

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

Luciano Bonato Baldissera

**ANÁLISE DO IMPACTO DA UTILIZAÇÃO DO TRANSPORTE
ELÉTRICO COLETIVO NO SISTEMA ELÉTRICO DE DISTRIBUIÇÃO**

**Santa Maria, RS
2016**

Luciano Bonato Baldissera

**ANÁLISE DO IMPACTO DA UTILIZAÇÃO DO TRANSPORTE ELÉTRICO
COLETIVO NO SISTEMA ELÉTRICO DE DISTRIBUIÇÃO**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Elétrica**

Orientador: Prof.^a Dr.^a. Alzenira da Rosa Abaide

Santa Maria, RS
2016

© 2016

Todos os direitos autorais reservados a Luciano Bonato Baldissera. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

E-mail: lucianobonato@bol.com.br

Luciano Bonato Baldissera

**ANÁLISE DO IMPACTO DA UTILIZAÇÃO DO TRANSPORTE ELÉTRICO
COLETIVO NO SISTEMA ELÉTRICO DE DISTRIBUIÇÃO**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Elétrica**

Aprovado em 26 de agosto de 2016:

Alzenira da Rosa Abaide, Dra. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

José Wagner Maciel Kaehler, Dr. (UNIPAMPA)

Luciane Neves Canha, Dra. (UFSM)

Santa Maria, RS
2016

RESUMO

ANÁLISE DO IMPACTO DA UTILIZAÇÃO DO TRANSPORTE ELÉTRICO COLETIVO NO SISTEMA ELÉTRICO DE DISTRIBUIÇÃO

AUTOR: Luciano Bonato Baldissera
ORIENTADORA: Alzenira da Rosa Abaide

O transporte elétrico coletivo atualmente pode ser considerado como uma das melhores alternativas para a redução da concentração de poluentes em centros urbanos, pois reduz o número de veículos em circulação e elimina a maioria dos problemas decorrentes do uso de combustíveis fósseis. Atualmente, neste tipo de alternativa existe uma vasta gama de opções disponíveis, entretanto, com o avanço ocorrido nos últimos anos em termos de tecnologia de baterias, os ônibus elétricos puros vem se destacando devido a vantagens relacionadas a sua flexibilidade, sustentabilidade e adaptabilidade as infraestruturas existentes. Porém a utilização destes veículos requer estações de recarga especiais, as quais causam um impacto significativo nos sistemas elétricos, pois geram um grande acréscimo de demanda de energia, o que em alguns casos pode sobrecarregar os sistemas. Além disso, a elevada quantidade de energia necessária para a operação destes veículos inviabiliza o uso da tecnologia em determinados locais, pois requer um alto investimento em infraestrutura para o fornecimento seguro e confiável de energia. Baseado nisto, esta dissertação apresenta um estudo do impacto gerado no sistema elétrico de distribuição ocasionado pela substituição de uma frota de ônibus a diesel por ônibus elétricos em uma cidade de pequeno porte situada no sul do Brasil. O estudo foi baseado na mensuração do consumo energético através de dados relacionados às linhas e ao ciclo de condução dos veículos, aplicados em um modelo de ônibus elétrico, o qual foi elaborado através do software Matlab®. Foram utilizados dados reais das distâncias nas linhas, velocidades, relevo das vias, número de passageiros, entre outros, obtidos através de um equipamento de GPS e informações fornecidas pela empresa analisada. Ao final foram gerados valores relacionados ao consumo dos veículos em cada uma das linhas, o acréscimo de consumo de energia elétrica gerado pela substituição em questão e uma estimativa das curvas de carga diárias baseadas nos horários de operação das linhas analisadas.

Palavras chave: Ônibus elétricos. Transporte público. Sistema de elétrico de distribuição.

ABSTRACT

ANALYSIS OF THE IMPACT OF THE USE OF THE COLLECTIVE ELECTRIC TRANSPORT IN THE ELECTRICAL DISTRIBUTION SYSTEM

AUTHOR: Luciano Bonato Baldissera

ADVISOR: Alzenira da Rosa Abaide

The collective electric transport can be considered as one of the best alternatives to reduce the concentration of pollutants in urban centers, because it reduces the number of vehicles in circulation and eliminates most of the problems arising from the use of fossil fuels. Currently, in this alternative, there is a wide range of options available, however, with the advancement occurred in recent years in terms of battery technology, the pure electric bus has stood out due to advantages related to its flexibility, sustainability and adaptability to the existing infrastructure. However, the use of these vehicles requires special recharging stations, which drain a lot of energy of the grid, in a short time, a feature that generates a significant impact on electrical systems. Moreover, the high amount of energy required for the operation of these vehicles precludes the use of technology in certain places, because it requires large investments in infrastructure for power supply, which often do not is available locally in the short term. Based on this, this dissertation presents a study of the impact generated in the electrical distribution system caused by the replacement of a diesel bus fleet by electric buses in a small town in southern Brazil. The study was based on the measurement of energy consumption through data related to the lines and the vehicle driving cycle, applied to an electric bus model, it was developed with Matlab software. Actual data of the lines was used, as distance, speeds, tilt, number of passengers, among others, obtained through a GPS equipment and information provided by the company analyzed. At the end were generated values related to the energy consumption of vehicles in each of the lines, the electricity consumption increase generated by the substitution in question and an estimate of the daily load curves based on the operating hours of the analyzed lines.

Keywords: Electric Bus. Public Transport. Electrical Distribution System.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução da frota no transporte coletivo de passageiros no Brasil	12
Figura 2 - Exemplos de fabricantes de ônibus elétricos no mundo	33
Figura 3 - Sistema de recarga condutiva com cabo plug-in “Off Board” (lenta)	38
Figura 4 - Sistema de recarga condutiva com pantógrafo (rápida).....	38
Figura 5 - Sistema de carregamento indutivo dinâmico	39
Figura 6 – Sistema elétrico de potência (SEP) e sua hierarquia	42
Figura 7 - Perfil de carga típico com uma estação de recarga rápida de 500kW	44
Figura 8 - Perfil de carga típico com várias estações de recarga rápida de 500kW	44
Figura 9 - Perfil de carga em 4 cenários distintos em um sistema de recarga rápida	47
Figura 10 - Principais forças consideradas no modelo utilizado	50
Figura 11 - Modelo de simulação implementando no ambiente Simulink do Matlab®	55
Figura 12 – Metodologia utilizada	56
Figura 13 - Ônibus elétrico BYD Ebus K9	62
Figura 14 - Estação de recarga BYD modelo EVA080KG3806/01	63
Figura 15 - Itinerário das linhas de ônibus que atendem o município de Ijuí.....	65
Figura 16 - Traçado, elevação e ciclo de condução da rota Alvorada/Modelo.....	68
Figura 17 - Consumo energético das linhas em dias úteis e finais de semana	69
Figura 18 - Estimativa da curva de carga mensal	70
Figura 19 - Estimativa da curva de carga diária em dias úteis	71
Figura 20 - Estimativa da curva de carga diária nos sábados.....	72
Figura 21 - Estimativa da curva de carga diária nos domingos	72
Figura 22 - Curva de carga em dias úteis do alimentador AL13.....	73
Figura 23 - Curva de carga nos sábados do alimentador AL13	73
Figura 24 - Curva de carga diária nos domingos do alimentador AL13.....	74
Figura 25 - Demanda do alimentador AL13 em dias úteis com a utilização da frota	74
Figura 26 - Demanda do alimentador AL13 nos sábados com a utilização da frota	75
Figura 27 - Demanda do alimentador AL13 nos sábados com a utilização da frota.....	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Exemplos de ônibus elétricos puros disponíveis comercialmente.....	34
Tabela 2 - Vantagens e desvantagens dos sistemas de recarga lenta	36
Tabela 3 - Vantagens e desvantagens dos sistemas de recarga rápida	37
Tabela 4 - Características dos ônibus a diesel utilizados pela empresa	61
Tabela 5 - Comparação entre os modelos BYD K9 e Marcopolo M.Benz 1721	63
Tabela 6 - Especificações da estação de recarga EVA080KG3806/01.....	64
Tabela 7 - Linhas de ônibus urbanos convencionais analisadas.....	66
Tabela 8 - Número de viagens diárias efetuadas em dias úteis por cada linha	66
Tabela 9 - Número de viagens diárias efetuadas nos sábados por cada linha	67
Tabela 10 - Número de viagens diárias efetuadas nos domingos por cada linha	67
Tabela 11 - Consumo energético mensal por linha obtido na simulação	70

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANTP	Associação Nacional de Transportes Públicos
DEMEI	Departamento Municipal de Energia Elétrica de Ijuí
GPS	Global Position System
SEP	Sistema Elétrico de Potência
UFSM	Universidade Federal de Santa Maria
VEs	Veículos Elétricos
VLT	Veículo Leve sobre Trilhos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	CARACTERIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA	11
1.2	OBJETIVOS.....	13
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	O TRANSPORTE ELÉTRICO COLETIVO NO BRASIL.....	16
2.2	IMPACTO DO USO DO TRANSPORTE ELÉTRICO.....	18
2.3	EXEMPLOS DE SISTEMAS DE TRANSPORTE ELÉTRICO COLETIVO	20
2.3.1	Veículo Leve Sobre Trilhos.....	20
2.3.2	Metrôs.....	21
2.3.3	Monotrilhos	21
2.3.4	Aeromóvel	22
2.3.5	Trólebus.....	23
2.3.6	Ônibus Elétricos Puros	24
2.4	VANTAGENS DO USO DE ÔNIBUS ELÉTRICOS PUROS	25
2.5	MODELO DE CONSUMO ENERGÉTICO DE UM ÔNIBUS ELÉTRICO	26
2.6	RESUMO DO CAPÍTULO.....	28
3	OS ÔNIBUS ELÉTRICOS PUROS E O SEP	29
3.1	O USO DOS ÔNIBUS ELÉTRICOS PUROS NO BRASIL E NO MUNDO.....	29
3.2	COMPONENTES BÁSICOS DE UM ÔNIBUS ELÉTRICO PURO	30
3.2.1	Sistema De Armazenamento De Energia.....	30
3.2.2	Controlador/Conversor De Potência.....	31
3.2.3	Sistema De Tração.....	32
3.3	MODELOS DE ÔNIBUS ELÉTRICOS PUROS DISPONÍVEIS	32
3.4	SISTEMAS DE RECARGA PARA ÔNIBUS ELÉTRICOS PUROS.....	35
3.4.1	Sistemas De Recarga Lenta:.....	35
3.4.2	Sistemas De Recarga Rápida	36
3.4.3	Sistemas De Recarga Condutivos.....	37
3.4.4	Sistemas De Recarga Indutivos	39
3.5	NORMAS E PADRÕES APLICÁVEIS AOS SISTEMAS DE RECARGA	40
3.6	IMPACTO DO USO DOS ÔNIBUS ELÉTRICOS PUROS NO SEP	41
3.7	RESUMO DO CAPÍTULO.....	48
4	MODELO VEICULAR E METODOLOGIA UTILIZADA.....	49
4.1	MODELAGEM MATEMÁTICA DO CONSUMO ENERGÉTICO VEICULAR...	49
4.1.1	Força De Atrito Ao Movimento	50
4.1.2	Força De Arrasto Aerodinâmico.....	51
4.1.3	Força De Inclinação	51

4.1.4	Força De Inércia	52
4.1.5	Consumo Energético	52
4.2	APLICAÇÃO PRÁTICA.....	54
4.3	MODELO DE SIMULAÇÃO PROPOSTO.....	55
4.4	DETERMINAÇÃO DAS CURVAS DE CARGA.....	57
4.5	RESUMO DO CAPÍTULO.....	58
5	ESTUDO DE CASO	59
5.1	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA.....	59
5.2	EMPRESA ANALISADA.....	60
5.3	ÔNIBUS ELÉTRICO UTILIZADO NA SIMULAÇÃO.....	61
5.4	ROTAS ANALISADAS.....	64
5.5	RESULTADOS OBTIDOS.....	68
5.6	RESUMO DO CAPÍTULO.....	76
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	77
6.1	CONCLUSÕES.....	77
6.2	TRABALHOS FUTUROS.....	79
6.3	TRABALHOS PUBLICADOS.....	79
	REFERÊNCIAS	81

1 INTRODUÇÃO

1.1 CARACTERIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA

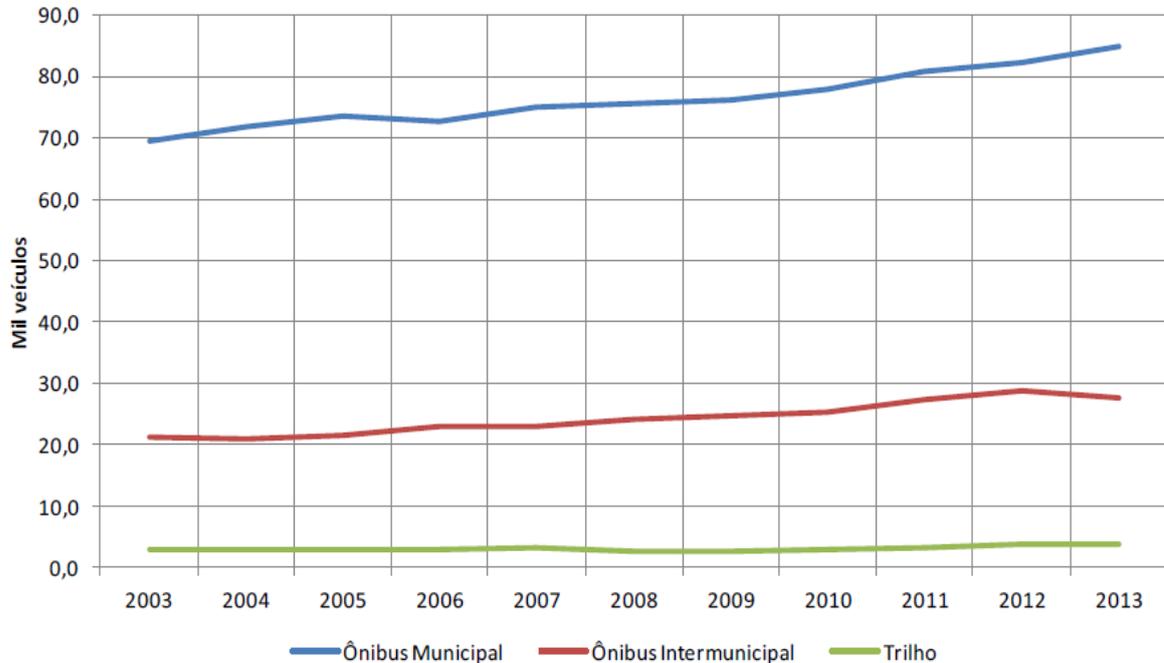
O setor de transportes no Brasil é responsável por grande parte das emissões de poluentes na atmosfera, representando uma parcela correspondente a quase o total emitido por todos os demais setores (EPE, 2015). Isto se deve a utilização de uma malha de transportes baseada no setor rodoviário, composto em sua maioria por veículos movidos com motores a combustão. Mais especificamente no setor de transportes de passageiros, segundo o relatório elaborado pela Associação Nacional de Transportes Públicos (ANTP) têm-se que, no ano de 2013, do total de viagens efetuadas pela população, 29% foram realizadas através do setor de transporte público, das quais, 20% utilizaram ônibus municipais como meio de transporte (ANTP, 2015a). Como estes ônibus na maioria das cidades brasileiras utilizam como combustível o óleo diesel e se limitam a áreas urbanas, o uso destes veículos gera uma elevada concentração de poluentes em locais com alta densidade populacional, ocasionando problemas que afetam não só a saúde pública, mas também a qualidade de vida nas grandes cidades, além de contribuir significativamente para a elevação da temperatura nestas regiões (CARVALHO, 2011).

Diante do exposto, fica evidente que o uso do óleo diesel nos ônibus municipais é responsável por grande parte dos problemas oriundos da poluição atmosférica e suas doenças relacionadas. Outrossim, se analisados dados históricos, percebe-se que, no Brasil, a frota de ônibus municipais, no período correspondente aos anos de 2003 a 2013 se manteve em ascensão, ao contrário dos demais meios de transporte apresentados (ANTP, 2015b), conforme ilustrado na Figura 1. Com base nisto, é notável que a busca por novas alternativas para o transporte coletivo urbano no Brasil faz-se necessária, dado que fatores como a redução da produtividade das empresas ocasionada por doenças ou mortes, a baixa qualidade de vida e a utilização dos sistemas de saúde são igualmente pagos pela sociedade, refletindo, não só indireta, mas também diretamente, na viabilidade econômica de novas tecnologias (CARVALHO, 2011).

Entretanto, dentre as alternativas atualmente existentes para a melhoria dos serviços de transportes urbanos, pode-se afirmar que, a associação da utilização do transporte coletivo com a substituição de combustíveis fósseis pela eletricidade é uma

das alternativas que se apresenta como a mais promissora, pois reduz os congestionamentos causados pelo excesso de automóveis e, ao mesmo tempo, na maioria dos casos, não emite poluentes (PETZHOLD, 2013).

Figura 1 - Evolução da frota no transporte coletivo de passageiros no Brasil



Fonte: (ANTP, 2015b)

Muitas opções de transporte elétrico coletivo já existem há vários anos, e são utilizadas em grandes metrópoles, como, por exemplo, os monotrilhos, os metrô e alguns sistemas de ônibus elétricos com redes aéreas, os quais já operam em cidades no mundo todo (MARTINS, 2012). Embora estas tecnologias sejam consideradas limpas, muitas vezes, são limitadas a grandes metrópoles, devido ao alto custo de implantação e a necessidade de complexas infraestruturas, características que as tornam inviáveis em locais onde o volume de passageiros transportados é pequeno, como no caso de pequenas cidades (SISTRAN ENGENHARIA, 2014). Entretanto, nos últimos anos foram desenvolvidos vários meios de transporte alternativos, flexibilizando a sua utilização e possibilitando o atendimento de menores concentrações populacionais. Um exemplo disto são os ônibus elétricos puros, os quais, até a alguns anos atrás, limitavam-se a protótipos, porém, com o avanço da eletrônica e dos sistemas de armazenamento, tornaram-se uma tecnologia viável, técnica e economicamente, mesmo em pequenas cidades (SISTRAN ENGENHARIA, INECO E INECO DO BRASIL, 2014).

