dos dados inseridos no simulador sobre a potência instantânea e o tempo do ciclo (tempo entre as paradas). Por fim, a energia total da Linha 203 é a soma das energias de cada ponto de parada.

4.3. Resultados

Este tópico apresenta os resultados realizados em um percurso entre Terminal Capão Raso até a Estação Tubo Herculano, para uma breve demonstração do simulador, e os resultados finais de energia gasta na linha (consumo entre pontos de paradas e demanda total) entre o Terminal Capão Raso e o Terminal Santa Cândida.

4.3.1. Ciclo de condução entre o trajeto T. Capão Raso, S1 e ET. Herculano

O Anexo 04 e 05 mostram a planilha de programação onde se apresenta o funcionamento do simulador entre o trajeto T. Capão Raso, S1 e ET. Herculano com diferentes variáveis como: distância, velocidade, potência, energia instantânea e energia total entre os pontos de parada.

A Figura 18 apresenta: Potência instantânea do lado esquerdo e Energia demandada do lado direito, em “y”, e distância percorrida em “x”, onde mostra um ciclo de condução entre o trajeto Terminal Capão Raso até a Estação Tubo Herculano, além de demonstrar o comportamento do veículo no trecho onde representa-se a velocidade instantânea, o relevo do trajeto, a potência requerida e a energia demandada.

Observa-se também na Figura 18 que no momento da partida ocorre a maior demanda de energia, ou seja, quando há maior variação de velocidade (aceleração) atingindo 0,15 kW. Após esse período, ele se mantém com uma energia constante, atingindo a velocidade máxima de 11,11 m/s até que o veículo seja desacelerado e fique em repouso, nesse período as energias cinética e de frenagem regenerativa são desconsideradas. Para esse trecho pode-se notar um pico de potência de 159,33 kW onde se utilizou 63% da potência máxima do motor (250 kW).

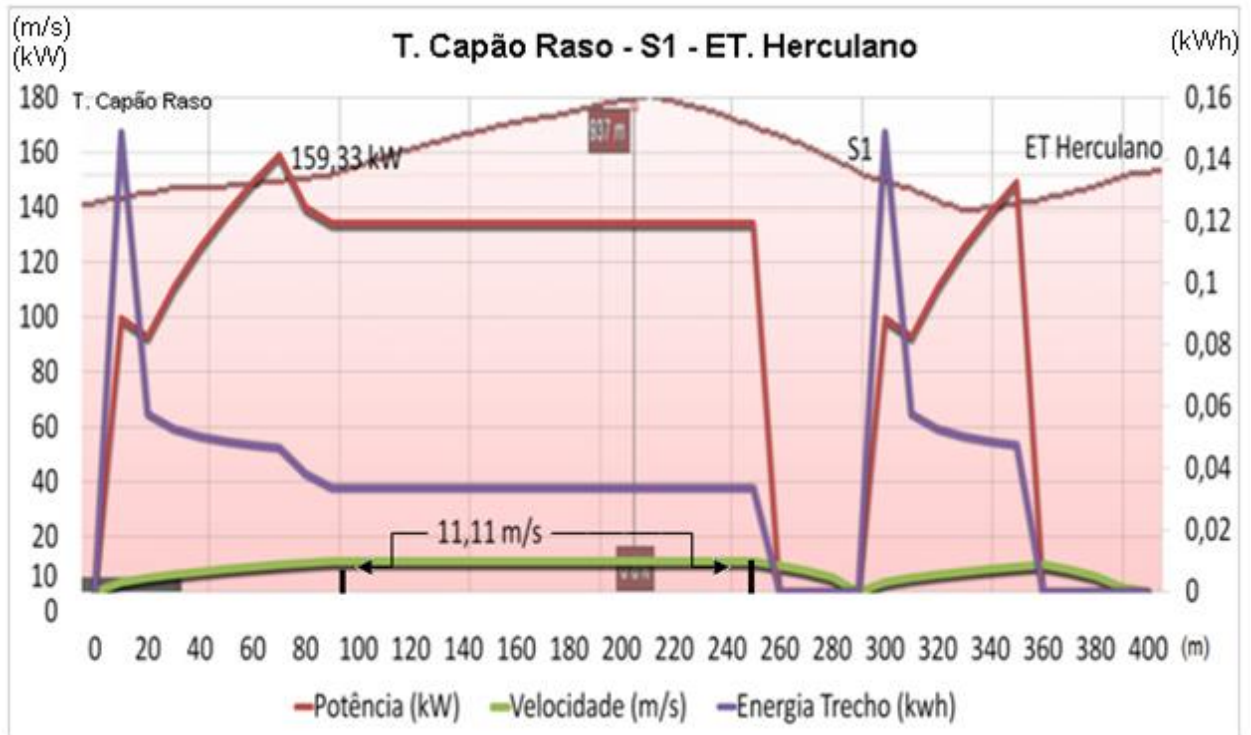


Figura 18 – Trajeto Terminal Capão Raso, S1 e ET Herculano.
Fonte: Autoria própria, 2014.

4.3.2. Energia Consumida na Linha

Os cálculos foram realizados levando em consideração as diferenças das características de cada veículo (elétrico, híbrido e a combustão) como o seu peso e a eficiência dos motores. Assim foi possível distinguir a quantidade de energia gasta pelos mesmos. Por fim foi possível analisar os benefícios da implantação de um elétrico híbrido no sistema de transporte público na cidade de Curitiba, em relação ao consumo de energia.

A Figura 19 mostra valores detalhados do consumo de cada ciclo de condução em suas respectivas paradas, partindo do Terminal Capão Raso até o Terminal Santa Cândida, este gráfico demonstra a demanda de energia do veículo elétrico na linha, onde representa a energia gasta entre as paradas de cada ciclo de condução. Pode-se perceber também que o trecho entre a Estação Joaquim e o terminal Santa Cândida

obteve maior índice de consumo com 3,49 kWh, o que era esperado, pois é o trecho com maior distância sem paradas e maior ângulo de inclinação positiva.