Desta forma, principalmente no caso dos ônibus municipais, esta migração de modelos a diesel por elétricos viria de forma a contribuir, significativamente, para a redução da emissão de poluentes em centros urbanos. Contudo, a migração em massa de uma tecnologia para a outra impactaria, de forma significativa, no sistema elétrico local, elevando a demanda de energia elétrica a valores consideráveis (FERNANDEZ, PEDRAZA, *et al.*, 2015). Diante disso, estudos preliminares são necessários como forma de se obter uma mensuração do impacto decorrente da utilização dos ônibus elétricos, posto que, tendo em vista as características do sistema elétrico de determinadas regiões, uma substituição parcial, ou mesmo total, de uma frota de ônibus não seria suportada pelo sistema elétrico local, inviabilizando, em alguns casos, a utilização desta tecnologia.

Outro fator importante a ser considerado é o tipo de topologia a ser empregada nos sistemas de recarga destes ônibus, pois existem inúmeras alternativas disponíveis, sendo necessária uma análise mais específica de cada topologia, a fim de se obter a melhor distribuição de carga no sistema, possibilitando assim uma operação mais confiável e segura (DYKE, SCHOFIELD e BARNES, 2010). Além do mais, futuramente, não se deve descartar a possibilidade de inserção das “smart grids” no sistema elétrico brasileiro, o que possibilitaria o gerenciamento da demanda de energia, juntamente com o controle das frotas de ônibus elétricos, operando de forma integrada. Assim, os mecanismos de carregamento destes veículos seriam adaptados as demandas do sistema elétrico, mantendo um melhor aproveitamento das linhas de transmissão e distribuição locais (SINHUBER, ROHLFS e SAUER, 2010).

1.2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo principal apresentar uma análise do impacto ocasionado em um sistema elétrico de distribuição, decorrente da substituição de uma frota de ônibus convencionais movidos a óleo diesel por modelos puramente elétricos. A análise apresentada tomou como base a cidade de Ijuí, localizada na região sul do Brasil, sendo utilizados dados reais, relacionados à demanda e funcionamento do transporte público local, como velocidade dos ônibus, rotas, relevos, número de paradas, número de passageiros transportados, número de linhas, etc. Para a análise da substituição das tecnologias, foi prevista a utilização de um veículo elétrico que se enquadrasse na demanda diária da empresa e fosse

semelhante aos modelos atualmente utilizados, considerando aspectos como potência, dimensões físicas e capacidade de passageiros. Além disso, a escolha do modelo simulado também considerou, dentre outras, características como a facilidade de aquisição, maturidade da tecnologia e compatibilidade com a infraestrutura atualmente utilizada na empresa.

Definidos os dados iniciais e escolhido o modelo do ônibus elétrico a ser utilizado, com vistas a mensurar a energia consumida em cada trajeto e efetuar uma previsão das curvas de carga no sistema de distribuição, foi elaborada uma metodologia, a qual foi baseada nas equações apresentadas por (LARMINIE e LOWRY, 2012) e (PERROTTA, TEIXEIRA, *et al.*, 2012). Utilizando o auxílio do software Matlab®, foi obtida a quantidade de energia total necessária para a operação da frota de ônibus elétricos considerada no estudo, o que possibilitou quantificar o suposto acréscimo de demanda de energia decorrente da substituição da frota, no alimentador AL13 do Departamento Municipal de Energia Elétrica de Ijuí, o qual é a atual opção de fornecimento de energia para a empresa de transportes considerada no estudo. Finalizada a análise e o acondicionamento dos dados, após a aplicação da metodologia proposta, foram obtidos, como resultado final, valores aproximados referentes as curvas de carga acrescidas no sistema de distribuição, considerando os horários de operação de cada uma das rotas analisadas. Através dos valores obtidos, foi possível a análise do impacto ocasionado, tomando como principal fator impactante o acréscimo no consumo de energia demandado no sistema de distribuição local.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Para a abordagem do assunto em questão, a presente dissertação foi estruturada em seis capítulos. No capítulo 1, é feita uma introdução ao trabalho, apresentando seus objetivos, justificativa, motivação, relevância e a organização do documento. Já no capítulo 2, é apresentada uma revisão bibliográfica relacionada ao transporte elétrico coletivo, iniciando com um breve histórico, sua situação no Brasil, e seus impactos relacionados. Também são apresentadas algumas das tecnologias atualmente disponíveis, as principais vantagens relacionadas aos ônibus elétricos, e após, são citados alguns modelos matemáticos de veículos elétricos disponíveis na literatura. Os ônibus elétricos puros, as tecnologias de carregamento, normas e os possíveis impactos ocasionados no SEP são abordados no capítulo 3. A metodologia

aplicada na elaboração do trabalho, o modelo de simulação e o levantamento dos dados necessários ao trabalho são abordados no capítulo 4. No quinto capítulo é apresentado o estudo de caso, relacionando as informações referentes a empresa utilizada na análise, ao veículo elétrico escolhido para a simulação, bem como os demais dados coletados e os resultados obtidos através da simulação. Por fim, no capítulo 6 são efetuadas as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentado um breve histórico do transporte elétrico coletivo e sua utilização no Brasil, seguido de uma abordagem sucinta dos impactos relativos a utilização do transporte elétrico. Na sequência, são apresentados alguns dos sistemas de transporte elétrico coletivo existentes, sendo citadas suas principais características. Por fim, são feitas algumas considerações sob as vantagens da utilização dos ônibus elétricos puros e ao final são citados alguns modelos matemáticos de consumo energético dos ônibus elétricos puros.

2.1 O TRANSPORTE ELÉTRICO COLETIVO NO BRASIL

O Brasil foi um dos países pioneiros no uso da eletricidade em meios de transporte, sendo o Rio de Janeiro o primeiro local da América Latina a utilizar bondes elétricos. Em 8 de outubro de 1892, o primeiro bonde elétrico do Brasil iniciou sua operação através da Cia. Ferro-Carril do Jardim Botânico, antes mesmo de cidades como Londres, Paris, Madrid, Roma e Lisboa. Também a cidade de Niterói, no Rio de Janeiro, pode ter sido o primeiro lugar no mundo onde um bonde elétrico movido por baterias foi utilizado com sucesso (MORRISON, 1989). Além dos bondes, em 1910 começaram a ser utilizadas locomotivas de corrente alternada trifásicas, e após em 1922, iniciou-se a eletrificação da Companhia Paulista de Estradas de Ferro. Também no Rio de Janeiro, em 1928, entrou em operação o serviço de ônibus elétricos na Avenida Rio Branco. Estes ônibus elétricos, denominados “trólebus”, funcionavam alimentados por redes aéreas, e operavam apenas nos trechos onde não havia bondes, sendo que por não rodarem sobre trilhos, os “trólebus” possuíam mais flexibilidade nas rotas do que os bondes (MARTINS, 2012).

Mais à frente, em 1949, no Rio de Janeiro e em São Paulo foram inaugurados sistemas de trólebus com veículos importados dos Estados Unidos e da Inglaterra. Nesta época os trólebus ameaçavam o monopólio dos bondes no Brasil. As empresas de ônibus disputavam regiões de alta demanda e melhor infraestrutura, enquanto as demais regiões eram abandonadas, ocasionando o sucateamento dos sistemas de bondes. No início da década de 1950, os trólebus começaram a substituir os bondes em muitos locais, aproveitando a infraestrutura de rede e das subestações já existentes. Os bondes já estavam velhos, necessitando substituição, mas só contavam com reformas. Nos oito anos seguintes, passaram a trafegar cada vez mais

lotados e com muitos problemas. A cidade se desenvolvia rapidamente e a malha de trilhos permanecia estagnada (MARTINS, 2012).

Com isto, no ano de 1968, em São Paulo, os bondes foram aposentados, permanecendo em operação nas redes existentes somente os trólebus. No Rio de Janeiro, o bonde de Santa Tereza foi a única linha urbana no país que nunca parou de circular. Naquela época, os trólebus representavam a modernidade, sendo considerados mais confortáveis e ainda tinham a seu favor o fato de não poluírem e emitirem menos ruídos. Porém, com o passar de alguns anos, como os investimentos em sistemas de trólebus eram do setor público, estes foram sendo sucateados devido à falta de manutenção e novos investimentos. As constantes falhas nas conexões elétricas dos veículos com a rede e conseqüentes paradas foram se tornando frequentes, fato que reduzia o interesse dos usuários nestes meios de transporte (FERRO, 2009). Atualmente, os trólebus ainda persistem em alguns locais do Brasil, como por exemplo, na cidade de São Paulo, a qual conta atualmente com 192 trólebus e uma previsão de inserção em sua frota de 60 novos veículos, sendo a maioria com tecnologia que garante 7km de percurso sem rede aérea, eliminando as ocorrências de problemas no trânsito (EMTU, 2015).

Além dos bondes, trens e trólebus, existem no Brasil sistemas de transporte elétrico coletivo como os metrô, os monotrilhos, os veículos leves sobre trilhos (VLTs) e o sistema desenvolvido por um brasileiro implantado na cidade de Porto Alegre denominado "Aeromóvel", porém, se comparados aos meios de transporte tradicionais, estes correspondem a uma parcela pouco significativa. Entretanto, recentemente a tecnologia dos ônibus elétricos puros tem se apresentado como promissora (SISTRAN ENGENHARIA, INECO E INECO DO BRASIL, 2014). Com o intuito de fomentar o uso da tecnologia, fabricantes brasileiros e estrangeiros estão disponibilizando para as empresas de transportes seus modelos elétricos para testes. Cidades como Curitiba, Porto Alegre e São Paulo, por exemplo, já utilizam em algumas linhas os ônibus elétricos puros, em caráter experimental (BYD, 2016). Apesar de na maioria dos casos estes veículos se limitarem aos testes, seus sistemas de recarga cada vez mais eficazes e suas baterias com densidades energéticas em ascensão os torna uma alternativa com grande potencial na substituição dos tradicionais ônibus a diesel (ELETRA INDUSTRIAL LTDA, 2015).

2.2 IMPACTO DO USO DO TRANSPORTE ELÉTRICO

Preocupações relacionadas ao preço dos combustíveis, a dependência de fontes de energia não renováveis, bem como os problemas ambientais associados ao uso de combustíveis fósseis têm atualmente aumentado o interesse no uso de novas alternativas no setor de transportes, como por exemplo, o uso de veículos elétricos (VEs). As vantagens relacionadas ao uso da eletricidade neste setor são claras, tanto em termos de redução nas emissões de poluentes atmosféricos, quanto no aumento do rendimento dos sistemas (SISTRAN ENGENHARIA, 2014). Porém, dada a natureza diferenciada do uso da eletricidade em relação ao uso de combustíveis líquidos neste setor, se faz necessária a introdução de adequações nos sistemas elétricos, além da criação de novos modelos de negócios, de forma a garantir a sua utilização de forma confiável e segura, maximizando o proveito das potencialidades deste novo segmento de mercado (CAMPATELLI, BENESPERI, *et al.*, 2014).

Seja no setor privado, ou em setores públicos, este crescimento no interesse relacionado ao transporte elétrico fica evidenciado através do aumento nas vendas de veículos elétricos ocorrido nos últimos anos. Além disso, esta inserção de novas alternativas não limita-se apenas aos automóveis ou veículos leves, mas também inclui veículos pesados, como trens, caminhões e ônibus. Porém, isto gera vários desafios a serem enfrentados, como a redução dos custos iniciais de aquisição, a necessidade de uma maior disponibilidade de sistemas de carregamento, além dos impactos potenciais na rede elétrica, este último, o qual é o foco deste trabalho (BOULANGER, CHU, *et al.*, 2011).

Tendo em vista uma adoção generalizada de meios de transporte elétricos pelos consumidores ou operadores de frotas a curto ou médio prazo, o aumento na demanda de energia elétrica se tornaria insustentável. Tanto nos sistemas de geração e transmissão, quanto nos sistemas de distribuição, uma inserção de VEs descoordenada e sem limitações geraria impactos extremamente significativos, de forma a inviabilizar o uso da tecnologia (TAYLOR, MAITRA, *et al.*, 2009). Entretanto, mesmo com uma inserção gradativa e controlada de VEs nas frotas atuais, um estudo detalhado de cada caso se faz necessário, tendo em vista que a operação segura e confiável da rede é uma das principais preocupações das concessionárias de energia elétrica, e é intrínseca as características locais de cada região.

Existem muitos estudos relacionados a integração dos VEs aos sistemas elétricos, focados principalmente nos sistemas geração, os quais tem como objetivo prever se a capacidade atual dos sistemas é suficiente para suprir o aumento de demanda de energia, ocasionado por inserções locais de VEs (TAYLOR, MAITRA, *et al.*, 2009). Porém, em nem todos os casos apresentados o maior impacto se dá nos sistemas de geração, tendo em vista que dependendo do tipo de transporte elétrico utilizado, os impactos ocasionados podem ser mais significativos nos sistemas de transmissão e distribuição, como no caso do transporte elétrico coletivo, por exemplo. Nestes sistemas, são necessárias grandes quantidades de energia, as quais são concentradas em um único ponto de conexão, ao contrário do transporte elétrico individual, onde a demanda de energia é distribuída em vários pontos de consumo distribuídos aleatoriamente (CAMPATELLI, BENESPERI, *et al.*, 2014).

Além disso, diferentemente do transporte elétrico individual, os sistemas de transporte elétrico coletivo possuem um comportamento considerado previsível, pois são operados em horários predefinidos e seus pontos de conexão à rede são fixos. Estas características se apresentam vantajosas, pois facilitam o planejamento dos sistemas elétricos e possibilitam uma operação mais econômica, tendo em vista que a compra de energia pode ser efetuada através de contratos de demanda e o consumo de energia da rede pode ser efetuado em períodos fora dos horários de ponta, reduzindo assim as perdas nos sistemas. Desta forma, o uso deste tipo de transporte pode ser adaptado aos sistemas de geração, transmissão e distribuição de forma a causar um menor impacto possível (DYKE, SCHOFIELD e BARNES, 2010).

Entretanto, a mensuração do impacto causado pelo uso dos sistemas de transporte elétrico coletivo está diretamente relacionado à tecnologia utilizada na sua concepção. Isto se deve ao fato de que cada meio utilizado opera de forma distinta, variando na forma de conexão à rede, nos valores correspondentes as potências consumidas, na forma de utilização da energia, etc. Além disso, existem sistemas que operam diretamente alimentados através da rede elétrica, como no caso dos trens ou metrô, ou sistemas que operam através de baterias, como no caso dos ônibus elétricos puros. Isto altera de forma significativa os impactos ocasionados nos Sistemas Elétricos de Potência (SEP), pois a demanda de energia nestes casos se apresenta com comportamentos extremamente diferenciados (SINHUBER, ROHLFS e SAUER, 2010). Tanto nos sistemas ferroviários, quanto nos sistemas rodoviários, existem diversas opções de transporte elétrico disponíveis, variando em capacidade,

custo, velocidade, flexibilidade, etc. Isto torna necessária a análise do impacto ocasionado para cada um dos sistemas, considerando as características inerentes ao local de instalação, pois uma opção que se apresenta viável em determinado local, pode ser totalmente inviável em outro (PETZHOLD, 2013).

2.3 EXEMPLOS DE SISTEMAS DE TRANSPORTE ELÉTRICO COLETIVO

Certamente, a maior vantagem da utilização da eletricidade nos sistemas de transporte está na flexibilidade da escolha da fonte primária de energia, podendo ser ela oriunda de combustíveis fósseis por exemplo, ou mesmo da energia solar, a qual é limpa e renovável. Além disso, como existem várias opções de sistemas deste tipo, os meios utilizados podem ser adaptados as particularidades da região onde será instalado (SISTRAN ENGENHARIA, 2014). Dentre as várias opções existentes no uso da tração elétrica no transporte coletivo, abaixo são citadas algumas tecnologias atualmente disponíveis, sendo apresentadas suas principais características.

2.3.1 Veículo Leve Sobre Trilhos

Os veículos leves sobre trilhos (VLTs) são uma opção intermediária entre os trens e os ônibus, pois combinam vantagens dos dois sistemas, e são considerados por muitos como os “substitutos dos antigos bondes elétricos”. Estes veículos normalmente possuem 3 ou 4 vagões, os quais apesar de possuir uma capacidade de transporte de passageiros inferior à dos metrô, são considerados uma alternativa com um custo bem menor. Sua característica principal é o compartilhamento das vias de tráfego com vias de veículos automotores e pedestres. Normalmente os VLTs possuem sua operação na superfície e são eletricamente alimentados por cabos aéreos, porém em algumas exceções existem sistemas operando em vias subterrâneas, com alimentação através de um terceiro trilho ou mesmo utilizando combustíveis diferentes da eletricidade como o óleo diesel por exemplo (PETZHOLD, 2013).

No Brasil os VLTs estão presentes em poucas cidades, e existem alguns projetos de implantação de novos sistemas, os quais vem sempre acompanhados de uma requalificação urbana ou uma atualização dos sistemas de transportes, porém, limitados a grandes cidades. Atualmente, pode-se citar alguns empreendimentos que estão em fase de projeto ou já na fase de implementação como o VLT da Baixada

Santista, em São Paulo, o VLT de Cuiabá, VLT de Goiânia, Maceió, Brasília e o VLT do Rio de Janeiro (WAISMAN, 2015).

2.3.2 Metrô

Os metrô são sistemas urbanos de transporte de passageiros que se movimentam por vias totalmente isoladas e operam de forma automatizada sobre trilhos (FERRAZ e TORRES, 2004). Podem ser subterrâneos, de superfície ou elevados, sendo considerados como de alta capacidade e possuindo taxas de embarque e desembarque de 3 a 5 vezes maiores do que os VLTs e de 10 a 20 vezes maiores que os ônibus (PETZHOLD, 2013). Em grandes cidades são normalmente vistos como uma alternativa de transporte extremamente eficaz, confiável e segura, e como trafegam em via exclusiva, acabam não interferindo no trânsito dos demais veículos (ANDRADE e D'AGOSTO, 2015). A energia necessária para o funcionamento dos metrô é fornecida através de subestações conectadas a rede elétrica das concessionárias de energia, as quais rebaixam a tensão fornecida e as convertem em níveis de tensão contínua ou alternada, dependendo da tecnologia utilizada.