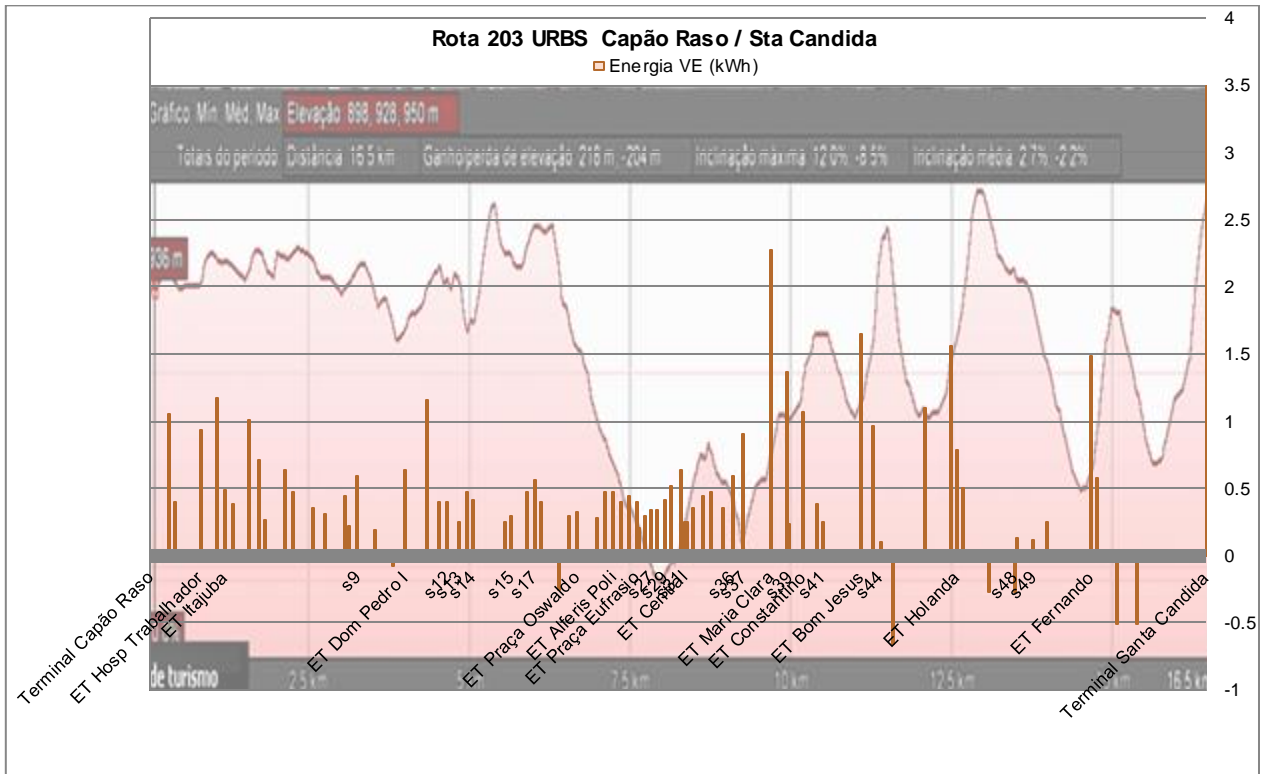


Figura 19 – Energia consumida na rota 203 da URBS.
Fonte: Autoria própria, 2015.

A energia consumida por um VE na rota é igual à soma de todos os pontos de consumo de energia, inclusive pontos em que houve consumo negativo, ou geração de energia elétrica por aproveitamento cinético. Houve também um acréscimo na massa do veículo devido ao uso de banco de baterias igual a 8% da massa total do veículo, como utilizado por Perrotta et al. (2012). A Figura 20 mostra o consumo de energia deste veículo na rota de 40,78 kWh, com massa de 62,6 toneladas e, se a energia potencial não fosse aproveitada a demanda seria de 43,22 kWh.

O cálculo do consumo do VC feito somando-se apenas os pontos com energia positiva na rota. No caso do motor à combustão as energias negativas não podem ser recuperadas em forma de energia elétrica. Apesar de poder aproveitar a energia

cinética para pegar “embalo” o trabalho não considera velocidades acima de 40 km/h e este tipo de energia foi desconsiderada. Após isso foi considerado a eficiência do motor igual a 30% e calculado sua energia total. A Figura 20 mostra a quantidade de energia que gastará um ônibus à combustão nesta linha consome 144 kWh. Neste caso a massa total do veículo não foi alterada por banco de baterias.

Para o cálculo de consumo do VHE foi considerado que até 20 km/h apenas o motor elétrico atua na tração, com eficiência estimada pelo modelo e, após essa velocidade a tração é dividida entre elétrico e diesel em 50% cada. Neste momento foi calculada a energia gasta pelo motor à combustão como mostrado na Figura 20. As baterias desse veículo foram dimensionadas conforme o consumo do seu motor elétrico. O consumo total desse veículo deve-se a soma da energia do motor elétrico com a energia do motor a combustão com eficiência de 30%. A Figura 20 mostra que a quantidade total de energia que gastará um híbrido nesta linha é de 82,85 kWh. O cálculo foi realizado da seguinte maneira:

1. Consumo de energia do veículo pelo motor elétrico até 20 km/h.
2. Divide-se pela metade a energia demandada pelo veículo entre os motores elétrico e a combustão. Nesta fase o consumo total de energia pelo motor a combustão foi de 53,37 kWh.
3. A energia gasta na primeira e segunda etapa do motor elétrico é somada resultando em 29,5 kWh.
4. Dimensiona-se o banco de baterias conforme o consumo de energia do motor elétrico. Assim, nesta fase, foi encontrada uma massa total de 61,5 t.
5. A energia potencial regenerada na linha é calculada, obtendo 0,9 kWh. Vale lembrar que essa energia é aproveitada apenas pelo motor elétrico.
6. Enfim, calcula-se sua demanda total de energia.

O comparativo mostra que o VE é até 3,53 vezes mais econômico que um VC e 2,03 vezes mais econômico que um VHE. Também, pode-se realizar um comparativo de consumo de energia por quilômetro.

As vantagens e benefícios de se utilizar um ônibus elétrico híbrido (HEV) em vez de um elétrico e à combustão são:

- Em relação ao elétrico ele apresenta maior flexibilidade em mudança de rota, podendo esta ser alterada sem a necessidade de realizar novos cálculos de baterias. Isso é possível, pois o motor à combustão pode guiá-lo durante trajeto caso acabe sua fonte de energia elétrica.
- Em relação ao à combustão: o maior e mais impactante fato é o consumo de energia, sendo o PHEV econômico e sustentável (apresenta menor índice de liberação de gases do efeito estufa), e apresentar menor índice de ruído.

Com os cálculos de energia demandada na linha é possível dimensionar baterias para os ônibus elétrico e elétrico híbrido, assim como planejar centrais de recargas.

Outra alternativa é utilizar PHEVs, que não necessitem de gasto de energia do motor à combustão para o recarregamento das baterias. Seu carregamento é efetuado em uma central de recarga com tempos de carregamentos pré-determinados nos seus pontos de paradas, servindo assim de referências para o gerenciamento da concessionária de energia e melhor controle do sistema elétrico de potência.

Vale ressaltar que, os cálculos foram realizados em cenários representativos nem sempre compatíveis com a realidade, tornando, assim, o resultado uma estimativa.

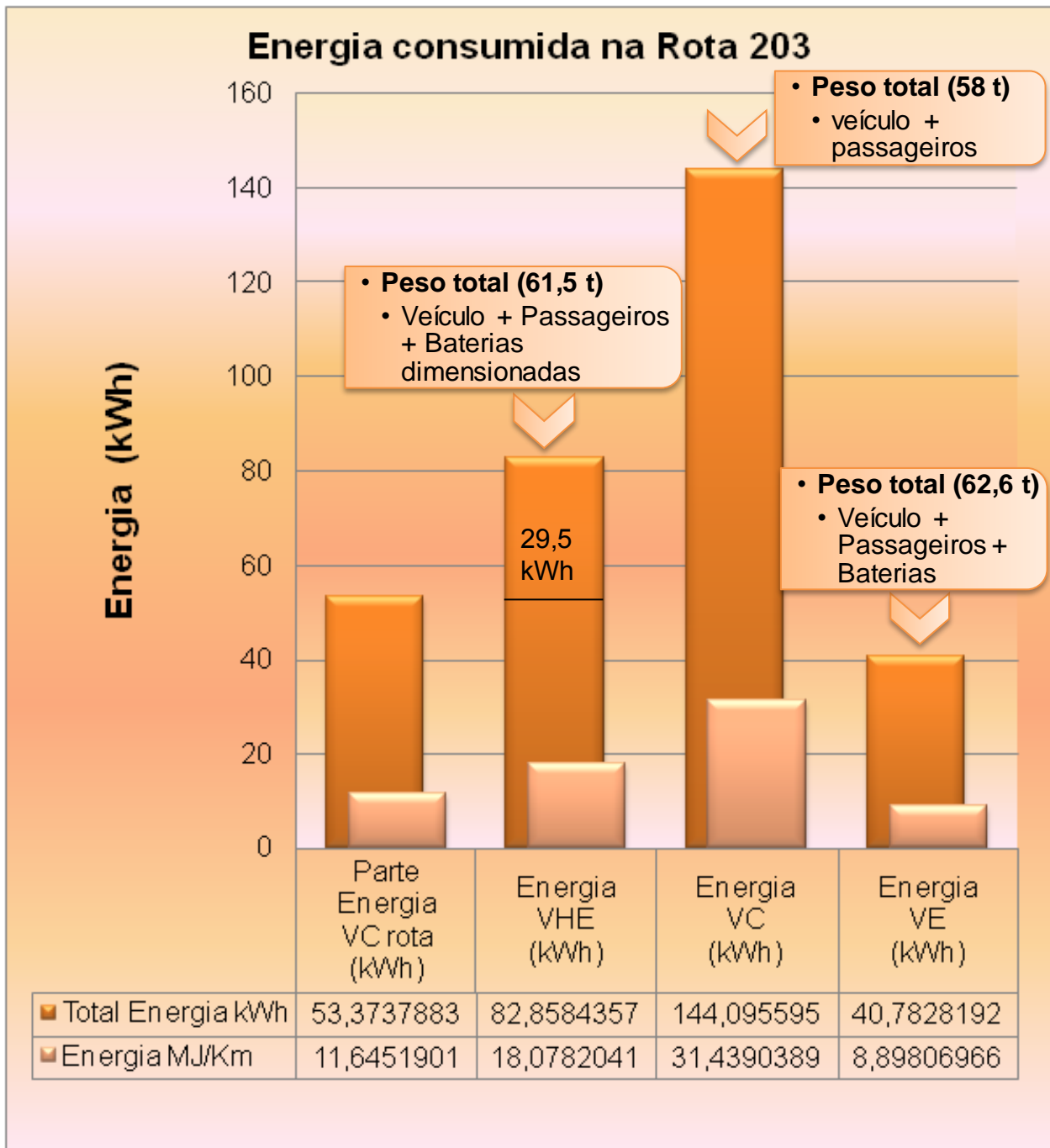


Figura 20 – Energia consumida na Rota 203.
Fonte: Autoria própria, 2014.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho de conclusão de curso apresentou uma análise dos benefícios da implantação de ônibus elétrico híbridos (HEV) na rota 203 da URBS na cidade de Curitiba. Para tanto, foi estudado um modelo de consumo de energia de ônibus a partir a partir de dados coletados da Linha 203, do fabricante de ônibus, e do modelo de operação do BRT para o estabelecimento do ciclo de condução.

Durante seu desenvolvimento, o estudo do funcionamento dos veículos híbridos e sua análise física foram de extrema importância para a compreensão dos fenômenos mecânicos e elétricos utilizados na resolução dos equacionamentos que descrevem o comportamento do veículo na Rota.