O maior inconveniente deste sistema está em seu custo elevado devido a necessidade de uma infraestrutura complexa. Além disso, seus níveis de ruído elevados, a propagação de doenças devido à alta concentração de pessoas nos veículos e a sua vulnerabilidade a atividades criminais também são problemas apresentados por este tipo de transporte (PETZHOLD, 2013). Os sistemas de alimentação elétrica dos carros podem ser através do uso de pantógrafos, com redes aéreas, ou através de um terceiro trilho onde sapatas coletoras captam a energia necessária para a sua movimentação. Sua manutenção é complexa e exige frequência nas intervenções devido a necessidade de altos níveis de confiabilidade e disponibilidade, tendo em vista que uma falha em um carro pode comprometer o funcionamento de toda uma linha. Além disso, a manutenção das vias exige veículos especiais e mão de obra extremamente qualificada pois as infraestruturas são de elevada complexidade (PEZERICO, 2002).

2.3.3 Monotrilhos

Os sistemas de transporte por monotrilhos são semelhantes aos trens elétricos ou metrô, porém trafegam sobre vigas, utilizando na maioria dos casos pneus para a tração e sustentação dos vagões. A sua estrutura é normalmente composta por duas

vias elevadas ou a nível do solo, uma de ida e outra de volta. A estrutura de sustentação dos veículos pode ser através de vigas em concreto pré moldado, em trilhos suspensos e invertidos ou através de levitação magnética (DEMERY JR e SETTY, 2008). Dentre as vantagens deste tipo de transporte está a sua reduzida interferência nos sistemas viários, pois utiliza em sua grande maioria espaços existentes em canteiros centrais de avenidas e calçadas. Além disso, estes sistemas possuem um baixo nível de ruído quando comparados aos metrô e ônibus a diesel, boa adaptabilidade aos espaços urbanos, menor risco de descarrilamento, maior capacidade de subir e descer rampas e maior capacidade de curva. Seu tempo de implantação é menor se comparado aos trens e metrô e sua vida média é maior em relação a outros meios de transporte semelhantes. Outra vantagem deste sistema é o baixo risco de acidentes, pois os carros não cruzam com vias de trânsito de veículos automotores, pedestres e demais meios de transporte (SCOMI RAIL CORPORATION, 2016).

Como desvantagens pode-se citar o grande impacto visual ocasionado nos centros urbanos, quando comparado aos metrô ou trens de superfície, seu maior custo de implantação se comparado a outras alternativas como corredores de ônibus ou VLTs, a maior dificuldade de evacuação no caso de uma emergência, maior dificuldade de troca de linha, e uma menor velocidade final se comparado aos metrô (OLIVEIRA, ROSA, *et al.*, 2010). No mundo os sistemas de transporte sobre mon trilhos estão presentes em vários países, como no Japão, nos EUA, na Malásia e recentemente no Brasil, em São Paulo, onde está sendo instalado um sistema de mon trilhos o qual foi fabricado pela empresa Bombardier. O modelo instalado no Brasil é alimentado com uma tensão de 750V, tracionado por motores de ímã permanente, com frenagem regenerativa, possuindo uma velocidade de operação de 80 Km/h (BOMBARDIER, 2016).

2.3.4 Aeromóvel

O sistema de Aeromóvel possui esta denominação pois utiliza o ar como meio de propulsão principal, sendo uma tecnologia desenvolvida no Brasil. Apesar de ter sido idealizado em meados de 1960, no Brasil, o sistema de Aeromóvel se concretizou apenas em 2013, após muitas tentativas e testes, sendo instalado na cidade de Porto Alegre, local de sua invenção. Este sistema baseia-se na tecnologia ferroviária, porém diferencia-se dos metrô e trens por utilizar propulsão pneumática, onde ventiladores

estacionários instalados fora do veículo, o impulsionam, característica que viabiliza a tecnologia, pois reduz drasticamente peso morto a ser movimentado. Apesar de não utilizar a eletricidade diretamente para a propulsão dos veículos, os sistemas do tipo Aeromóvel se classificam como sistemas elétricos de transporte coletivo, pois os ventiladores são acionados através da eletricidade. O seu sistema é composto por uma viga de concreto, na qual existe um duto de ar, um conjunto de ventiladores e uma placa de propulsão, fixada ao veículo, que desliza sobre trilhos (AEROMOVEL BRASIL S.A., 2016).

Seu custo implantação é inferior quando comparado aos sistemas semelhantes, pois o peso do veículo por ser reduzido, faz com que a estrutura de vigas e pilares possa ser menor, reduzindo significativamente os custos. Além disso, a manutenção do sistema é simples, pois a estrutura basicamente é composta por uma passarela, e os seus motores ficam estacionários, o que possibilita uma troca ou manutenção mesmo com o sistema em funcionamento (BRITTO, 2008). O Aeromóvel também apresenta vantagens relacionadas à segurança e a confiabilidade, pois opera com uma redundância nos seus sistemas de tração e freios, além do mais, como o sistema forma um colchão de ar dentro das vigas, a colisão entre dois veículos se torna impossibilitada (AMES, 2014).

2.3.5 Trólebus

Os trólebus são nada mais que ônibus tracionados com motores elétricos alimentados por uma rede elétrica aérea, diferenciando-se dos bondes e metrô por se deslocarem através de pneus e não sobre trilhos. A rede é composta por uma catenária de dois cabos superiores, onde um trólei duplo em forma de duas hastes articuladas fixadas na parte superior dos veículos capta a energia e a envia diretamente ao sistema de tração. Esta característica faz com que o veículo necessite permanecer em contato permanente com a rede, caso contrário, o mesmo fica inoperante. Os atuais modelos de trólebus contam com tecnologias aprimoradas de controle e tração, os tornando mais eficientes e confortáveis que os primeiros modelos desenvolvidos (SISTRAN ENGENHARIA, 2014).

Como todos os outros meios de transporte, o trólebus apresenta vantagens e desvantagens em sua utilização. Sua principal vantagem é sua não emissão de poluentes, se desconsiderada a forma de como é gerada a energia para a sua utilização. Além disso, é um veículo silencioso, possui boa potência nas subidas, é

mais confortável que os veículos movidos com motores a combustão e pode ser utilizado em conjunto com os demais veículos nas vias públicas. Dentre as desvantagens deste sistema está o custo de implantação das redes de alimentação, a impossibilidade de ultrapassagens entre os veículos e as paradas devido à falta de energia ou desconexão das alavancas de alimentação da rede. Estes últimos problemas estão sendo sanados com o surgimento de novas tecnologias de redes aéreas e o armazenamento de energia nos veículos (ELETRA INDUSTRIAL LTDA, 2015). Também pode-se citar como desvantagem a poluição visual ocasionada pelas redes elétricas, as quais devem ser instaladas sobre todo o trajeto de deslocamento destes veículos. O maior empecilho da utilização dos trólebus ainda está no custo da implantação de sua infraestrutura de alimentação. Esta infraestrutura necessária apesar de possuir uma longa vida útil, ainda representa um custo elevado no total do sistema, fato que muitas vezes acaba tornando a tecnologia pouco competitiva quando comparada aos sistemas movidos com motores a diesel. Porém se levados em conta os benefícios ambientais deste sistema e sua vida útil maior o mesmo se torna uma excelente alternativa de transporte (SISTRAN ENGENHARIA, 2014).

2.3.6 Ônibus Elétricos Puros

Os ônibus tracionados por um motor elétrico, ou um conjunto de motores elétricos, alimentados por bancos de baterias são denominados “Ônibus Elétricos Puros” ou simplesmente “Ônibus Elétricos”. Nestes veículos, as baterias são responsáveis pelo armazenamento de energia a bordo, sendo recarregadas por conexões diretas a rede elétrica, painéis solares, ou sistemas indutivos (SISTRAN ENGENHARIA, INECO E INECO DO BRASIL, 2014). Sua operação e seus componentes são semelhantes aos dos trólebus, diferenciando-se apenas em sua forma de alimentação, pois não dependem de uma conexão permanente a rede elétrica, característica que elimina a necessidade da dispendiosa infraestrutura de redes aéreas disposta ao longo das vias para a captação da energia. Seus sistemas de recarga variam, podendo ser do tipo lento, onde o veículo fica em repouso por várias horas até completar a recarga total das baterias, ou do tipo rápido, onde durante paradas nas estações de embarque e desembarque é inserida no veículo uma quantidade de energia suficiente para o deslocamento até o próximo ponto de recarga (SEBASTIANI, 2014).

Pode-se citar como principais vantagens desta tecnologia o seu baixo custo de manutenção, sua operação silenciosa, sua maior eficiência, sua versatilidade e sua não-dependência de complexas infraestruturas. Esta última característica torna a opção dos ônibus elétricos puros umas das mais promissoras no setor de transporte elétrico coletivo, pois os elevados custos de manutenção das infraestruturas, a falta de flexibilidade na alteração de rotas e o desejo de preservação das paisagens urbanas reduzem significativamente a competitividade das demais opções quando comparadas a esta (SINHUBER, ROHLFS e SAUER , 2010).

Porém, os grandes limitadores da popularização destes ônibus elétricos puros estão relacionados aos seus custos de aquisição e a oferta de energia elétrica. Embora subsídios governamentais possam incentivar a substituição dos veículos convencionais a diesel por modelos elétricos, isso pode não ser o suficiente para convencer as empresas de transportes públicos a substituírem suas frotas de uma forma significativa (TOPON e HISASHI, 2014). Além disso, características como a autonomia reduzida destes veículos faz com que sejam necessárias paradas frequentes para a recarga das baterias ou criam em determinadas situações a necessidade de um alto investimento em baterias maiores, fator que eleva mais ainda o custo final dos veículos. Também segundo JANG e KO (2012, p. 1058) a bateria é uma das partes mais caras deste tipo de veículo, em alguns casos representando mais de um terço do valor total do veículo, desta forma, considerando que estes componentes possuem uma vida útil reduzida, a substituição destas baterias ao final de sua vida útil pode elevar ainda mais o custo final, necessitando assim de uma análise cuidadosa em uma migração de tecnologias, pois isto muitas vezes pode inviabilizar o uso desta tecnologia ou reduzir o custo-benefício de forma considerável.

2.4 VANTAGENS DO USO DE ÔNIBUS ELÉTRICOS PUROS

A utilização da eletricidade nos meios de transporte sem dúvidas oferece várias vantagens, podendo-se citar como principais, a não emissão de poluentes, quando utilizadas fontes de energia limpas, e a sua operação silenciosa, pois os ruídos referentes a operação dos motores a combustão são totalmente eliminados. No entanto, considerando os meios de transporte mais populares, por questões de mobilidade, o uso dos ônibus elétricos se apresenta mais vantajoso se comparado ao uso dos automóveis elétricos, pois elimina os congestionamentos em grandes cidades

e aumenta a eficiência energética dos veículos. Além disso, com o avanço tecnológico das baterias atualmente é possível a utilização de ônibus elétricos com autonomias elevadas, podendo alguns modelos operar durante um dia inteiro sem a necessidade de paradas para recarga (PIHLATIE, KUKKONEN, *et al.*, 2014).

Por muitos anos os ônibus elétricos alimentados por redes aéreas, chamados “Trólebus” se mantiveram em operação, pois se apresentavam como única forma viável da tecnologia. Entretanto, estes sistemas apresentam muitos problemas, pois necessitam de complexas estruturas, ocasionam elevada poluição visual e possuem altos custos de manutenção devido as redes, o que desestimula consideravelmente o uso da tecnologia. Porém, nos últimos anos devido ao desenvolvimento de novas tecnologias relacionadas aos ônibus elétricos puros, a migração dos atuais ônibus a combustão e os trólebus para elétricos se apresenta inevitável, e já começou em vários lugares do mundo. Isto se deve ao desenvolvimento de baterias e sistemas de recarga que viabilizam a recarga completa das baterias em períodos extremamente reduzidos, eliminando assim, os longos períodos de paradas para recarga (SINHUBER, ROHLFS e SAUER, 2012).

Estes veículos apresentam a vantagem de serem possíveis de se implantar em locais com demandas de passageiros reduzidas, com itinerários variáveis, e não necessitem de complexas infraestruturas, ao contrário das demais opções. Além disso, devido aos perfis de carga nestes veículos serem conhecidos, a otimização do dimensionamento das baterias, bem como o planejamento ideal dos sistemas elétricos se faz possível, reduzindo os custos de operação e eliminando as possíveis falhas nestes sistemas. Outra vantagem na utilização dos ônibus elétricos no transporte público está relacionada redução dos custos operacionais, pois os motores elétricos apresentam maior eficiência e possuem um menor número de componentes expostos ao desgaste, o que faz com que um dos maiores custos de operação destes veículos, se desconsiderada a energia consumida, sejam as despesas relacionadas aos recursos humanos (PIHLATIE, KUKKONEN, *et al.*, 2014).

2.5 MODELO DE CONSUMO ENERGÉTICO DE UM ÔNIBUS ELÉTRICO

O consumo energético de um ônibus elétrico está relacionado diretamente à sua dinâmica de movimento, sendo dependente das características físicas de cada um de seus componentes e do meio onde o mesmo se desloca (TOPON e HISASHI,

2014). Para a determinação de sua energia consumida existem vários métodos apresentados na literatura, os quais variam entre complexos modelos matemáticos, considerando detalhadamente o efeito individual de cada componente, a modelos simplificados, os quais levam em conta apenas as principais forças exercidas. O modelo apresentado por Larminie e Lowry (2012, p. 184) , por exemplo, considera na mensuração do consumo energético de veículos elétricos apenas quatro principais forças, sendo a força de atrito, a força de arrasto aerodinâmico, a força de inclinação e a força de inércia. Esta simplificação tem como objetivo a elaboração de um modelo matemático reduzido, passível de ser aplicado em programas computacionais simples, sem a necessidade de técnicas avançadas de programação.

Este modelo apresentado é utilizado por Perrota (2012), por exemplo, na determinação dos potenciais de energia gerados através da frenagem regenerativa em ônibus elétricos, baseados em seus itinerários. Um modelo semelhante, porém mais simplificado é utilizado por Rogge, Wollny e Sauer (2015), o qual apresenta um estudo relacionado a utilização de sistemas de recarga rápida para ônibus elétricos puros na cidade de Muenster, na Alemanha. Neste estudo os autores utilizam um modelo veicular para a aplicação de dados reais, obtidos durante a operação das linhas de ônibus, visando a mensuração do consumo energético, o qual é utilizado posteriormente para a definição da localização das estações de recarga e o dimensionamento das baterias em função das rotas. Este modelo é baseado nas equações apresentadas por Sinhuber, Rohlfs e Sauer (2012), onde são consideradas apenas três forças, sendo a resistência ao rolamento, arrasto aerodinâmico e força de inclinação do veículo.

Em ambos os modelos citados, os resultados obtidos são aproximados, porém fornecem uma medida do consumo que atende os seus objetivos, tendo em vista as aplicações apresentadas. Estes modelos são bem conhecidos na literatura, e foram utilizados em vários outros trabalhos relacionados, sendo validados através de testes efetuados com medições em veículos operando em condições reais, os quais resultaram em aproximações satisfatórias dos valores reais. Em relação aos consumos relacionados aos dispositivos auxiliares, alguns autores como Rogge, Wollny e Sauer (2015) citam em seus trabalhos valores aproximados, porém os descartam nos resultados finais devido a aleatoriedade relacionada ao comportamento destes dispositivos, sendo em alguns casos, considerados somente como uma parcela da energia total consumida.

2.6 RESUMO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi elaborada uma contextualização sobre sistemas de transporte elétrico coletivo, apresentando um breve histórico do seu uso no Brasil, seguido de uma abordagem sucinta sobre o impacto decorrente de sua utilização. Neste contexto, são apresentados alguns exemplos de sistemas que estão em operação em vários locais no mundo, com diferentes topologias, provando que esta é uma tecnologia viável e segura, com uma considerável maturidade tecnológica. Também são abordados de forma sucinta alguns conceitos relacionados aos ônibus elétricos puros, apresentando suas principais vantagens, sua utilização perante as demais tecnologias e ao final são feitas algumas considerações sobre a modelagem matemática destes veículos, citando os principais fatores que interferem em seu consumo energético, onde são citados alguns trabalhos elaborados que abordam estas características.

3 OS ÔNIBUS ELÉTRICOS PUROS E O SEP

Neste capítulo é feita uma breve descrição sobre a utilização dos ônibus elétricos puros, sendo apresentados os seus principais componentes e sua integração aos sistemas elétricos de potência (SEP). No primeiro momento são apresentados alguns números referentes a sua utilização a nível mundial e local, sendo logo após, descritos os seus componentes básicos, alguns modelos disponíveis comercialmente e seus sistemas de recarga. Em seguida, são apresentadas algumas considerações em relação as normas atualmente existentes, referentes as estruturas e estações de recarga. Ao final, são discutidos os principais conceitos relacionados a conexão dos ônibus com os Sistemas Elétricos de Potência, citando de forma sucinta o impacto causado pela inserção destes veículos no sistema.

3.1 O USO DOS ÔNIBUS ELÉTRICOS PUROS NO BRASIL E NO MUNDO

De modo geral, a utilização dos ônibus elétricos puros a nível mundial ainda é relativamente pequena, pois corresponde a apenas pequenas frotas, as quais representam uma reduzida parcela do total dos ônibus existentes (ZIVANOVIC e MIŠANOVIC, 2014). Nos Estados Unidos por exemplo, existem pouco mais de 10 cidades com modelos elétricos em operação, tendo como destaque a Califórnia, onde existe um mandato desde 2011 para que 15% dos ônibus comprados novos sejam elétricos. Porém, mesmo assim, sua utilização quando comparada as frotas compostas por ônibus a diesel é insignificante. Já na Europa, existe uma diretiva que ordena a compra destes veículos, resultando em uma implantação de frotas elétricas em países como a Itália (mais de 30 cidades com cerca de 400 ônibus em operação), França (17 cidades com cerca de 100 veículos), Alemanha, Dinamarca, Holanda e Espanha (SISTRAN ENGENHARIA, INECO E INECO DO BRASIL, 2014).