Contudo, após a consolidação dos conhecimentos referentes ao método numérico, as principais variáveis foram organizadas na etapa de estudos apresentado no ANEXO 01.

O método aqui utilizado (*Driving Cycle*) de Larmine e Lowry (2003) mostrou-se eficiente para a modelagem do comportamento dinâmico dos veículos elétricos.

Após a coleta de dados, foi possível processar e analisar através de programação de ciclos de condução na Rota o desempenho do veículo em termos de consumo de energia.

Com o intuito de facilitar o estudo, optou-se por utilizar *software* Excel® para o equacionamento e a solução das equações para a rota com auxílio de métodos gráficos e análise dos resultados. O método de cálculo de consumo de energia baseado nestas equações utilizadas por Deborah Perrotta (2012) foi aplicado com os dados das características do veículo e dados coletados em campo para um ciclo de condução. A partir dos resultados obtidos foi feita a aplicação em todos os trechos da Linha 203 da URBS.

É importante ressaltar que todos os cálculos foram realizados levando em consideração o relevo da rota e o modo de condução dos ônibus no cenário mais crítico: ônibus circulando com capacidade total de passageiros e parando em todos os

pontos e semáforos. Se considerado um ônibus vazio ou com menor quantidade de passageiro o valor de economia de energia será maior.

No geral, os resultados desse estudo de caso indicam que um veículo elétrico (VE) ou híbrido (VHE) apresentam mais benefícios ambientais e energéticos do que um à combustão. Entretanto, o elétrico híbrido apresenta melhor versatilidade em relação aos demais.

O curso de engenharia elétrica nos deu base para o entendimento e melhor desenvolvimento dos cálculos envolvidos. Conteúdo de disciplinas relacionadas ao cálculo de erros e de gerenciamento de projetos nos deu base para a coleta dos dados e uma visão mais generalizada do funcionamento dos veículos.

Os estudos realizados durante o trabalho nos deu oportunidade de participar de eventos relacionados à sustentabilidade e desenvolvimento do transporte público mundial, além de reuniões com organizações multinacionais ligadas à área automotiva e troca de ideias com outros pesquisadores que realizam estudos em diferentes localidades do mundo.

Citam-se agora alguns desafios encontrados:

O primeiro desafio foi recolher os dados em campo, a bordo de um biarticulado BRT, onde foram feitas várias coletas percorrendo o trajeto de tempo *stop-and-go* (arrancadas e paradas).

O segundo, e maior desafio, foi criar um simulador ao qual pudéssemos confiar nos resultados obtidos na rota. Para isso, tomamos como base os dados obtidos no artigo de Perrotta et al. (2012), para calcular o erro do simulador, levando em conta as diferenças entre as características dos veículos estudados.

O terceiro, e último desafio, foi analisar e trabalhar com esses dados que nos fez economizar uma grande quantidade de tempo e energia, pois se tratavam de aproximadamente 30 000 dados recolhidos e processados.

5.1. Sugestões Para Trabalhos Futuros

Estes resultados são importantes para o estudo da implantação de centrais de recarga na rota, podendo ser utilizados no dimensionamento mais preciso de banco de baterias destes veículos. Os resultados podem ainda ajudar a reduzir o custo da implantação e aumentar eficiência energética de sistemas de transporte público.

Esse modelo pode ser aplicado para simular outras diferentes linhas de ônibus da URBS.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABVE. **O que é ônibus híbrido**, 2014. Disponível em: <<http://www.abve.org.br/PF/ExibePF.asp?codigo=0003>>. Acesso em: 13 ago. 2014.

BAZANI, Adamo. **Volvo apresenta na Rio +20 o seu primeiro ônibus híbrido fabricado no Brasil**. Ônibus Brasil. 14 jun. 2012. Disponível em: <<http://onibusbrasil.com/blog/2012/06/14/volvo-apresenta-na-rio20-o-seu-primeiro-onibus-hibrido-fabricado-no-brasil/>>. Acesso em: 28 jan. 2014.

BOSCH. **Sistema para veículos híbridos plug-in**. Disponível em: <http://www.bosch-tecnologiaautomotiva.com.br/pt_br/br/powertrain_2/powertrain_systems_for_passenger_cars_3/systems_for_plug_in_hybrid_vehicles_2/systems_for_plug_in_hybrid_vehicles_1.html>. Acesso em: 14 ago. 2014.

BOSCH, R. **Manual de tecnologia automotiva**. São Paulo: Edgard Blücher, 2005.

BRASIL. Lei n.º 17.133, de 25 de Abril de 2012. Lei Estadual de Mudanças Climáticas. **Diário Oficial [da] Republica Federativa do Brasil**, n. 8700, p. 88. Curitiba, Pr, 2012.

EMBARQ BRASIL. **Bus Rapid Transit (BRT)**, 2013. Disponível em: <<http://embarqbrasil.org/BRT>>. Acesso em: 14 ago. 2014.

EUR-Lex. **Redução das emissões poluentes dos veículos ligeiros**. 2014. Disponível em: <<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=URISERV:l28186>>. Acesso em: 18 mar. 2014.

GERULAITES, Carla K. M. **Meio ambiente: Proconve P7. Evolução de emissões para diselpesdo**. FATEC, Santo André, SP, 2012. Disponível em: <<http://www.fatecsantoandre.com.br/semanatec2012/ford.pdf>>. Acesso em: 08 jul. 2015.

LARMINE, James; LOWRY, John. **Electric Vehicle Technology Explained**. Chichester: John Wiley& Sons, 2nd edition, ISBN, 2003.

MARCHIORI, Raphael. **Comec anuncia fim de negociações por tarifa única da RIT**, 2015. Disponível em: <<http://www.gazetadopovo.com.br/vida-e-cidadania/comec->

anuncia-fim-de-negociacoes-por-tarifa-unica-da-rit-eje09l586h068pnxzn7zlpqzy>.

Acesso em 27 de jul. de 2015.