Em outros países como a China, Japão, Singapura, Hong Kong e Israel os ônibus elétricos também se fazem presentes. Na cidade de Shenzhen na China, por exemplo, em 2011 foi elaborado um plano para substituição de toda sua frota (cerca de 10000 ônibus) por modelos elétricos em 5 anos (SISTRAN ENGENHARIA, INECO E INECO DO BRASIL, 2014). No Brasil, os ônibus elétricos vem recentemente aparecendo em várias cidades, porém na maioria das vezes em caráter experimental (C40/ISSRC, 2013). Existem alguns modelos nacionais em fase de testes, como o modelo E-BUS bi-articulado de 18 metros fabricado pela empresa Eletra, o qual está

em circulação em São Paulo, sendo operado pela empresa de transportes Metra (ELETRA INDUSTRIAL LTDA, 2015). Além do modelo nacional, a empresa chinesa BYD, possui seu modelo de ônibus elétrico puro BYD K9 circulando em várias cidades brasileiras, o qual possui garantia em sua bateria de 12 anos e é produzido em larga escala, sendo o mesmo montado em sua fábrica no Brasil (BYD, 2016).

3.2 COMPONENTES BÁSICOS DE UM ÔNIBUS ELÉTRICO PURO

A estrutura básica de um veículo elétrico puro é relativamente simples, sendo composta por um dispositivo de armazenamento de energia (baterias ou supercapacitores), um controlador/conversor de potência e um sistema elétrico de tração (TANAKA, 2013, p. 43). Entretanto, apesar semelhança física entre os modelos, o comportamento de cada componente, em particular, afeta o desempenho final do veículo, resultando em diferentes níveis de eficiência e consumo energético para uma mesma rota, tornando necessária uma análise detalhada. A seguir, são citadas as características dos principais componentes existentes em um ônibus elétrico puro.

3.2.1 Sistema de armazenamento de energia

Os sistemas de armazenamento de energia em ônibus elétricos puros geralmente são compostos por baterias, as quais devem possuir elevada densidade energética e um custo acessível, devido ao fato de que as mesmas compõem a parte mais cara do veículo (STEVIC, 2012, p. 193). Estas baterias devem ser dimensionadas de forma a armazenar uma quantidade suficiente de energia (kWh) para a conclusão dos trajetos diários e fornecer a potência necessária durante os picos de consumo (kW), possibilitando assim ciclos de condução adequados e mantendo o desempenho do veículo durante acelerações e deslocamentos em aclives (NAUMANN e VOGELPOHL, 2015).

As baterias possuem uma grande variedade de critérios de desempenho, tais como energia específica, densidade energética, potência específica, tensão típica, eficiência ampere-hora, eficiência energética, disponibilidade comercial, custo, temperaturas de operação, taxas de auto descarga, número de ciclos de vida e taxas de recarga (LOPES, 2008). Destes, os principais parâmetros a serem levados em conta na escolha de um tipo de bateria são os custos, a densidade energética e o número de ciclos de vida. Os custos das baterias para veículos elétricos variam muito,

dependendo do fabricante, da tecnologia e da escala de produção. Estima-se que com o desenvolvimento de novas tecnologias os custos sejam reduzidos, porém atualmente as tecnologias disponíveis ainda possuem um custo elevado (PIHLATIE, KUKKONEN, *et al.*, 2014).

Já a densidade energética está diretamente relacionada a tecnologia utilizada e pode ser especificada de duas maneiras: em termos de energia por unidade de massa (Wh/kg) ou em volume (Wh/litro). Quanto maior a densidade energética obtida, melhor será o desempenho do veículo pois a quantidade de energia armazenada a bordo sendo maior, amplia a sua autonomia e elimina a necessidade de paradas constantes para a recarga. Já o número de ciclos de vida que é vinculado a relação carga/descarga afeta diretamente o desempenho da bateria, o qual diminui com o tempo conforme o número de recargas realizadas (ZIVANOVIC e MIŠANOVIC, 2014). Sendo assim, a maximização do número de ciclos executados por uma bateria antes de sua deterioração é necessária, pois melhora significativamente a economia na migração de tecnologias.

Além das baterias, outra tecnologia que tem sido amplamente empregada nos sistemas de armazenamento dos ônibus elétricos são os supercapacitores. Apesar destes não possuírem a capacidade de armazenar quantidades de energia suficientes para o veículo alcançar longas distâncias, sua alta potência específica traz muitas vantagens quando utilizado em conjunto com sistemas de baterias (FILIPPO, MARANO e SIOSHANSI, 2014). Estes dispositivos podem ser recarregados muito rapidamente, possibilitando o armazenamento instantâneo da energia resultante da frenagem regenerativa e a utilização de sistemas ultra rápidos de recarga, eliminando a necessidade de longos períodos de repouso para a recarga das baterias. Ademais, estes dispositivos não necessitam de manutenção, não deterioram com o uso e possuem um custo relativamente baixo (LOPES, 2008).

3.2.2 Controlador/Conversor de potência

Um controlador/conversor de potência em um ônibus elétrico tem a função de efetuar o controle da transferência de potência entre os sistemas de armazenamento e os sistemas de tração do veículo. A utilização de novas tecnologias de armazenamento e novos motores só foi possível devido ao desenvolvimento de dispositivos eletrônicos capazes de operar em tensões, correntes e frequências elevadas, o que foi fundamental para a viabilização da tecnologia de tração elétrica

em veículos de grande porte. Desta forma, os sistemas de controle possuem grande importância no resultado final do veículo, pois estão diretamente ligados a sua eficiência, a durabilidade das baterias e ao condicionamento adequado da energia necessária aos sistemas de tração (FERREIRA, 2014).

Aliado a isto, existe nos ônibus elétricos a possibilidade de, durante as frenagens, parte da energia cinética ser recuperada (Frenagem Regenerativa). Em veículos tradicionais, essa parte da energia é convertida em calor pelo atrito ocorrido entre os componentes existentes no sistema de freio, já nos veículos elétricos esta energia pode ser convertida em eletricidade e utilizada posteriormente. Porém, para que um sistema de frenagem regenerativa seja eficaz, é necessária a conversão eficiente de energia, o que depende do gerenciamento ótimo de energia entre duas ou mais fontes acumuladoras, característica vinculada ao controlador/conversor de potência (PERROTTA, RIBEIRO, *et al.*, 2012).

3.2.3 Sistema de tração

Os sistemas de tração em veículos elétricos são compostos basicamente por um motor elétrico e um acoplamento mecânico. Estes dispositivos são produzidos por inúmeros fabricantes e possuem uma vasta gama de opções, operando no caso dos ônibus elétricos em uma ampla faixa de velocidades e com uma alta eficiência devido a potência elevada. A maior parte dos ônibus elétricos utilizam motores de corrente alternada devido ao melhor desempenho e maior potência específica, porém existem motores de corrente contínua sem escovas que apresentam características iguais ou até melhores que os de corrente alternada (ZIVANOVIC e MIŠANOVIC, 2014).

3.3 MODELOS DE ÔNIBUS ELÉTRICOS PUROS DISPONÍVEIS

Os ônibus elétricos puros são fabricados e operados em todo o mundo, possuindo tecnologias de motorização variadas e diferentes configurações de carregamento. Alguns destes ônibus já tem sua produção em escalas comerciais, enquanto outros ainda se limitam a protótipos, em fase de testes (GALLO, RUBIN e TOMIC, 2014, p. 10). Em relação a sua tecnologia, os ônibus elétricos puros podem ser considerados como uma opção madura, porém em constante aperfeiçoamento. A nível mundial, existem muitos fabricantes, distribuídos em locais distintos, o que faz com que cada desenvolvedor adapte os seus produtos às necessidades locais, gerando diferentes sistemas de tração, controle, armazenamento e recarga

(ZIVANOVIC e MIŠANOVIC, 2014). Na Figura 2, são apresentados alguns exemplos de fabricantes de ônibus elétricos, bem como a sua localização no planeta.

Figura 2 - Exemplos de fabricantes de ônibus elétricos no mundo



Fonte: Autor

Além desta adaptação às demandas locais, cada fabricante possui suas particularidades relacionadas aos modelos de veículos oferecidos, pois os componentes empregados dependem do estado de desenvolvimento das tecnologias e a disponibilidade das matérias primas, o que ocasiona uma vasta gama de modelos com diferentes tipos de motores, baterias e sistemas de controle e recarga. Com isto, a eficiência e os custos de aquisição e operação são variáveis, o que torna a escolha de um modelo ou de outro um pouco complexa, uma vez que inúmeros parâmetros devem ser analisados para a definição da opção com melhor custo benefício, em cada caso (SINHUBER, ROHLFS e SAUER, 2010). Se verificados os modelos comerciais disponíveis, percebe-se que existem vários fabricantes, os quais oferecem opções com capacidades que variam de 15 a 150 passageiros. Esta variada gama de modelos comerciais mostra que a indústria de ônibus elétricos puros pode ser considerada uma indústria dinâmica, com fabricantes consolidados distribuídos em vários locais do mundo e com tecnologias em constante aperfeiçoamento. Na Tabela 1 são apresentados alguns exemplos de modelos disponíveis comercialmente e suas principais características.

Tabela 1 - Exemplos de ônibus elétricos puros disponíveis comercialmente

MODELO	PARÂMETRO	ESPECIFICAÇÕES
	BYD K9	
	Comprimento	12,25m
	Capacidade	40 passageiros sentados
	Tipo de bateria	Lítio Fosfato de Ferro
	Tipo de motor	Síncrono com imã permanente
	Capacidade da bateria	324 kWh
	Tipos de recarga	Recarga lenta (4h)
	Potência de recarga	80kW
	Autonomia / Rendimento médio	>250 km / 1,24 kWh/km
	País de fabricação	Brasil e vários locais no mundo
	E-BUS ELETRA	
	Comprimento	18m
	Capacidade	150 passageiros
	Tipo de bateria	Íons de lítio
	Tipo de motor	Assíncrono CA
	Tipos de recarga	Recarga lenta(3h) e rápida(5min)
	Autonomia / Rendimento médio	200 km / -
País de fabricação	Brasil	
	IRIZAR I2E	
	Comprimento	12m
	Capacidade	24 passageiros sentados
	Tipo de bateria	Sódio Níquel + Supercapacitores
	Tipo de motor	Síncrono
	Capacidade da bateria	376 kWh
	Tipos de recarga	Recarga lenta (6h)
	Potência de recarga	50kW
Autonomia / Rendimento médio	250 km / 1,50 kWh/km	
País de fabricação	Espanha	
	NEW FLYER XE40	
	Comprimento	12,5 m
	Capacidade	>43 passageiros
	Tipo de bateria	Íons de lítio
	Tipo de motor	Motor com ímãs permanentes
	Capacidade da bateria	200 kWh
	Tipos de recarga	Lenta(1,6h) e rápida (10min)
	Potência de recarga	100kW lenta, 300~500kW rápida
Autonomia / Rendimento médio	>128 km / 1,56 kWh/km	
País de fabricação	Canadá	
	OPTARE VERSA	
	Comprimento	11,7 m
	Capacidade	60 passageiros / 44 sentados
	Tipo de bateria	Fosfato de ferro-lítio magnésio
	Capacidade da bateria	92 kWh
	Tipos de recarga	Lenta – On (6h) / Off board (2h)
	Potência de recarga	On (2x7,5kW) / Off board (50kW)
Autonomia / Rendimento médio	150 km / 0,61 kWh/km	
País de fabricação	Inglaterra	
	PROTERRA XR40	
	Comprimento	12,2 m
	Capacidade	40 passageiros
	Tipo de bateria	NMC (Níquel-Manganês-Cobalto)
	Tipo de motor	Motor com ímãs permanentes
	Capacidade da bateria	321 kWh
	Tipos de recarga	Lenta(1,5h) e rápida(10min)
	Potência de recarga	50~90kW (lenta) e 500kW(rápida)
Autonomia / Rendimento médio	322 km / 0,99 kWh/km	
País de fabricação	Estados Unidos	

Fonte: Adaptado de (BYD, 2016) (ELETRA INDUSTRIAL LTDA, 2015) (IRIZAR, 2016) (NEW FLYER, 2016) (OPTARE GROUP, 2016) (PROTERRA, 2015)

3.4 SISTEMAS DE RECARGA PARA ÔNIBUS ELÉTRICOS PUROS

Os sistemas de recarga para ônibus elétricos puros necessitam efetuar a transferência de grandes quantidades de energia em um curto período de tempo, pois só assim a utilização destes veículos se torna eficiente e viável. Isto faz com que estes sistemas possuam uma alta potência, variadas formas de construção e funcionamentos distintos, a depender do fabricante, das normas utilizadas e das tecnologias empregadas em sua construção (TOPON e HISASHI, 2014). Se considerados os aspectos operacionais e técnicos, os sistemas de recarga podem se dividir em sistemas de “Recarga Lenta”, onde os veículos são recarregados em repouso durante um longo período e os sistemas de “Recarga Rápida”, onde a recarga é feita em um curto período de tempo e no próprio trajeto, podendo ser efetuada com o veículo em movimento ou durante as paradas para embarque e desembarque de passageiros (ROGGE, WOLLNY e SAUER, 2015). Em ambos os sistemas, os carregadores podem utilizar tanto conexões automáticas, quanto manuais, e dispositivos de transferência de energia, condutivos ou indutivos (SIMON, 2013). Na sequência é apresentada uma breve descrição destes sistemas e a atual situação, em relação à padronização das estações de recarga para ônibus elétricos.

3.4.1 Sistemas de recarga lenta:

Os sistemas de recarga lenta são compostos por carregadores instalados normalmente em estacionamentos ou garagens, os quais são alimentados em sua maioria, por uma rede trifásica de baixa tensão (BOSSCHE, 2010). Nestes sistemas é necessário que o veículo permaneça em repouso, sendo conectado ao carregador por um longo período, até atingir a recarga completa de suas baterias (TAYLOR, MAITRA, *et al.*, 2009). Os sistemas de recarga lenta, de um modo geral, facilitam o planejamento dos sistemas elétricos de distribuição, pois todo o consumo de energia da rede elétrica fica concentrado em determinado ponto e os horários de recarga são predefinidos, tornando possível desta forma, o recarregamento das baterias dos veículos, em horários fora de ponta, onde no caso do Brasil, a tarifa é mais baixa (MOREIRA, 2015).

Este padrão é adotado pela maioria dos fabricantes de ônibus elétricos devido a maior simplicidade, porém, como a maioria destes veículos são projetados para substituir os modelos a diesel, neste tipo de sistema são necessárias baterias com maior capacidade de armazenamento, de forma a completar os trajetos previstos.

Com isto, o espaço interno e a eficiência dos veículos é reduzida devido ao maior peso e volume a ser transportado (GALLO, RUBIN e TOMIC, 2014). As principais vantagens e desvantagens destes sistemas são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Vantagens e desvantagens dos sistemas de recarga lenta

VANTAGENS	DESVANTAGENS
<ul style="list-style-type: none"> •Pode substituir os veículos a diesel sem a necessidade da instalação de estruturas especiais nas vias para recarga. 	<ul style="list-style-type: none"> •Maior tamanho das baterias diminui o espaço interno dos veículos e aumenta o seu peso, reduzindo a assim a eficiência e aumentando o seu custo.
<ul style="list-style-type: none"> •O carregamento é feito normalmente durante a noite, fora do horário de pico das concessionárias. 	<ul style="list-style-type: none"> •É necessário um longo período de recarga.
<ul style="list-style-type: none"> •O custo das infraestruturas de recarga é menor. 	<ul style="list-style-type: none"> •Menor tempo disponível para operação devido ao elevado tempo de recarga necessário.
<ul style="list-style-type: none"> •A ligação a rede é simples e não exige grandes alterações nos sistemas. 	<ul style="list-style-type: none"> •Grande impacto nos alimentadores pois normalmente vários veículos são recarregados em um mesmo local e horário.

Fonte: Autor

3.4.2 Sistemas de recarga rápida

Os sistemas de recarga rápida, também chamados de sistemas “On-Route” são instalados nas estações de embarque e desembarque de passageiros, ou em pontos estratégicos, de forma que, durante o pequeno período de parada, seja inserida a bordo do veículo quantidade de energia suficiente para o deslocamento até a próxima estação de recarga, possibilitando a sua operação contínua, sem a necessidade de longas paradas. Geralmente, estes sistemas demandam uma alta potência, a qual pode chegar a até 500kW, podendo ser fornecida através da energia armazenada em baterias nas próprias estações de recarga, reduzindo assim, o impacto no sistema elétrico, ou drenada diretamente da rede, situação que ocasiona um grande impacto na curva de demanda (GALLO, RUBIN e TOMIC, 2014, p. 18).

O maior inconveniente destes sistemas é que durante a recarga, a demanda elétrica necessária é distribuída em vários pontos instalados na rede, gerando picos de demanda de energia em locais aleatórios e muitas vezes em horários de maior consumo, característica que dificulta o planejamento dos sistemas elétricos, pois são situações extremas em curtos períodos de tempo, característica que não é desejada (ROGGE, WOLLNY e SAUER, 2015). Na Tabela 3 são apresentadas as principais vantagens e desvantagens dos sistemas de recarga rápida.

Tabela 3 - Vantagens e desvantagens dos sistemas de recarga rápida

VANTAGENS	DESVANTAGENS
<ul style="list-style-type: none"> • Menor necessidade de armazenamento de energia a bordo, proporcionando a redução do peso e volume do veículo, elevando a sua eficiência. 	<ul style="list-style-type: none"> • Menor flexibilidade na alteração das rotas devido a operação vinculada as estruturas de recarga.
<ul style="list-style-type: none"> • Possibilidade de operação contínua, sem a necessidade de paradas longas para recarga das baterias. 	<ul style="list-style-type: none"> • Os custos relacionados à energia podem ser maiores devido ao consumo em horários de pico.
<ul style="list-style-type: none"> • Baterias com menor capacidade, proporcionando um menor custo final do veículo e reduzindo os custos de sua substituição. 	<ul style="list-style-type: none"> • Os custos relacionados a infraestrutura de recarga podem ser elevados e sua conexão à rede é mais complexa.
	<ul style="list-style-type: none"> • Como a recarga é constante em situações de faltas ou indisponibilidade de energia o veículo fica fora de operação.

Fonte: Autor

3.4.3 Sistemas de recarga condutivos

Os sistemas de recarga condutivos utilizam contatos metálicos para efetuar a transferência de energia e podem ser do tipo “On Board” ou “Off Board”. Os sistemas do tipo “On Board” ficam instalados no interior do veículo, possuem uma baixa potência e, normalmente, são projetados para operar diretamente ligados à rede elétrica, efetuando no próprio sistema o controle da tensão e da corrente de carga. Já os sistemas do tipo “Off Board” operam externamente ao veículo e são concebidos para operar como uma fonte externa de alimentação, adequando previamente os valores da rede para o sistema de recarga do veículo, possuindo na maioria dos casos uma elevada potência. Os sistemas de recarga condutivos são atualmente, os mais utilizados em ônibus elétricos (NAUMANN e VOGELPOHL, 2015).

Nestes sistemas condutivos, a conexão do veículo ao carregador se dá através de cabos plug-in, ou através de pantógrafos, os quais podem receber energia através de cabos aéreos ou trilhos instalados no chão. Os sistemas de recarga condutiva que utilizam cabos plug-in possuem plugues e tomadas adequados a suportar a corrente necessária para o carregamento, o qual só pode ser efetuado com o veículo parado. Normalmente, são instalados nas garagens das empresas de transporte e são do tipo “Recarga lenta”, onde as baterias são recarregadas por um longo período, até chegar a sua carga máxima (CAMPATELLI, BENESPERI, *et al.*, 2014).

Figura 3 - Sistema de recarga condutiva com cabo plug-in “Off Board” (lenta)



Fonte: (IRIZAR, 2016)

Já os sistemas de recarga com pantógrafos, normalmente são utilizados para recargas rápidas, onde o fornecimento de energia é efetuado durante as paradas efetuadas nas estações, ou em determinados trechos, predefinidos nas rotas. Nestes sistemas é comum a utilização de supercapacitores, pois os mesmos possuem uma alta capacidade de carga e descarga em um curto período de tempo. Além disso, estes dispositivos possuem elevada densidade energética, se comparados as baterias comuns e possuem uma vida útil de aproximadamente 15 anos, os tornando viáveis técnica e economicamente (KUMAR, GUNAWAT, et al., 2012). Na Figura 4, é apresentado um sistema automático de recarga rápida por pantógrafo, o qual é produzido pela empresa americana Proterra (PROTERRA, 2015).

Figura 4 - Sistema de recarga condutiva com pantógrafo (rápida)

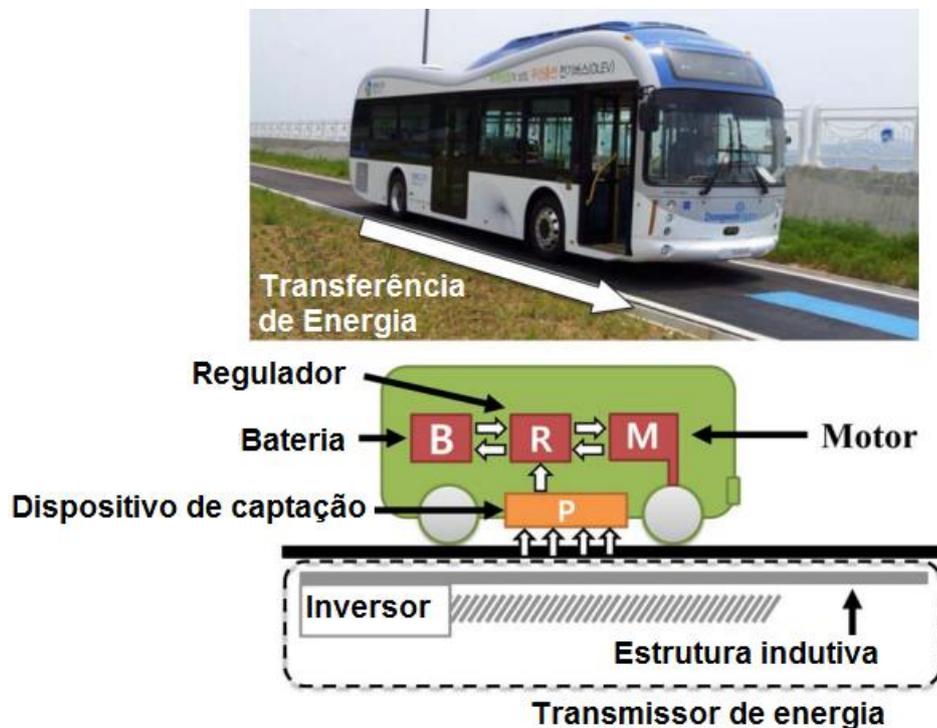


Fonte: (PROTERRA, 2015)

3.4.4 Sistemas de recarga indutivos

Os sistemas de recarga indutivos operam através da indução eletromagnética e efetuam a transferência de energia de forma semelhante a um transformador. Estes sistemas podem ser do tipo “Estático” ou “Dinâmico”. Nos sistemas estáticos, existe a possibilidade de carregamento através de um conector indutivo, semelhante ao sistema condutivo com cabo “Plug-in”, ou através de estações de parada indutivas, onde existe uma bobina inserida na parte inferior do veículo e outra embaixo do local onde o veículo é estacionado, efetuando a recarga durante o período em que o veículo permanece parado. Já nos sistemas dinâmicos, um indutor é instalado sob a pista, ou sob determinados trechos de um trajeto predefinido, carregando, desta forma, as baterias do veículo, ou fornecendo energia ao mesmo enquanto ele se movimenta. A grande vantagem deste sistema é que as paradas para recargas das baterias podem ser eliminadas, além de possibilitar a utilização de baterias menores. Na Figura 5 é apresentada a estrutura básica de um sistema de recarga indutivo dinâmico o qual está em fase de testes, desenvolvido pelo “Korea Advanced Institute of Technology” (KAIST), o qual é denominado “On-Line Electric Vehicle” (OLEV) (JANG e KO, 2012).

Figura 5 - Sistema de carregamento indutivo dinâmico



Fonte: Adaptado de (JANG, SUH e KIM, 2015)

Os sistemas de recarga indutivos possuem muitas vantagens quando comparados aos sistemas condutivos. Tendo em vista que durante a recarga não são utilizados conectores ou contatos elétricos, o sistema se torna muito mais robusto, não sofrendo desgastes ou riscos de quebra durante a operação, proporcionando uma alta durabilidade. Outra vantagem do seu uso está em relação à sua segurança, que também é elevada, considerando que não existe risco de contato com componentes energizados durante a recarga, além da compatibilidade de potência, pois o sistema possui certa flexibilidade em relação à quantidade de energia transferida, operando com uma alta gama de potências. Porém, apesar de trazer muitas comodidades para os operadores, questões relacionadas ao custo de implantação destes sistemas e a sua eficiência, ainda inviabilizam sua utilização na maioria dos casos. Além disso, características como a faixa de frequência utilizada, indutância de magnetização e outros dados de projeto, devem ser cuidadosamente analisados, pois é uma tecnologia emergente e necessita de aperfeiçoamento (NAUMANN e VOGELPOHL, 2015).

3.5 NORMAS E PADRÕES APLICÁVEIS AOS SISTEMAS DE RECARGA

Como os ônibus elétricos puros ainda são uma tecnologia emergente, nem os sistemas de conexão entre os ônibus e o carregador, nem os protocolos para a comunicação durante a recarga são totalmente padronizados, principalmente em relação aos sistemas de recarga rápida de alta potência. Isto faz com que exista uma certa incerteza, relacionada aos sistemas de tarifação, as infraestruturas e aos serviços necessários (LAURIKKO, PIHLATIE, *et al.*, 2015, p. 4). Além do mais, as opções de sistemas de recarga são inúmeras, variando, desde a utilização de cabos metálicos, conectados diretamente à rede elétrica de baixa tensão, até pistas indutivas, instaladas em trechos, nos quais os veículos se deslocam, ao mesmo tempo em que carregam as suas baterias, armazenando energia para posterior utilização (JANG e KO, 2012).

Entretanto, a maioria dos sistemas de recarga dos ônibus elétricos são semelhantes aos sistemas utilizados em automóveis elétricos, diferenciando-se apenas em relação a potência e a energia transferida durante a recarga. Isso faz com que na maioria dos casos sejam utilizados padrões e normas relacionadas aos veículos elétricos em geral, apesar da forma de utilização dos ônibus se diferenciar

na maioria dos quesitos. Pode-se citar como exemplo normas como a SAE J1772 (SAE, 2016), que estabelece um padrão norte americano, definindo requisitos operacionais, funcionais e dimensionais, para os sistemas de recarga de veículos elétricos e híbridos (SAE, 2016), ou a IEC 62196, a IEC 61851 (IEC, 2016), e a versão brasileira desta a ABNT NBR IEC 61851, as quais estabelecem os tipos de conectores e padrões de recarga, aplicáveis aos sistemas condutivos “on-board” e “off-board”, para veículos elétricos rodoviários, com tensões alternadas normalizadas (até 1000Vac e até 1500Vcc) (ABNT, 2016).

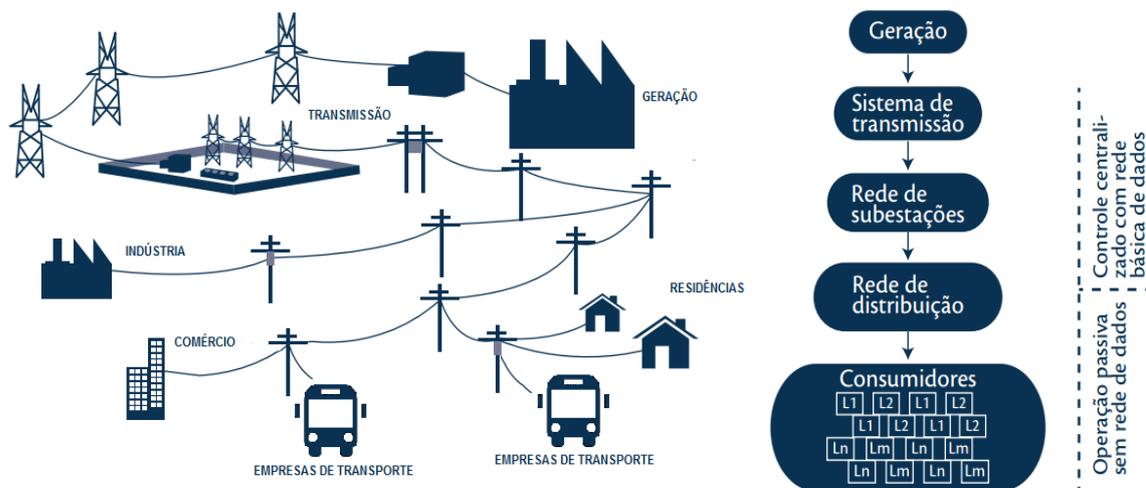
Em relação aos sistemas indutivos e sistemas de recarga rápida utilizados em ônibus elétricos puros, como estes são recentes e ainda estão em desenvolvimento, existem poucas normas em vigor que estabeleçam padrões de potência, topologias e estruturas de forma específica a estes sistemas (LAURIKKO, PIHLATIE, *et al.*, 2015). A IEC 61980-1:2015 por exemplo, foi a primeira, de uma série de normas internacionais, a serem lançadas, a tratar de sistemas do tipo “WPT” (Wireless Power Transfer), que são sistemas de carregamento sem fios, utilizados em veículos elétricos. Esta norma é aplicável a sistemas de carregamento sem fios de veículos elétricos conectados à rede, com tensões de alimentação normalizadas (até 1000Vac e até 1500Vcc), abrangendo sistemas de transferência indutivos, capacitivos, em microondas e por infravermelho (IEC, 2016). Apesar de determinar as diretrizes básicas para os sistemas indutivos para veículos elétricos, a norma ainda não abrange, de forma específica, os sistemas de recarga dos ônibus elétricos, o que impossibilita a padronização das potências, tensões e topologias dos atuais sistemas existentes.

3.6 IMPACTO DO USO DOS ÔNIBUS ELÉTRICOS PUROS NO SEP

Os Sistemas Elétricos de Potência (SEP) possuem seu planejamento baseado em estudos que levam em conta as projeções de crescimento da demanda ao longo dos anos, gerando diagnósticos relacionados a disponibilidade de energia e a operação em curto, médio e longo prazo. Isto requer uma análise cuidadosa em relação as possíveis alterações no comportamento do consumo por parte dos consumidores ou pela utilização de novas tecnologias, pois estas alterações influenciam diretamente o desempenho destes sistemas (SIMON, 2013, p. 40). Pode-se definir o SEP como um sistema de fornecimento de energia elétrica composto por

uma complexa infraestrutura, atendendo a padrões de confiabilidade, qualidade, modicidade tarifária e sustentabilidade social e ambiental. Sua estrutura é composta por sistemas de geração, redes de transmissão, redes de distribuição e usuários de energia elétrica, conforme ilustrado na Figura 6, possuindo um fluxo de potência unidirecional no caso das redes tradicionais, ou bidirecional em redes inteligentes (CGEE, 2012, p. 19).

Figura 6 – Sistema elétrico de potência (SEP) e sua hierarquia



Fonte: Adaptado de (CGEE, 2012)

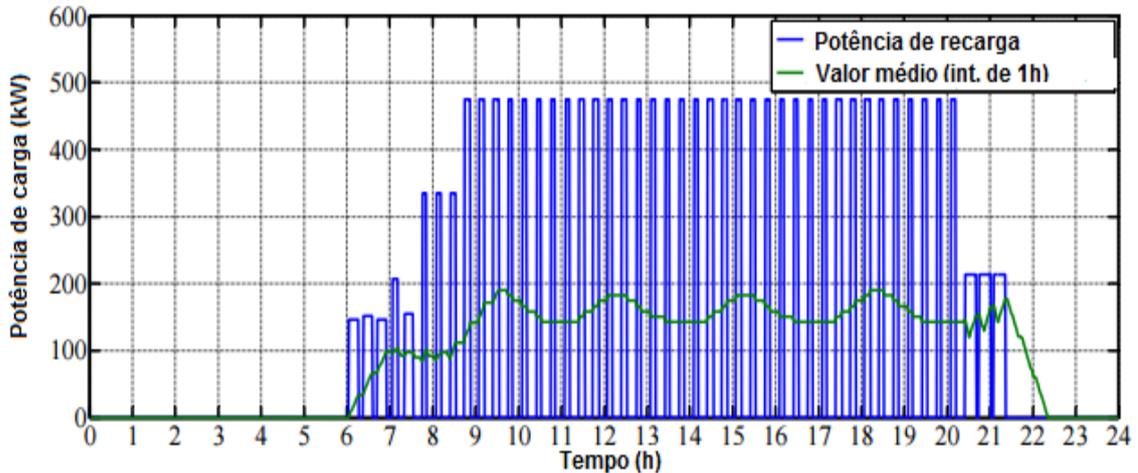
Considerando esta definição, é constatado que a substituição dos ônibus urbanos a diesel por ônibus elétricos puros não influencia apenas o setor de transportes, mas também o setor elétrico, pois a alta demanda de energia requerida pelos sistemas de recarga gera um impacto significativo no SEP (ROGGE, WOLLNY e SAUER, 2015, p. 4601). Apesar das estações de recarga de ônibus elétricos se limitarem à conexão com o sistema de distribuição (SED), conforme ilustrado na Figura 6, devido à hierarquia do sistema, todos os estágios são afetados, pois a carga inserida no SED influencia, indiretamente, os demais sistemas. Ademais, tanto nas redes tradicionais, quanto nas redes inteligentes, o acréscimo de demanda e os perfis de consumo decorrentes da utilização de ônibus elétricos puros requerem um estudo detalhado, pois, dependendo da intensidade da substituição das frotas, cargas extremamente elevadas são inseridas, afetando de forma prejudicial, todos os níveis do SEP.

Tanto os sistemas de recarga rápida quanto os sistemas de recarga lenta ocasionam impactos significativos no SEP e no SED, porém de formas distintas, pois a potência requerida em cada caso e os períodos de utilização são totalmente diferentes. Em sistemas de recarga lenta, tem-se a vantagem da sua utilização durante o período da noite, no qual a demanda do sistema elétrico é menor, melhorando assim a curva de carga. Além disso, neste horário existe a possibilidade da cobrança de tarifas reduzidas decorrentes da grande oferta de energia, o que reduz os custos de operação das frotas. Por outro lado, diferentemente dos sistemas de recarga rápida, nesta topologia o consumo é concentrado em um único local, sendo que a recarga é feita simultaneamente para todos os veículos, ocasionando uma grande carga instalada e uma alta demanda, ambas concentradas em um único ponto de alimentação (ROGGE, WOLLNY e SAUER, 2015).

Geralmente, os sistemas de recarga lenta possuem uma potência menor que 100kW, o que, individualmente, não apresenta um impacto significativo. Porém, se considerarmos que as empresas de transportes públicos possuem garagens onde são estacionadas grandes frotas de veículos, um sistema de recarga lenta acaba por resultar em uma demanda de potência imensa, pois geralmente todos os carregadores entram em operação no mesmo horário. Isso faz com que o investimento em infraestrutura para o suprimento desta demanda seja elevado, além de inviabilizar, em alguns casos, a utilização da tecnologia (GALLO, RUBIN e TOMIC, 2014). Se considerarmos tempo verbal por exemplo, uma empresa com uma frota de 40 veículos, utilizando carregadores com potência de recarga de 50kW, com todos os veículos sendo recarregados em um mesmo período, a carga instalada no local seria de 2MW, com um baixo fator de diversidade em alguns momentos, o que é consideravelmente elevado.

Por outro lado, os sistemas de recarga rápida são normalmente de alta potência (100kW a 500kW), possuem um custo elevado e necessitam uma complexa infraestrutura de alimentação, quando comparados aos sistemas de recarga lenta (GALLO, RUBIN e TOMIC, 2014, p. 23). Como o uso destes sistemas é vinculado aos períodos de operação dos veículos, o consumo de energia se dá durante o dia, período no qual existe uma maior demanda no sistema elétrico, de acordo com os perfis de consumo dos alimentadores, ocasionando um maior desbalanceamento nas curvas de carga. Figura 7 é apresentado um exemplo de um perfil de carga típico, resultante de um sistema de recarga rápida para ônibus elétricos puros de 500 kW.