MARTINS, Rafael; PIERRE, Fernanda C. **AVALIAÇÃO DA IMPLANTAÇÃO DA EURO VEM UMA EMPRESA ENCARROÇADORA DE ÔNIBUS. *Tekhne e Logos***, Botucatu, SP, v.4, n.1, p. 5-10, 2013. Disponível em: <<http://www.fatecbt.edu.br/seer/index.php/tl/article/download/167/154>> Acesso em: 05 jul. 2015.

PAREDES, Luis F. **MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA: Generalidades Vehículos Híbridos**. 2014, 13f. Carrera De Ingeniería Mecánica. Universidad de las Furzas Armadas, Ecuador, 2013. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/235545137/Tarea-10-Vehiculos-Hibridos>>. Acesso em: 13 ago. 2014.

PERROTTA, Deborah; MACEDO, Jose L.; Rosseti, Rosaldo J. F., SOUZA, Jorge F., KOKKINOGENIS, Zafeiris, RIBEIRO, Bernardo, AFONSO, Joao L. Route planning for electric buses: a casestudy in Oporto. **Procedia – Social and Behavioral Sciences**. Porto, v.111, p. 1004 – 1014, 2014.

PERROTTA, Deborah; TEIXEIRA, Alexandre; SILVA, Helena; RIBEIRO, Bernardo; AFONSO, João. Electrical Bus Performance Modeling for Urban Environments. **SAE International Journal of Alternative Power**. Detroit, v. 5, n.1, p. 34-45, 2012.

SBC TRANS. **Programas Sociais e Ambientais: Política Ambiental SBC Trans**, 2013. Disponível em: <<http://www.sbctrans.com/empresa/socioambiental.php>>. Acesso em: 29 jan. 2014.

SEBASTIANI, Mariana T. **Modelagem e otimização de estações de recarga para veículos elétricos no transporte público de Curitiba**. Dissertação de mestrado. CPGEI. UTFPR Campus Curitiba, 2014.

REIS, Sueli. **Volvo Bus trará ônibus elétrico híbrido ao Brasil**, 2015. Disponível em: <<http://www.automotivebusiness.com.br/noticia/21832/volvo-bus-trara-onibus-eletrico-hibrido-ao-brasil>>. Acesso em: 27 jul. 2015

SUSTAINABLE ENERGY IRELAND. **A study on the costs and benefits of hybrid electric and battery electric vehicles in Ireland**. 1 ed. AEA Energy & Environment, 2007.

TAYLOR, Samuel P. **Design and Simulation of High Performance Hybrid Electric Vehicle Powertrains**. Tese de Doutorado. West Virginia University, 2001.

UNION OF CONCERNED SCIENTISTS. **How Do Hybrid Cars and Trucks Work?**, 2013. Disponível em: <http://www.ucsusa.org/clean_vehicles/smart-transportation-solutions/advanced-vehicle-technologies/hybrid-cars/how-hybrids-work.html>. Acesso em: 10 ago. 2014.

URBANIZAÇÃO DE CURITIBA S.A. **Institucional: Nossa história | Linha do tempo**. 2014. Disponível em: <<http://www.urbs.curitiba.pr.gov.br/institucional/nossa-historia>>. Acesso em: 08 abr. 2015.

URBS SUSTENTABILIDADE. **Transporte: Sustentabilidade**. 2014. Disponível em: <<http://www.urbs.curitiba.pr.gov.br/transporte/sustentabilidade>>. Acesso em: 08 abr. 2015.

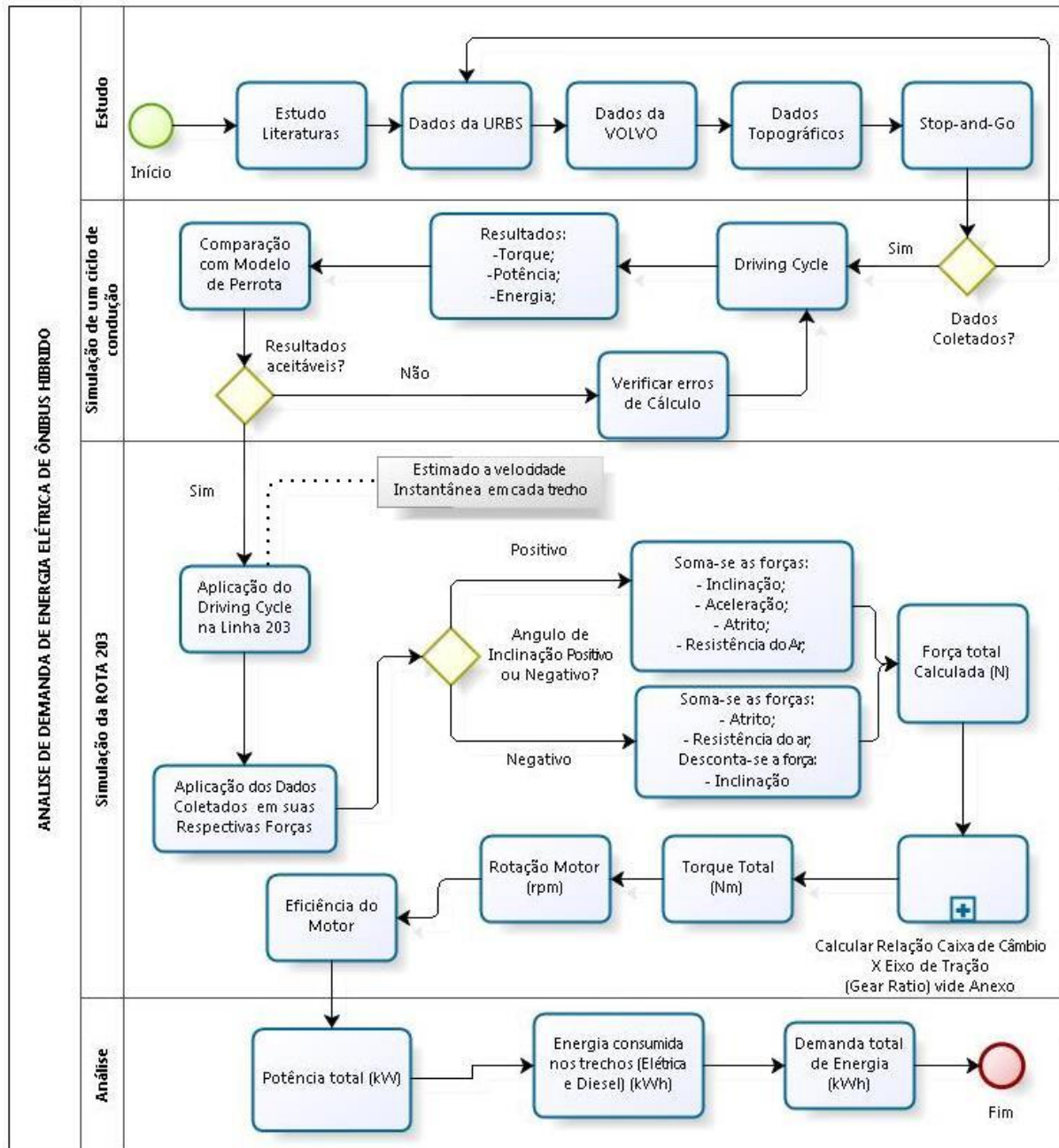
U.S DEPARTMENT OF ENERGY. **Plug-in Hybrids**, 2013. Disponível em: <<http://www.fueleconomy.gov/feg/phevtech.shtml>>. Acesso em: 08 dez. 2013.