Figura 7 - Perfil de carga típico com uma estação de recarga rápida de 500kW

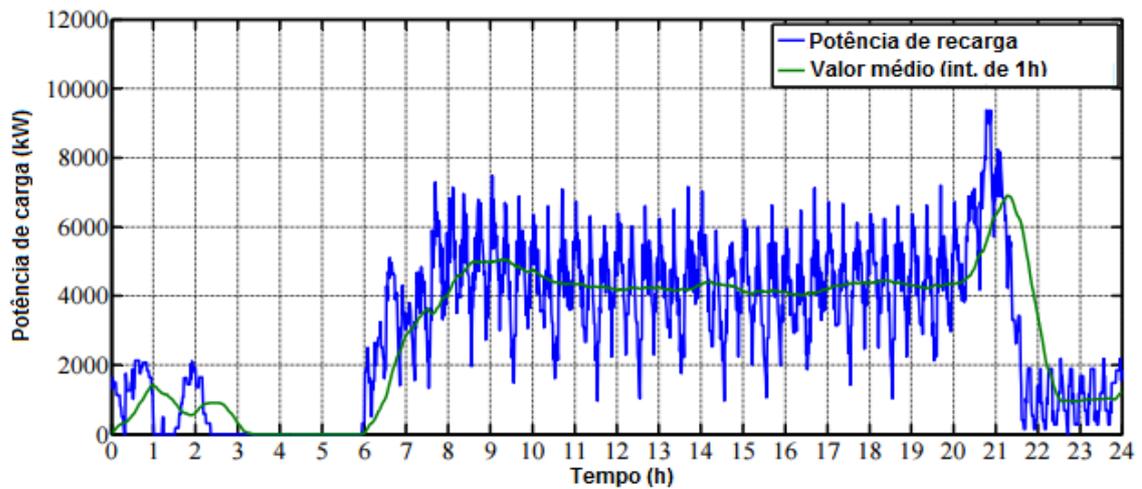


Fonte: Adaptado de (ROGGE, WOLLNY e SAUER, 2015, p. 4602)

O valor médio, apresentado na figura, possibilita uma noção da curva de carga proporcionada por este tipo de sistema, onde a demanda média de energia apresenta pequenas variações durante o dia e no período da noite se torna nula. No entanto, o consumo instantâneo apresenta vários picos elevados e esporádicos, decorrentes dos intervalos de tráfego da rota, o que faz com que seja necessária a contratação de uma demanda de potência considerável, porém com um baixo consumo de energia. Além disso, dependendo da distância destas rotas, da velocidade média dos veículos e do intervalo entre paradas, estes picos podem se atenuar ou se intensificar, alterando a curva de carga apresentada.

No entanto, se considerado o perfil típico de consumo em uma empresa de transportes, onde ocorre a utilização de vários veículos compartilhando as estações de recarga, a curva de carga se apresenta de forma diferente. Nestes casos, devido a utilização de várias estações de recarga distribuídas em toda a rede e em locais distintos, o perfil de consumo tende a se manter mais homogêneo, com um baixo fator de diversidade. Porém, a elevada quantidade de veículos em utilização simultânea, apesar de melhorar o fator de diversidade, torna a demanda de potência ainda maior, conforme apresentado na Figura 8.

Figura 8 - Perfil de carga típico com várias estações de recarga rápida de 500kW



Fonte: Adaptado de (ROGGE, WOLLNY e SAUER, 2015, p. 4602)

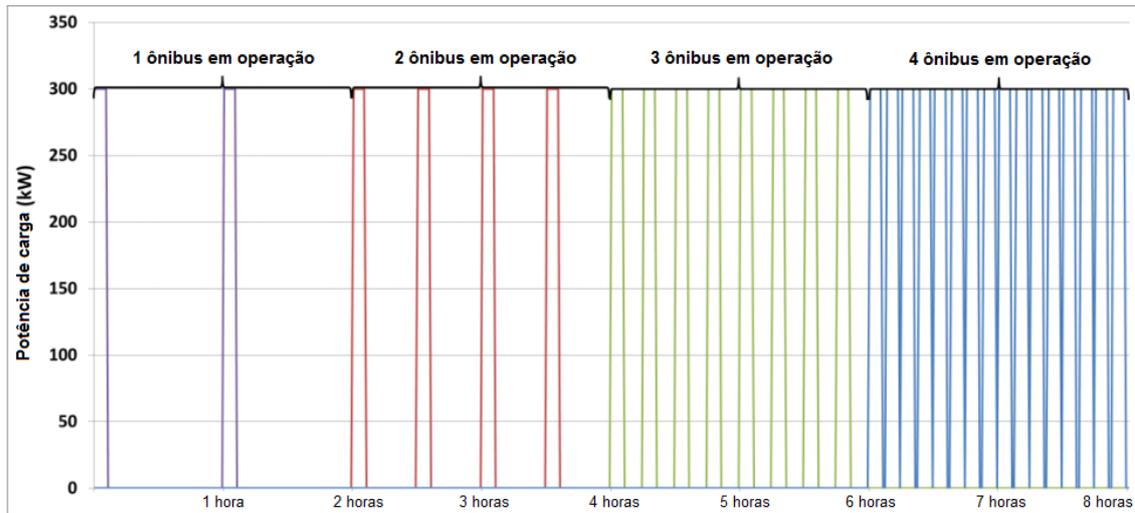
Nesta situação, os perfis de consumo individuais de quarenta e quatro estações de recarga são sobrepostos, de modo que seja inserida na rede uma carga contínua, sem as situações de carga nula, como no caso da utilização de apenas uma estação. No entanto, o perfil de carga resultante também possui flutuações, as quais são ocasionadas pelos intervalos de conexão e desconexão dos veículos nas estações e pela aleatoriedade em sua operação. Estas flutuações de carga podem ser elevadas, como no caso apresentado, onde chegam a uma variação de potência de até 7MW em um pequeno intervalo de tempo. Em relação aos picos de demanda, de acordo com a curva média da Figura 8.

Figura 8, o maior valor ocorrido foi durante a noite, chegando próximo a 9 MW. Este pico é decorrente da intensificação do número de viagens e do encerramento do turno de funcionamento dos ônibus, onde após a operação nas linhas os mesmos se deslocam até as estações de recarga para completar a carga das baterias, o que eleva o tempo de conexão com a rede, ocasionando uma sobreposição dos processos de carregamento individuais (ROGGE, WOLLNY e SAUER, 2015, p. 4602).

Esta flutuação de carga é indesejável no sistema, pois requer altos investimentos em uma estrutura, a qual permanece ociosa por longos períodos. Além disso, tendo em vista que existe tarifação relacionada à demanda contratada, se estes sistemas forem utilizados para a recarga de uma pequena quantidade de veículos, o seu custo operacional será elevado, uma vez que seria necessária a contratação de uma alta disponibilidade de demanda, porém com um reduzido consumo de energia. Isto faz com que sejam necessárias medidas que visam um melhor aproveitamento do sistema, tornando a curva de carga mais uniforme, como a utilização de bancos de baterias nas estações de recarga ou o compartilhamento das estações entre vários veículos (GALLO, RUBIN e TOMIC, 2014).

No primeiro caso, são utilizados bancos de baterias estacionários que se carregam durante o período em que os ônibus estão em circulação, e fornecem energia, juntamente com a rede, durante o momento da recarga. Isto faz com que o consumo de energia da rede se torne uniforme, porém, eleva de forma significativa, o custo de implantação e manutenção dos sistemas, o que inviabiliza o uso da tecnologia, em muitos casos. Já o compartilhamento de estações de recarga com vários veículos, não eleva os custos de instalação e de manutenção do sistema, porém, em muitos casos, não é possível, devido à topologia e à aleatoriedade das rotas. Na Figura 9 é apresentado um exemplo dos perfis de consumo com a utilização de um, dois, três e quatro ônibus, compartilhando uma estação de recarga rápida com potência máxima de 450kW (GALLO, RUBIN e TOMIC, 2014).

Figura 9 - Perfil de carga em 4 cenários distintos em um sistema de recarga rápida



Fonte: Adaptado de (GALLO, RUBIN e TOMIC, 2014)

Neste exemplo, nas duas primeiras horas, apenas um ônibus utiliza a estação de recarga. Conforme a figura, a demanda máxima de potência da rede neste caso é de 300 kW. Após, nas próximas duas horas, dois ônibus passam a utilizar a estação. Embora, no presente caso, a cada 30 minutos, um dos ônibus efetue a conexão ao sistema de recarga, a operação intercalada dos veículos faz com que a demanda máxima permaneça em 300 kW, mesmo com uma maior demanda de energia. Nas quatro horas seguintes, são apresentados os resultados com 4 e 8 ônibus compartilhando a mesma estação, onde pode ser constatado que a potência máxima do sistema mantém-se em 300 kW, mas com uma demanda de energia mais uniforme. Entretanto, mesmo com uma grande quantidade de veículos utilizando o mesmo sistema de recarga, a demanda não é contínua, mantendo-se os períodos com demanda nula, os quais são decorrentes do acoplamento e desacoplamento dos veículos ao sistema, resultando no perfil de carga apresentado. Estima-se que este período de transição dure, no mínimo, 90 segundos (GALLO, RUBIN e TOMIC, 2014, p. 24).

Embora os exemplos apresentados representem, de uma forma sucinta, o comportamento dos sistemas de recarga dos ônibus elétricos puros para uma rede elétrica local, vale salientar que, os perfis de energia expostos não são aplicáveis a alimentadores específicos, pois as estações de recarga, na maioria dos casos, estão espalhadas geograficamente, em pontos distintos, dependendo de vários fatores, relacionados às estruturas físicas, elétricas e econômicas do local. Tal característica,

a qual é intrínseca a este tipo de sistema, introduz novas variáveis nos estudos de planejamento e os torna mais complexos, tendo em vista que as cargas, a serem estudadas, possuem valores significativos e são variáveis, no tempo e no espaço, conforme apresentado, o que gera um impacto considerável no seu planejamento, principalmente em sistemas de distribuição (FERNANDEZ, PEDRAZA, *et al.*, 2015).

3.7 RESUMO DO CAPÍTULO

Os ônibus elétricos puros com a evolução tecnológica ocorrida nos últimos anos se tornaram uma tecnologia tecnicamente viável, sendo considerada uma das mais indicadas quando se refere ao transporte elétrico coletivo devido a sua versatilidade e adaptabilidade as vias existentes. Constata-se neste capítulo, que no mundo existem vários fabricantes espalhados em vários países, os quais possuem tecnologias muitas vezes distintas, sendo adaptadas as necessidades locais existentes em cada região. Entretanto sua utilização a nível mundial ainda é pequena, quando comparada as demais tecnologias, pois existem algumas barreiras a serem superadas como o custo de aquisição das baterias e o suprimento de energia para uma utilização em grande escala.

Em relação aos sistemas de recarga necessários para o funcionamento destes ônibus, atualmente não existe uma padronização diretamente direcionada a estes, fato que dificulta muitas vezes o planejamento dos sistemas elétricos. Além disso, os sistemas de recarga variam entre sistemas indutivos e condutivos, e também entre sistemas de recarga lenta e recarga rápida, apresentando vantagens e desvantagens, as quais devem ser minuciosamente analisadas durante a implementação de um sistema de transporte por ônibus elétricos puros, a fim de se obter uma ótima relação custo benefício. Além disso, quando utilizados sistemas de recarga rápida, estes devem possuir um planejamento muito mais complexo, pois além dos parâmetros a serem considerados, comuns também aos sistemas de recarga lenta, existe o problema da alocação das estações de recarga, as quais devem fornecer energia de uma forma segura a maior quantidade de veículos possível.

4 MODELO VEICULAR E METODOLOGIA UTILIZADA

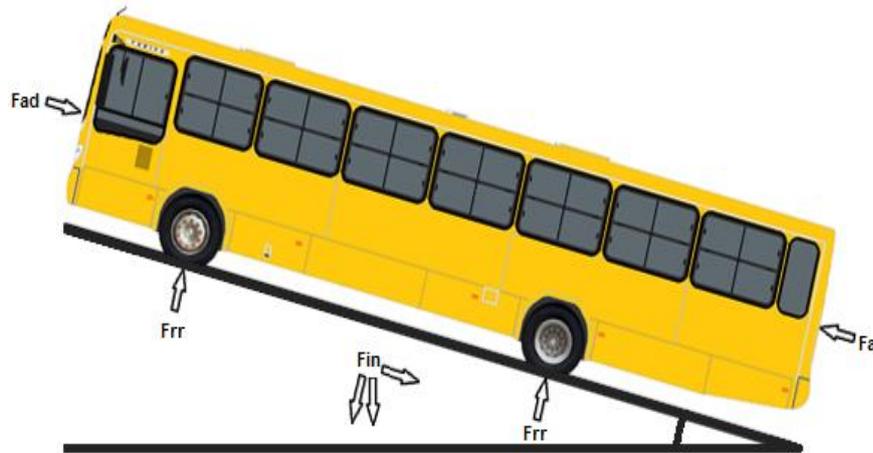
Neste capítulo é apresentado um modelo veicular utilizado para a aplicação da metodologia proposta para a mensuração do consumo energético dos ônibus elétricos analisados no estudo. Inicialmente é descrita uma modelagem matemática, a qual foi utilizada para a determinação do gasto energético dos ônibus, considerando as principais forças atuantes. Estas equações apresentadas na modelagem, posteriormente são utilizadas na elaboração do modelo de simulação proposto, construído através do ambiente Simulink do Matlab®. O processo utilizado para obtenção dos dados necessários e a adequação destes para a aplicação no modelo também são comentados neste capítulo.

4.1 MODELAGEM MATEMÁTICA DO CONSUMO ENERGÉTICO VEICULAR

Em um veículo elétrico características relacionadas a suspensão, pneus, amortecedores, aerodinâmica, sistemas de transmissão, controladores, dentre outros fatores influenciam diretamente em seu consumo energético, aumentando ou reduzindo sua eficiência. Desta forma, na elaboração de um modelo veicular é usual a utilização de expressões matemáticas considerando o efeito de cada um destes componentes de forma detalhada, o que resulta em um valor preciso, porém gera complexos e extensos modelos matemáticos. Na literatura existem vários modelos veiculares que levam em conta inúmeros parâmetros, resultando em valores muito precisos. No entanto, tendo em vista o objetivo deste trabalho, uma análise precisa se torna exagerada e dispendiosa, pois a mensuração do consumo energético baseada apenas nas principais forças impostas sobre veículo gera uma aproximação suficiente para o estudo.

Com isto, optou-se pela utilização de um modelo dinâmico veicular simples, baseado nas equações apresentadas por Larminie e Lowry (2012, p. 185), e Perrota, Ribeiro, *et al* (2012, p. 1160). Também foi considerado na análise o modelo proposto por Sinhuber, Rohlf s e Sauer (2012, p. 316), o qual apresenta um modelo com breves distinções em relação ao apresentado pelos primeiros autores, complementando o equacionamento utilizado no estudo. Nestes modelos, a mensuração da energia consumida descarta os efeitos das forças com menor relevância, e considera apenas quatro principais: a força de atrito ao movimento, o arrasto aerodinâmico, a força de inclinação e a força de inércia, conforme ilustrado na Figura 10.

Figura 10 - Principais forças consideradas no modelo utilizado



Fonte: Autor

As equações utilizadas no modelo e a influência de cada uma destas forças no consumo energético do veículo são descritas na sequência.

4.1.1 Força de atrito ao movimento

As perdas por atrito ao movimento (F_{rr}) ocorrem principalmente devido ao contato dos pneus do veículo com o solo, entretanto a fricção devido a mudança de direção do veículo e o sistema de transmissão também influenciam em seu valor final. Esta força pouco depende da velocidade do veículo, sendo diretamente proporcional ao peso do mesmo, a aceleração gravitacional e ao coeficiente de atrito (LARMINIE e LOWRY, 2012). A equação 1 é utilizada para estimar o valor desta força.

$$F_{rr} = u_{rr} \cdot m \cdot g \quad (1)$$

Nesta equação, “m” é a massa total do veículo em quilogramas, “g” é a aceleração gravitacional que corresponde a $9,8\text{m/s}^2$ e “ u_{rr} ” é o coeficiente de atrito, o qual depende do tipo de pneu, a pressão aplicada aos pneus e ao tipo de pavimentação existente na via. Este coeficiente de atrito pode ser determinado através da equação 2, onde “v” é a velocidade linear do veículo em metros por segundo e “Ch” é o coeficiente de atrito da estrada, o qual está relacionado ao tipo de pavimentação em que o veículo se desloca (PERROTTA, TEIXEIRA, *et al.*, 2012).

$$u_{rr} = (0,0041 + 0,000041 \cdot v \cdot 2,24) \cdot Ch \quad (2)$$

4.1.2 Força de arrasto aerodinâmico

A força de arrasto aerodinâmico (F_{ad}) é causada pelo atrito do ar com a superfície do veículo quando em movimento. Esta força está principalmente relacionada com a área frontal do veículo, porém também é influenciada por saliências em sua superfície de atrito como aerofólios, espelhos retrovisores, equipamentos, formato da carroceria, dutos de ar, etc. Estas características podem intervir na força atenuando-a ou amplificando, dependendo das características de todo o conjunto da carroceria do veículo. Com o objetivo de simplificar a modelagem do sistema, e como a maior parte correspondente a esta força está relacionada a área frontal o veículo, somente esta característica foi considerada em sua determinação, sendo utilizada a fórmula apresentada por LARMINIE e LOWRY (2012, p. 185), apresentada na equação 3.

$$F_{ad} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_d \cdot v^2 \quad (3)$$

No cálculo desta força a densidade do ar é simbolizada por (ρ). Seu valor varia conforme as condições de pressão atmosférica, umidade do ar e temperatura, porém um valor em torno de $1,25\text{kg/m}^3$ é aceitável na maioria dos casos (LARMINIE e LOWRY, 2012). Já (A) é a área frontal do veículo em m^2 , (v) é a velocidade do veículo em m/s e (C_d) é o coeficiente de arrasto aerodinâmico.

4.1.3 Força de inclinação

Além das forças anteriores, o ângulo de inclinação do veículo em relação a superfície também possui influência na energia consumida em seu deslocamento. Em um declive por exemplo, a força necessária para o movimento é reduzida, variando para mais ou para menos conforme o ângulo de inclinação do meio, porém em um aclave é necessária uma força muito maior para se efetuar o mesmo trabalho. Esta força é determinada através da equação 4, sendo o valor final dependente do ângulo de inclinação (ψ), em graus, da massa do veículo (m) em kg e da aceleração gravitacional (g) em m/s^2 (SINHUBER, ROHLFS e SAUER, 2010, p. 316).

$$F_{in} = m \cdot g \cdot \text{sen}(\psi) \quad (4)$$

Para a determinação do ângulo de inclinação das rotas foi utilizada a diferença de altitude entre os pontos extremos dos trechos calculados (Δh), obtidas "in loco" durante o levantamento das rotas e a distância horizontal entre os pontos ($d_{x,y}$), sendo estes dados aplicados na equação 5 (SEBASTIANI, 2014).

$$\psi = \tan^{-1} \frac{\Delta h}{d_{x,y}} \quad (5)$$

4.1.4 Força de inércia

A última força utilizada na obtenção do modelo de consumo energético proposto é a força necessária para a mudança de velocidade do veículo, denominada força de inércia ou força de aceleração, a qual é baseada na segunda lei de Newton e determinada através da equação 5, sendo (m) a massa do veículo em kg e (a) a sua aceleração em m/s² (LARMINIE e LOWRY, 2012).

$$F_a = m \cdot a \quad (6)$$

Na determinação da aceleração do veículo foram utilizados dados medidos durante a condução dos ônibus, baseado no tempo e na variação da velocidade durante o deslocamento em suas rotas. Durante as frenagens ou nas reduções de velocidade a aceleração foi considerada como nula, pois na mensuração do consumo não foi efetuada a análise da possibilidade da recuperação da energia através dos sistemas de frenagem regenerativa.

4.1.5 Consumo energético

O consumo energético dos ônibus analisados está relacionado diretamente a distância percorrida durante a conclusão das rotas, a eficiência dos sistemas de tração, armazenamento e controle, a velocidade e as forças de resistência impostas sobre o mesmo (LARMINIE e LOWRY, 2012). Assim, como citado anteriormente, assumindo a idéia de que a carga do veículo é composta apenas pelas quatro forças citadas, define-se a força total necessária para a movimentação do veículo como a soma das forças atuantes, conforme a equação 7.

$$F_t = F_{rr} + F_{ad} + F_{in} + F_a \quad (7)$$

A partir do valor desta força é possível a determinação do torque necessário para o movimento do veículo, o qual depende da relação do sistema de transmissão que conecta o motor as rodas e ao raio do pneu do veículo. Para a obtenção do valor deste torque é utilizada a equação 8.

$$\tau = \left(\frac{F_t \cdot r}{G} \right) \quad (8)$$

Nesta equação (τ) é o torque total necessário para a movimentação do veículo em N.m, (F_t) é a força em Newtons, a qual é obtida através da equação 7, (r) é o raio do pneu do veículo em metros e (G) é a relação do sistema transmissão-motor. Obtido o torque necessário, com a sua velocidade torna-se possível a determinação da

potência necessária para o seu deslocamento, porém, além das forças apresentadas, devem ser consideradas também as perdas relacionadas ao motor e aos sistemas de controle existentes, as quais apesar de serem pequenas, representam uma parcela significativa no valor final da potência necessária. Sabendo que a potência é o produto do torque pela velocidade, considerando as perdas, e utilizando a velocidade angular do motor em rotações por minuto, conforme apresentado por Perrota, Teixeira, *et al.* (2012, p. 1161) têm-se a seguinte equação para a potência total:

$$Pt = \frac{2.\pi.\tau.v_m}{60000.n_m.n_c} \quad (9)$$

Sendo que:

$$v_m = \frac{v.60.G}{2.\pi.r} \quad (10)$$

Onde (τ) é o torque requerido do motor em N.m, (v_m) é a velocidade angular do motor em Rpm, (v) é a velocidade linear do veículo, (n_m) é o rendimento do motor elétrico e (n_c) é o rendimento do sistema de controle do veículo. O rendimento do motor elétrico (n_m) segundo dados extraídos por PERROTTA, TEIXEIRA, *et al.* (2012, p. 1161) em testes realizados em um ônibus elétrico está relacionado a sua velocidade, sendo este determinado através da equação 11.

$$n_m = -3.10^{-8}.v_m^2 + 0,0002.v_m + 0,638 \quad (11)$$

Definida a potência necessária para o deslocamento do veículo, finalmente é obtida a energia consumida no trajeto percorrido através da equação 12, considerando o tempo inicial (t_i) e o tempo final (t_f) de deslocamento no trajeto analisado.

$$E = \int_{t_i}^{t_f} P dt \quad (12)$$

Além do consumo apresentado para o deslocamento do veículo, existe também a parcela de energia utilizada na operação dos sistemas auxiliares (frenagem, ar condicionado, iluminação, acionamento de portas e demais dispositivos), a qual depende de vários fatores, como número de passageiros, hora do dia, estações do ano, etc. Esta energia em alguns casos pode representar mais de um terço do consumo total do veículo, variando entre 0,4 kW/km a 1,3 kW/km, tendo como base um ciclo de condução normal (SINHUBER, ROHLFS e SAUER, 2012). Porém, tendo em vista que atualmente a empresa de transportes não utiliza veículos com ar condicionado, dispositivo que é responsável pela maior parcela desta energia, mesmo apesar de ser uma exceção, o consumo relacionado aos sistemas auxiliares foi desconsiderado.

4.2 APLICAÇÃO PRÁTICA

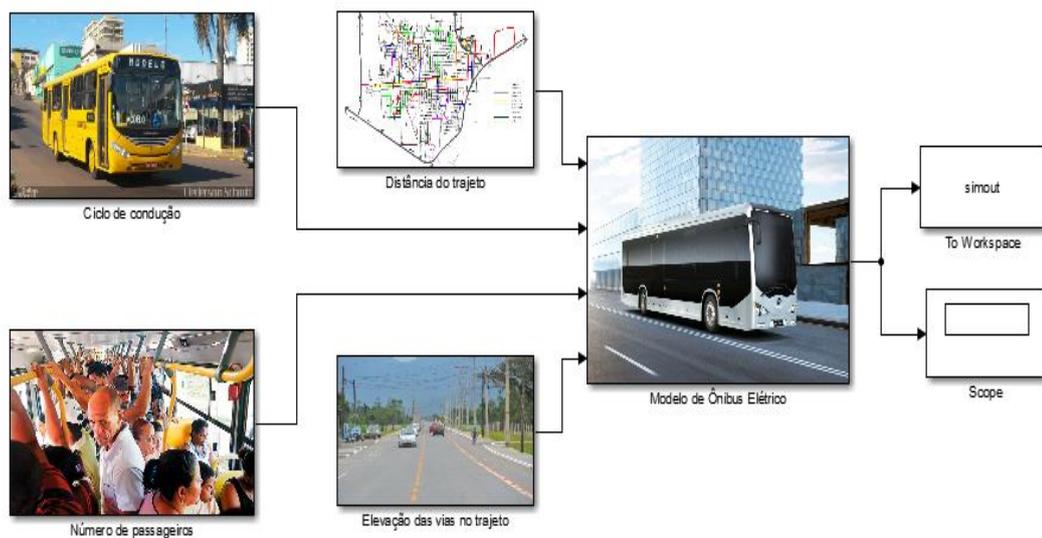
Na mensuração do consumo energético dos ônibus, as características inerentes ao trajeto percorrido como o relevo das vias, ciclos de condução, número de paradas, tipos de pavimentação, dentre outras, influenciam diretamente em seu valor final. Isto fez com que fosse necessário o levantamento de todos estes dados durante a operação dos ônibus, nas suas condições normais de funcionamento, em cada uma das linhas analisadas, de forma a possibilitar a obtenção dos consumos o mais próximo possível do real. Para isto, foi utilizado um equipamento com sistema de posicionamento global (GPS) modelo GPSmap 60CSx, fabricado pela Garmin®, sendo recolhidos durante o deslocamento dos veículos dados relacionados a distância total do trajeto, a velocidade em cada instante, as acelerações e desacelerações, a altitude, latitude e longitude dos trajetos e o número de estações de embarque e desembarque. Na determinação dos coeficientes de atrito das vias, visando uma simplificação do processo de simulação, optou-se por ignorar a diferença entre valores em trechos onde as vias são pavimentadas com pedra irregular, sendo consideradas todas as vias asfaltadas, pois a maior parte dos trajetos é composta por este tipo de pavimentação.

Recolhidos todos os dados referentes as rotas, foi necessária extração e adequação dos arquivos gerados, visando possibilitar a sua aplicação no modelo elaborado. Para isto, foi utilizado o software Expert GPS Pro, onde através de um arquivo com extensão “.gpx”, obtido através do equipamento de GPS, foram extraídos, separados e organizados os dados relativos a velocidade, ao número de paradas, as distâncias percorridas, e as suas respectivas altitudes. Este banco de dados, foi posteriormente convertido para o formato de arquivo “.xlsx”, visando possibilitar a geração de sinais correspondentes a elevação, velocidade, distância e número de passageiros, através do bloco “Signal Builder” disponível no Simulink. Na mensuração do ângulo de inclinação da via, como o equipamento de GPS forneceu apenas os dados referentes as altitudes dos pontos, foi necessário a segmentação das rotas, a fim de possibilitar o cálculo do ângulo de inclinação de cada trecho, originando um conjunto de pequenos segmentos para cada linha analisada.

4.3 MODELO DE SIMULAÇÃO PROPOSTO

O modelo de simulação utilizado na mensuração da energia consumida pelos ônibus durante a sua operação foi elaborado através do ambiente Simulink, disponível no software Matlab®, sendo baseado nas equações apresentadas anteriormente. A estrutura do modelo foi dividida em blocos, utilizados para calcular parâmetros específicos, conforme ilustrado na Figura 11. Os quatro primeiros blocos correspondem aos sinais relativos aos ciclos de condução, distância do trajeto, número de passageiros e elevação da via. Estes sinais variam conforme o tempo do percurso, correspondendo a velocidade em km/h, a distância em km, ao número de passageiros, convertido para kg (70 kg por passageiro) e a elevação da via em metros, respectivamente.

Figura 11 - Modelo de simulação implementando no ambiente Simulink do Matlab®



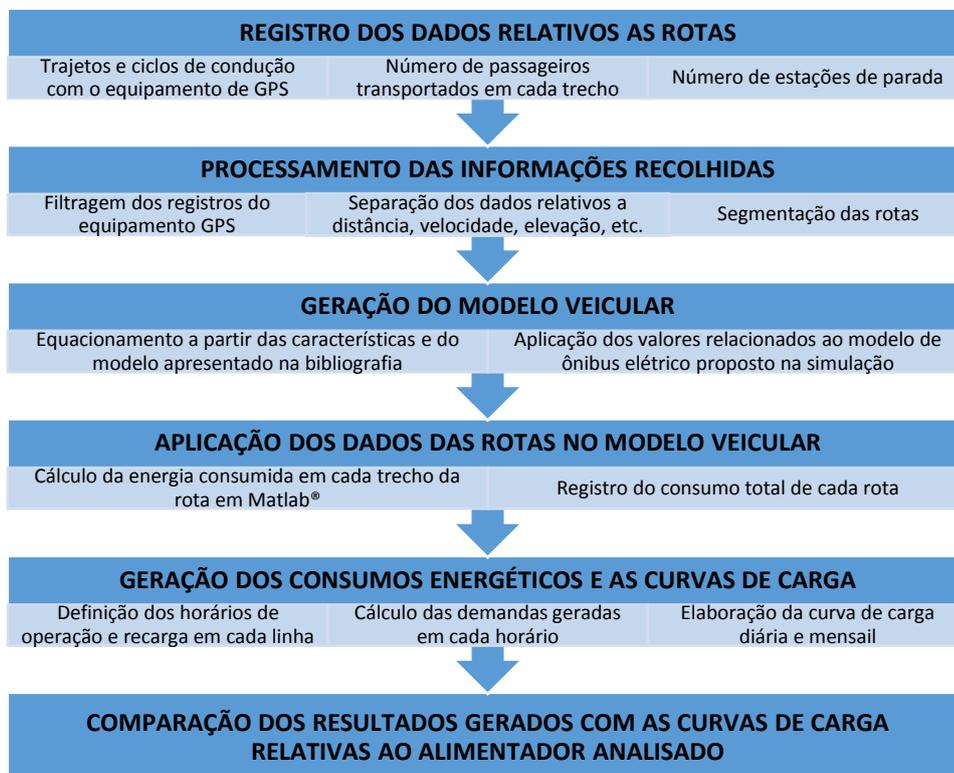
Fonte: Autor

A simulação inicia com geração dos sinais nos blocos a partir dos valores existentes nos arquivos com extensão “.xlsx”, obtidos através do equipamento de GPS durante o trajeto dos veículos. Como existem rotas com características distintas em cada trecho, não foi possível uma análise geral considerando uma média dos dados, pois isto geraria uma série de erros. Isto fez com que fossem criados pequenos segmentos, originados através da divisão das rotas, pois segundo Shankar e Marco (2013, p. 139), o meio mais indicado para a análise dos dados relativos ao consumo

energético dos ônibus, em sua operação real, é através da divisão do conjunto de dados gerado em cada viagem. Estes pequenos segmentos possibilitam uma análise mais precisa das condições de tráfego, do relevo da via e dos ciclos de condução, originando um valor de consumo energético mais próximo do real. Esta divisão foi efetuada a partir dos sinais gerados relativos as inclinações, distâncias, número de passageiros e ciclos de condução, considerando os períodos de aceleração, desaceleração e paradas.

Segmentados os trechos, os dados são aplicados no modelo veicular, o qual foi elaborado a partir das informações fornecidas pelo fabricante do ônibus elétrico escolhido, e pelas equações apresentadas por Larminie e Lowry (2012, p. 183) e Perrotta, Teixeira, *et al* (2012, p. 1160). Em cada segmento, são calculados e armazenados os respectivos consumos energéticos, sendo repetida a operação até a conclusão da rota. Ao final, os valores obtidos são somados e multiplicados pelo número viagens efetuadas pelo ônibus durante o período de um dia. Este processo foi aplicado nas rotas em dias úteis, sábados e domingos. A metodologia utilizada no processo é apresentada na Figura 12.

Figura 12 – Metodologia utilizada



Fonte: Autor

Os valores referentes a energia recuperada através dos sistemas de freio regenerativos, as perdas decorrentes das baterias e sistemas de recarga, e as alterações nos ciclos de condução relacionadas as variações no transito das vias durante as diferentes horas do dia não foram considerados, devido a aleatoriedade destas características, o que tornaria a análise extremamente exaustiva. Isto fez com que fosse gerado um valor aproximado, porém suficiente para a mensuração do impacto energético ocasionado.

4.4 DETERMINAÇÃO DAS CURVAS DE CARGA

A previsão de carga é fundamental nos processos de operação e planejamento do sistema elétrico, pois possibilita uma operação segura e confiável dos sistemas, evitando falhas e desperdícios de investimentos. Além disso, uma previsão correta também é necessária em função das questões normativas, pois o não cumprimento de contratos de fornecimento de energia pode gerar multas, penalidades e despesas desnecessárias (MOREIRA, 2015, p. 8). Com isto, percebe-se que o mapeamento das curvas de carga é fundamental para o planejamento e a operação dos sistemas de distribuição de energia elétrica, pois a partir dos perfis de consumo diários e mensais é possível a realização da previsão de contratação de demanda, o que proporciona uma melhor eficiência do sistema e uma operação mais segura e confiável.

Desta forma, tendo em vista que o fornecimento da energia necessária para os ônibus é efetuada através do sistema de distribuição local, a mensuração da curva de carga decorrente do carregamento destes veículos também se faz necessária. Para isto, foram considerados os horários de operação das linhas de ônibus da empresa, fornecidos pela Medianeira Transporte (2016), a potência das estações de recarga, correspondentes ao modelo de ônibus elétrico simulado, conforme as especificações apresentadas pela BYD (2016) e os valores relativos a energia consumida por ônibus, em cada linha, obtidas através do modelo de simulação elaborado.

Com isso, para a elaboração das curvas de carga diárias e mensais considerou-se que nos horários de início de operação das rotas, no período da manhã, os veículos saem da garagem com as baterias totalmente recarregadas. Durante a sua operação, sempre que a energia armazenada nas baterias atinge o seu final, de forma a impossibilitar a conclusão de uma rota completa, o veículo desloca-se até a garagem e é substituído por outro reserva, o qual está com sua bateria totalmente recarregada.

Assim, a cada retorno a garagem é considerada a conexão da estação de recarga do veículo a rede, e assim, acrescentando no sistema elétrico a potência correspondente a estação de recarga, permanecendo conectado até a conclusão de uma carga completa.

Este ciclo de operação é repetido durante todo o dia, considerando os horários de início e final de operação de cada linha, para cada ônibus analisado. Ao final do horário de operação das linhas, os ônibus se deslocam até a garagem da empresa e são conectados aos seus respectivos carregadores, permanecendo conectados até a conclusão da recarga das baterias. Também durante a análise, foi constatado que em algumas rotas os ônibus encerram a sua operação sem esgotar a energia armazenada em suas baterias. Com isto, foi verificada a quantidade de energia disponível nestes casos em cada um dos veículos, sendo esta energia descontada durante a elaboração das curvas de carga, o que reduziu o tempo total de conexão, e possibilitou a determinação do tempo necessário de recarga com uma maior precisão.

Ao final, sobrepondo todas as conexões simultâneas das estações de recarga, foi gerada uma curva de carga diária a partir da potência de cada uma das estações de recarga e o tempo total de operação de cada uma destas, considerando operações distintas em dias úteis e finais de semana. Na determinação da curva mensal, foi utilizado o consumo energético total diário em cada dia, obtido na simulação, tomando como base a repetição do comportamento semanal. Alterações de carga ocorridas devido a feriados, eventos, ou meses diferentes de trinta dias não foram considerados devido a aleatoriedade destas informações.