VOLVO BUSES. **B340M Articulado e Biarticulado - Urbano EURO 5**. 2015. Disponível em: <<http://www.volvobuses.com/bus/brazil/pt-br/linha-produtos/urbanos/Documents/B340M%20Art%20e%20Biart%20-%20Urbano%20EURO%205.pdf>>. Acesso em: 15 jun. 2015.

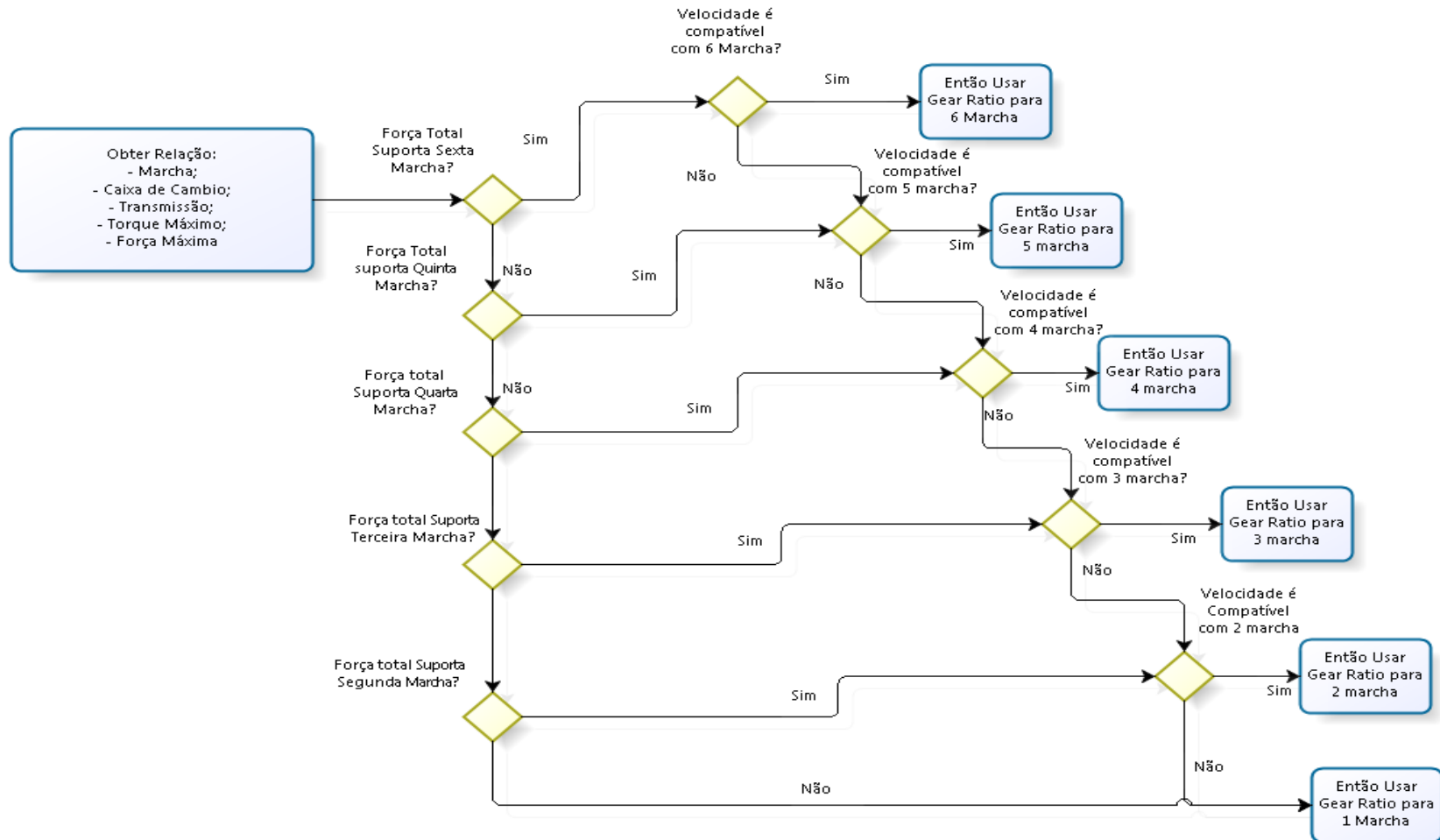
XIN, L. and S.S. Williamson. Comparative Investigation of Series and Parallel Hybrid Electric Vehicle (HEV) Efficiencies Based on Comprehensive Parametric Analysis. In: **Vehicle Power and Propulsion Conference, 2007. VPPC 2007. IEEE**. p. 499-505, 2007.

WRIGHT, Lloyd. HOOK, Walter. **Bus rapid transit planning guide**. Disponível em: <<http://www.nbrti.org/docs/pdf/ITDP%20BRT%20Planning%20Guide.pdf>>. Acesso em: 08 ago. 2014.

ANEXO 01 – Fluxograma Processual Do Trabalho



ANEXO 02 – Fluxograma da relação da troca de marchas



ANEXO 03 – Pontos de Paradas Rota 203 URBS

Linha 203 – Santa Cândida/Capão Raso

- | | | |
|---|---|---|
| 1. Terminal Capão Raso | 27. Estação Tubo Bento Viana | 54. Estação Tubo Passeio Público |
| 2. Semáforo 01 | 28. Semáforo 015 | 55. Semáforo 036 |
| 3. Estação Tubo Herculano de Araújo | 29. Semáforo 016 | 56. Semáforo 037 |
| 4. Estação Tubo Trabalhador | 30. Semáforo 017 | 57. Estação Tubo Maria Clara s38 |
| Estação Tubo Hospital do
Trabalhador | 31. Estação Tubo Coronel Dulcídio | 58. Semáforo 039 |
| 5. Semáforo 02 | 32. Semáforo 018 | 59. Estação Tubo Constantino Marochi |
| 6. Estação Tubo Itajubá | 33. Semáforo 019 | 60. Semáforo 040 |
| 7. Semáforo 03 | 34. Estação Tubo Praça Oswaldo Cruz | 61. Semáforo 041 |
| 8. Semáforo 04 | 35. Semáforo 020 | 62. Semáforo 042 |
| 9. Terminal Portão | 36. Semáforo 021 | 63. Estação Tubo Bom Jesus |
| 10. Semáforo 05 | 37. Semáforo 022 | 64. Semáforo 043 |
| 11. Estação Tubo Carlos Dietzsch | 38. Estação Tubo Alferes Poli -
Catedral da Fé | 65. Semáforo 044 |
| 12. Semáforo 06 | 39. Semáforo 023 | 66. Terminal Cabral |
| 13. Semáforo 07 | 40. Semáforo 024 | 67. Estação Tubo Antônio Cavalheiros |
| 14. Estação Tubo Morretes | 41. Estação Tubo Praça Eufrásio
Correia | 68. Semáforo 046 |
| 15. Estação Tubo Vital Brasil | 42. Semáforo 025 | 69. Estação Tubo Holanda |
| 16. Semáforo 08 | 43. Semáforo 026 | 70. Semáforo 047 |
| 17. Semáforo 09 | 44. Semáforo 027 | 71. Estação Tubo Gago Coutinho |
| 18. Estação Tubo Sebastião Paraná | 45. Semáforo 028 | 72. Semáforo 048 |
| 19. Semáforo 010 | 46. Semáforo 029 | 73. Terminal Boa vista |
| 20. Estação Tubo Dom Pedro I | 47. Semáforo 030 | 74. Semáforo 049 |
| 21. Semáforo 011 | 48. Semáforo 031 | 75. Semáforo 050 |
| 22. Estação Tubo Petit Carneiro | 49. Estação Central | 76. Estação Tubo Antônio Lago |
| 23. Semáforo 012 | 50. Semáforo 032 | 77. Estação Tubo Fernando de
Noronha |
| 24. Semáforo 013 | 51. Semáforo 033 | 78. Semáforo 051 |
| 25. Estação Tubo Silva Jardim | 52. Semáforo 034 | 79. Semáforo 052 |
| 26. Semáforo 014 | 53. Semáforo 035 | 80. Estação Tubo Joaquim Nabuco |
| | | 81. Terminal Santa Cândida |

ANEXO 04 – Planilha de Cálculos Parte 01

		Distância P	Distância e	Distância t	Tempo (s)	Velocidade (m/s)	altura ini.	altura fin.	distância e	Ângulo d	Força total (N)	Torque (N.m)
1	Terminal Capão Raso	0	290	290	0	0	936	935	70	-0,0143	0,0	-
2		10	280	290	5,364417808	3,728270376	936	935	70	-0,0143	35317,7	753,60
3		20	270	290	7,586432418	5,272570531	936	935	70	-0,0143	35512,0	1.250,10
4		30	260	290	9,291444196	6,457553716	936	935	70	-0,0143	35683,8	1.256,14
5		40	250	290	10,72883562	7,456540753	936	935	70	-0,0143	35843,9	1.261,78
6		50	240	290	11,99520288	8,336666	936	935	70	-0,0143	35996,6	1.267,16
7		60	230	290	13,1400864	9,132360045	936	935	70	-0,0143	36144,1	1.272,35
8		70	220	290	14,19291545	9,864076237	936	935	70	-0,0143	36287,5	1.277,40
9		80	210	290	15,17286484	10,54514106	935	937	210	0,00952	49961,1	1.066,06
10		90	200	290	16,07295485	11,11	935	937	210	0,00952	9772,3	982,16
11		100	190	290	16,97304485	11,11	935	937	210	0,00952	9772,3	982,16
12		110	180	290	17,87313486	11,11	935	937	210	0,00952	9772,3	982,16
13		120	170	290	18,77322487	11,11	935	937	210	0,00952	9772,3	982,16
14		130	160	290	19,67331488	11,11	935	937	210	0,00952	9772,3	982,16
15		140	150	290	20,57340489	11,11	935	937	210	0,00952	9772,3	982,16
16		150	140	290	21,4734949	11,11	935	937	210	0,00952	9772,3	982,16
17		160	130	290	22,37358491	11,11	935	937	210	0,00952	9772,3	982,16
18		170	120	290	23,27367492	11,11	935	937	210	0,00952	9772,3	982,16
19		180	110	290	24,17376493	11,11	935	937	210	0,00952	9772,3	982,16
20		190	100	290	25,07385494	11,11	935	937	210	0,00952	9772,3	982,16
21		200	90	290	25,97394494	11,11	935	937	210	0,00952	9772,3	982,16
22		210	80	290	26,87403495	11,11	935	937	210	0,00952	9772,3	982,16
23		220	70	290	27,77412496	11,11	935	937	210	0,00952	9772,3	982,16
24		230	60	290	28,67421497	11,11	935	937	210	0,00952	9772,3	982,16
25		240	50	290	29,57430498	11,11	935	937	210	0,00952	9772,3	982,16
26		250	40	290	30,47439499	11,11	935	937	210	0,00952	9772,3	982,16
27		260	30	290	31,440277	9,59646289	935	937	210	0,00952	0,0	-
28		270	20	290	32,59030862	7,794363348	935	937	210	0,00952	0,0	-
29		280	10	290	34,10343624	5,423292358	935	937	210	0,00952	0,0	-
30	s1	290	0	290	0	0	935	937	210	0,00952	0,0	-
31		300	100	100	5,364417808	3,728270376	937	935	140	-0,0143	35317,7	753,60
32		310	90	100	7,586432418	5,272570531	937	935	140	-0,0143	35512,0	1.250,10
33		320	80	100	9,291444196	6,457553716	937	935	140	-0,0143	35683,8	1.256,14
34		330	70	100	10,72883562	7,456540753	937	935	140	-0,0143	35843,9	1.261,78
35		340	60	100	11,99520288	8,336666	937	935	140	-0,0143	35996,6	1.267,16
36		350	50	100	13,1400864	9,132360045	937	935	140	-0,0143	36144,1	1.272,35
37		360	40	100	14,19291545	9,864076237	937	935	140	-0,0143	0,0	-
38		370	30	100	15,30491292	8,121576202	937	935	140	-0,0143	0,0	-
39		380	20	100	16,73292819	5,883876273	937	935	140	-0,0143	0,0	-
40		390	10	100	19,33203428	1,811077028	937	935	140	-0,0143	0,0	-
41	ET Herculano	400	380	380	0	0	937	935	140	-0,0143	0,0	-

ANEXO 05 – Planilha de Cálculos Parte 02

	Rotação do	Eficiência d	Potência (kW)	Energia Trecho (kwh)	Parte Energia VC rota (kwh)	Energia VHE (kwh)	Energia VC (kwh)	Energia VE (kwh)
1	0	0,638	0	0	0	0	0	0
2	997,40677	0,8575071	99,77428011	0,148675257	0	0,148675257	0	0
3	494,04917	0,7541898	93,21238301	0,057533132	0	0,057533132	0	0
4	605,08419	0,7782872	111,1619156	0,052647882	0,026323941	0,026323941	0	0
5	698,69104	0,7980277	125,7454249	0,050207054	0,025103527	0,025103527	0	0
6	781,16033	0,8149837	138,2491819	0,048631733	0,024315866	0,024315866	0	0
7	855,71827	0,829962	149,3203317	0,04748733	0,023743665	0,023743665	0	0
8	924,28137	0,8434415	159,3365417	0,046598372	0,023299186	0,023299186	0	0
9	988,09834	0,8557344	140,1151013	0,038140474	0,019070237	0,019070237	0	0
10	1041,0266	0,8657446	134,4298552	0,033610825	0,016805412	0,016805412	0	0
11	1041,0266	0,8657446	134,4298552	0,033610825	0,016805412	0,016805412	0	0
12	1041,0266	0,8657446	134,4298552	0,033610825	0,016805412	0,016805412	0	0
13	1041,0266	0,8657446	134,4298552	0,033610825	0,016805412	0,016805412	0	0
14	1041,0266	0,8657446	134,4298552	0,033610825	0,016805412	0,016805412	0	0
15	1041,0266	0,8657446	134,4298552	0,033610825	0,016805412	0,016805412	0	0
16	1041,0266	0,8657446	134,4298552	0,033610825	0,016805412	0,016805412	0	0
17	1041,0266	0,8657446	134,4298552	0,033610825	0,016805412	0,016805412	0	0
18	1041,0266	0,8657446	134,4298552	0,033610825	0,016805412	0,016805412	0	0
19	1041,0266	0,8657446	134,4298552	0,033610825	0,016805412	0,016805412	0	0
20	1041,0266	0,8657446	134,4298552	0,033610825	0,016805412	0,016805412	0	0
21	1041,0266	0,8657446	134,4298552	0,033610825	0,016805412	0,016805412	0	0
22	1041,0266	0,8657446	134,4298552	0,033610825	0,016805412	0,016805412	0	0
23	1041,0266	0,8657446	134,4298552	0,033610825	0,016805412	0,016805412	0	0
24	1041,0266	0,8657446	134,4298552	0,033610825	0,016805412	0,016805412	0	0
25	1041,0266	0,8657446	134,4298552	0,033610825	0,016805412	0,016805412	0	0
26	1041,0266	0,8657446	134,4298552	0,033610825	0,016805412	0,016805412	0	0
27	899,20552	0,8385443	0	0	0	0	0	0
28	730,34561	0,8045843	0	0	0	0	0	0
29	508,17207	0,7572959	0	0	0	0	0	0
30	0	0,638	0	0	0	0	0	1,061305258
31	997,40677	0,8575071	99,77428011	0,148675257	0	0,148675257	0	0
32	494,04917	0,7541898	93,21238301	0,057533132	0	0,057533132	0	0
33	605,08419	0,7782872	111,1619156	0,052647882	0,026323941	0,026323941	0	0
34	698,69104	0,7980277	125,7454249	0,050207054	0,025103527	0,025103527	0	0
35	781,16033	0,8149837	138,2491819	0,048631733	0,024315866	0,024315866	0	0
36	855,71827	0,829962	149,3203317	0,04748733	0,023743665	0,023743665	0	0
37	924,28137	0,8434415	0	0	0	0	0	0
38	761,00604	0,8108776	0	0	0	0	0	0
39	551,3296	0,7667135	0	0	0	0	0	0
40	1114,1247	0,879293	0	0	0	0	0	0
41	0	0,638	0	0	0	0	0	0,405182388