4.5 RESUMO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentadas as equações utilizadas na mensuração da energia consumida por cada ônibus elétrico durante a operação nas rotas analisadas e a metodologia utilizada no trabalho. A partir dos modelos apresentados pelos autores foi possível a elaboração de um modelo de simulação no ambiente Simulink® do software Matlab®, o qual foi baseado na metodologia proposta na Figura 12. Este modelo de simulação elaborado possibilitou a determinação da demanda acrescida com a substituição dos ônibus a diesel por elétricos, bem como as curvas de cargas, e as respectivas análises dos impactos relacionados ao possível acréscimo de demanda considerado.

5 ESTUDO DE CASO

Neste capítulo é apresentado um estudo de caso, baseado em modelos e informações reais, fornecidas por uma empresa de transportes urbanos de uma pequena cidade, situada no interior do Sul do Brasil. A metodologia apresentada no capítulo 4 foi utilizada para determinar a energia consumida pelos veículos em cada rota, supondo a substituição dos modelos a diesel, atualmente em operação, por modelos elétricos. A partir dos valores obtidos, efetuou-se uma análise dos dados, de forma a quantificar o acréscimo de energia ocasionado por essa substituição, estimando as possíveis alterações de carga ocasionadas no sistema elétrico de distribuição local. A análise das perspectivas de ampliações futuras, impactos técnicos na geração e transmissão, benefícios sociais, ambientais e econômicos não foi realizada, uma vez que o estudo limitou-se ao acréscimo de carga no sistema elétrico de distribuição. A análise dos custos também não foi efetuada devido a não disponibilidade de valores de aquisição dos veículos elétricos e das tarifas de energia elétrica para serviços públicos de tração elétrica.

5.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

A substituição de ônibus a diesel por ônibus elétricos puros, no transporte coletivo urbano, certamente pode ser considerada como uma das formas mais indicadas para a redução dos níveis de emissão de poluentes atmosféricos em centros urbanos pois esta tecnologia é facilmente adaptável aos cenários existentes, não necessitando de complexas infraestruturas, além de necessitar menores investimentos quando comparada a outras alternativas. Porém, caso esta substituição ocorra futuramente, as redes de distribuição, bem como as redes de transmissão e os sistemas de geração, deverão ser capazes de atender esta demanda adicional, condição que requer altos investimentos em ampliações e adequações. Este acréscimo de carga ao sistema, apesar de ser desconhecido, pode ser estimado através de modelos baseados em condições reais, o que possibilita um conhecimento prévio do impacto ocasionado, facilitando, assim, o planejamento e possibilitando uma análise aproximada da viabilidade do uso da tecnologia.

Baseado nisto, o estudo proposto por este trabalho apresenta uma análise do acréscimo de carga no sistema elétrico de distribuição, ocasionado pela substituição de uma frota de ônibus urbanos a diesel por modelos elétricos, na cidade de Ijuí – RS,

efetuando a mensuração do acréscimo de energia ocasionado, considerando o sistema elétrico local existente. Para a simulação, foram utilizadas informações fornecidas pela empresa e dados coletados nos próprios veículos, durante a sua operação normal. A partir dos resultados obtidos, através da aplicação dos dados em um modelo de simulação, o qual foi elaborado através do software Matlab®, serão discutidos os possíveis impactos e necessidades de reforço no sistema elétrico da área analisada, em função desta utilização de ônibus elétricos na região.

5.2 EMPRESA ANALISADA

O estudo de caso apresentado utilizou como base os serviços de transporte efetuados pela empresa Medianeira Transporte Ltda, a qual é responsável pelo transporte público urbano da cidade de Ijuí, uma pequena cidade situada no sul do Brasil, mais especificamente no Estado do Rio Grande do Sul. A cidade analisada possui aproximadamente, 82.833 habitantes segundo dados fornecidos pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2016), sendo considerada de pequeno porte. No estudo de caso proposto foram utilizadas combinações entre dados reais obtidos nas linhas de ônibus, informações fornecidas pela empresa de transportes e pelo município de Ijuí. A frota de ônibus urbanos existente na cidade possui uma vida média de cinco anos e é composta por veículos de 12 metros modelo “Marcopolo Torino” com chassi Mercedes Benz 1721.

Os modelos de ônibus convencionais existentes na empresa utilizam óleo diesel como combustível e são montados em um chassi Mercedes Benz–1721, possuindo uma capacidade para 38 passageiros sentados e 42 passageiros em pé, atendendo toda população urbana da cidade. A empresa também possui alguns veículos reserva, os quais ficam disponíveis no caso de falhas ou situações atípicas onde a demanda de passageiros é aumentada, como por exemplo, nos períodos em que ocorrem feiras ou eventos (MEDIANEIRA TRANSPORTE, 2016). Na Tabela 4 são apresentadas as principais características dos modelos convencionais de ônibus que atualmente compõem a frota da empresa.

Tabela 4 - Características dos ônibus a diesel utilizados pela empresa

Características Ônibus Marcopolo Torino Chassi Mercedes Benz 1721	
Carroceria	
Fabricante:	Marcopolo SA
Capacidade de passageiros:	38 sentados + 42 em pé
Comprimento:	12,605 metros
Altura:	3,235 metros
Largura:	2,5 metros
Chassi:	
Fabricante	Mercedes Benz
Peso bruto total admissível:	17 toneladas
Combustível:	Óleo Diesel
Tanque de combustível:	300 litros
Motor:	4 cilindros em linha - Intercooler
Potência máxima:	153 kW
Torque máximo:	780 Nm
Velocidade máxima:	111 km/h
Capacidade de subida com 17 toneladas:	37°

Fonte: Autor

No total são transportados diariamente 12000 passageiros em 480 viagens diárias. Entre o início e o final das linhas são efetuadas em média 25 paradas para embarque e desembarque de passageiros, sendo a velocidade média dos trajetos 18 km/h e o consumo médio de 2,94 km/l de óleo diesel (MEDIANEIRA TRANSPORTE, 2016).

5.3 ÔNIBUS ELÉTRICO UTILIZADO NA SIMULAÇÃO

Conforme apresentado no capítulo 3, existem inúmeros fabricantes de ônibus elétricos, os quais possuem modelos com características bem distintas, proporcionando uma ampla gama de opções com diferentes relações custo-benefício. No entanto, ao determinar o modelo de ônibus que seria utilizado neste trabalho, foram considerados alguns parâmetros específicos, de forma a proporcionar uma migração entre tecnologias com o menor impacto possível, possibilitando assim a reutilização da infraestrutura existente sem a necessidade de grandes alterações. Após analisadas as características de vários modelos disponíveis, foi adotado para a simulação o modelo Chinês BYD K9, apresentado na Figura 13, pois foi o que mais se assemelhou tecnicamente aos modelos Mercedes Benz utilizados pela empresa Medianeira Transporte, além de possuir a particularidade de ser produzido no Brasil (BYD, 2016), característica que o torna mais próximo da realidade local.

Figura 13 - Ônibus elétrico BYD Ebus K9



Fonte: (BYD, 2016)

As dimensões físicas e a capacidade de passageiros do ônibus BYD K9 são semelhantes aos modelos a diesel utilizados na empresa de transportes analisada, e suas especificações técnicas estão disponíveis para a consulta no site do fabricante, ao contrário de alguns modelos. O BYD K9 já é utilizado em testes em algumas regiões do Brasil, e segundo a fabricante o modelo tem apresentado um bom desempenho nas condições de tráfego brasileiro. Sua tração é efetuada através de dois motores, cada um com potência nominal de 75kW, possuindo uma velocidade máxima de 70km/h e uma autonomia de 250km com uma recarga completa. Seu sistema de recarga de baterias possui tensão de alimentação trifásica 380V–60Hz, com potência máxima de 80kW, e corrente elétrica máxima de 126A (BYD, 2016). Informações referentes ao fator de potência presumido e taxas de harmônicas geradas pelas estações de recarga destes veículos na rede não são fornecidas pelo fabricante. Na tabela 2 é apresentada uma comparação entre as principais características do modelo elétrico BYD K9 utilizado na simulação, e o modelo Marcopolo Torino Mercedes Benz 1721, atualmente utilizado pela empresa.

Tabela 5 - Comparação entre os modelos BYD K9 e Marcopolo M.Benz 1721

MODELO	BYD EBUSK9	MARCOPOLO M. BENZ 1721
Comprimento	12000mm	12605mm
Largura	2550mm	2500mm
Altura	3360mm	3235mm
Nº de passageiros	22 sentados+58 em pé	38 sentados+42em pé
Potência nominal	150kW	153kW
Torque máximo	700Nm	780Nm
Peso bruto	19000kg	17000kg
Raio dos pneus	509mm	513mm

Fonte: Autor

Para a recarga do modelo BYD K9 a fabricante disponibiliza apenas estações de recarga lenta, sendo a conexão entre o carregador e o veículo efetuada através de conector condutivo sete pinos modelo “GB/T 20234-2012”, padrão chinês o qual é semelhante ao padrão europeu estabelecido pela norma IEC 62196. Dentre as opções de modelos de estação de recarga, disponibilizados para o veículo, segundo as recomendações do fabricante, para veículos em operação no Brasil, deve ser utilizada a estação modelo “EVA080KG3806/01” (Figura 14), a qual tem suas especificações apresentadas na Tabela 6.

Figura 14 - Estação de recarga BYD modelo EVA080KG3806/01



Fonte: (BYD, 2016)

Tabela 6 - Especificações da estação de recarga EVA080KG3806/01

CARACTERÍSTICA	ESPECIFICAÇÃO
Tensão de entrada	3~380V
Potência de entrada	<80kW
Frequência	60 Hz
Tensão de saída	380V
Corrente de saída	<126A
Grau de proteção	IP55
Tipo de recarga	Lenta
Tempo de recarga completa BYD K9	5 horas
Potência média de recarga BYD K9	60kW
Tipo de conector de recarga	Duplo GB/T 20234-2012

Fonte: Adaptado de (BYD, 2016)

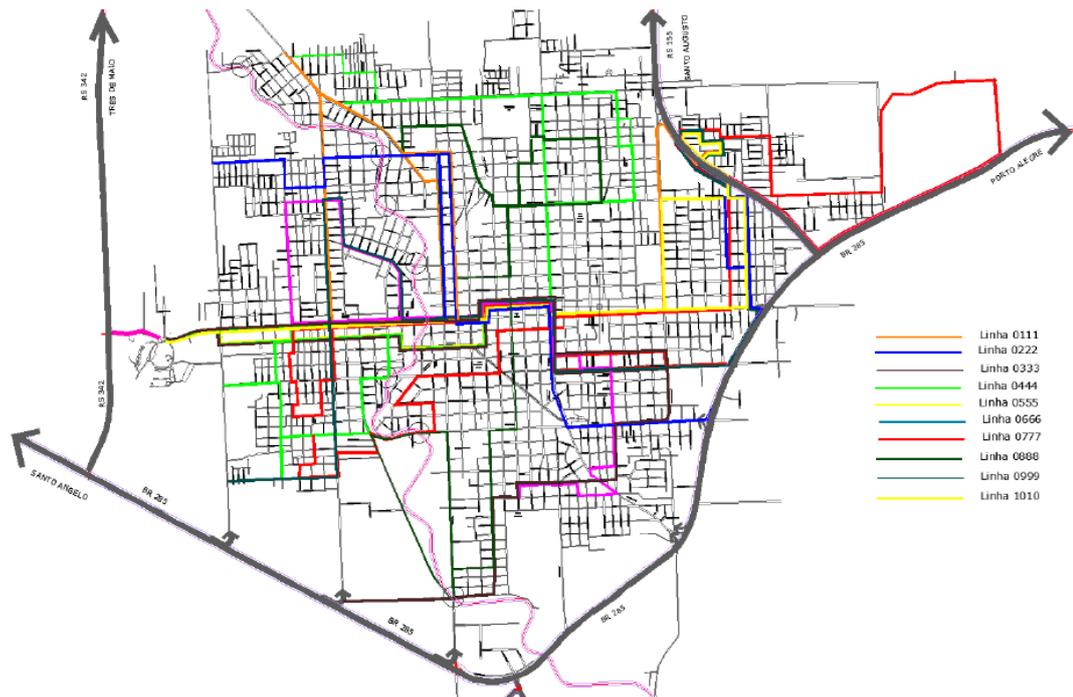
Desta forma, considerando as características da estação de recarga apresentada, foi elaborada uma estimativa da curva de carga ocasionada pela conexão dos veículos ao sistema elétrico de distribuição, considerando que a recarga sempre se dá a partir do momento em que a carga da bateria se aproximar do final, ou durante o encerramento das operações das linhas de ônibus, permanecendo o veículo conectado ao sistema até completar a carga total das baterias. Por se tratar de uma área exclusivamente urbana e a cidade utilizada na análise ser de pequeno porte, a maioria das rotas levantadas não ultrapassou a distância de 20km por trajeto. Assim, de acordo com a capacidade nominal das baterias apresentada pelo fabricante do BYD K9 (a qual é de 324 kWh), as rotas analisadas seriam atendidas de forma satisfatória. Porém, após a análise da energia consumida por veículo em cada trajeto, foi constatado que, em alguns trechos, uma carga completa das baterias não se apresentou suficiente, gerando a necessidade de mais de uma recarga por dia.

5.4 ROTAS ANALISADAS

O sistema de transporte público urbano que atende o município de Ijuí é constituído por 13 linhas com itinerários transversais, das quais, doze são distribuídas ao longo da área urbana da cidade, enquanto uma faz a ligação interdistrital. O atendimento das linhas é efetuado por veículos convencionais e micro-ônibus, diferenciando-se na forma de operação, nos valores das tarifas e nas estações de parada (MEDIANEIRA TRANSPORTE, 2016). No estudo de caso apresentado foram consideradas, tão somente, as linhas urbanas atendidas por veículos convencionais, pois as linhas que utilizam o chamado “Transporte Diferenciado” são compostas por apenas três veículos, e de pequeno porte, ocasionando um menor impacto energético,

além de não possuírem pontos de parada fixos, característica que dificulta uma estimativa do consumo devido a aleatoriedade no ciclo de condução. Os traçados das dez linhas consideradas no estudo e seus respectivos prefixos são apresentadas na Figura 15.

Figura 15 - Itinerário das linhas de ônibus que atendem o município de Ijuí



Fonte: (MUNICÍPIO DE IJUI, 2011, p. 17)

Em cada uma destas linhas foi efetuado o levantamento do traçado, da distância e das características inerentes as rotas, sendo todos os dados organizados e relacionados de forma a viabilizar a aplicação no modelo elaborado. Na Tabela 7 são relacionadas as dez rotas analisadas no estudo, seus prefixos, as distâncias percorridas e o número de estações de embarque e desembarque existentes.

Tabela 7 - Linhas de ônibus urbanos convencionais analisadas

PREFIXO DA LINHA	NOME DA LINHA	DISTÂNCIA TOTAL DO PERCURSO	NÚMERO DE ESTAÇÕES	DISTÂNCIA MÉDIA ENTRE ESTAÇÕES
0111	Alvorada/Modelo	15,1 km	48	314,58m
0888	Boa Vista/Cotrijuí	20,7 km	51	405,88m
0777	Glória/Cotrijuí	14,3 km	48	297,91m
0333	Independência/Campus	17,48 km	46	380m
0222	Jardim/Herval	19,9 km	57	349,12m
1010	Jardim/Modelo/Campus	16,6 km	41	404,87m
0777	Lambari/Cotrijuí	15,83 km	48	329,79m
0555	Modelo/Cotrijuí	20,7 km	53	390,56m
0444	T.Neves/Unimed	14,6 km	49	297,95m
0999	São Geraldo/Progresso	16,5km	38	434,21m

Fonte: Autor

Nestas rotas relacionadas, o comportamento e os períodos de operação de cada ônibus variam, de acordo com o dia da semana, bem como o número de veículos em operação simultânea e o número de viagens diárias efetuadas. Isto fez com que fosse necessário o levantamento dos horários de início e término de cada uma das rotas, o número de veículos em operação simultânea e o número de viagens diárias efetuadas durante os dias úteis, sábados e domingos. Na Tabela 8, Tabela 9 e Tabela 10 são apresentados estes dados, em cada uma das situações expostas. Nota-se que na maioria das linhas, os horários de início de operação situam-se entre as seis e sete horas da manhã, sendo as mesmas encerradas, nos dias úteis no período compreendido entre as dezenove e vinte e quatro horas.

Tabela 8 - Número de viagens diárias efetuadas em dias úteis por cada linha

NOME DA LINHA	Nº DE VEÍCULOS EM OPERAÇÃO	NÚMERO DE VIAGENS DIÁRIAS	HORÁRIOS DE SAÍDA/RETORNO A GARAGEM
Alvorada/Modelo	4	56	6:00/0:15
Boa Vista/Cotrijuí	2	13	6:25/19:25
Glória/Cotrijuí	2	25	6:10/23:05
Independência/Campus	2	12	6:50/19:15
Jardim/Herval	1	14	6:00/19:50
Jardim/Modelo/Campus	1	12	7:00/19:30
Lambari/Cotrijuí	2	14	6:25/19:45
Modelo/Cotrijuí	1	12	5:10/20:05
T.Neves/Unimed	2	14	6:50/19:35
São Geraldo/Progresso	2	18	6:05/23:30

Fonte: Autor

Tabela 9 - Número de viagens diárias efetuadas nos sábados por cada linha

NOME DA LINHA	Nº DE VEÍCULOS EM OPERAÇÃO	NÚMERO DE VIAGENS DIÁRIAS	HORÁRIOS DE SAÍDA/RETORNO A GARAGEM
Alvorada/Modelo	4	42	6:15/0:20
Boa Vista/Cotrijuí	1	6	6:25/12:30
Glória/Cotrijuí	2	18	6:10/20:20
Independência/Campus	1	5	6:50/12:30
Jardim/Herval	1	14	6:00/19:50
Lambari	2	14	6:35/19:45
Modelo/Cotrijuí	1	6	5:10/12:40
T.Neves/Unimed	2	14	6:50/19:35
São Geraldo/Progresso	2	18	6:05/23:25

Fonte: Autor

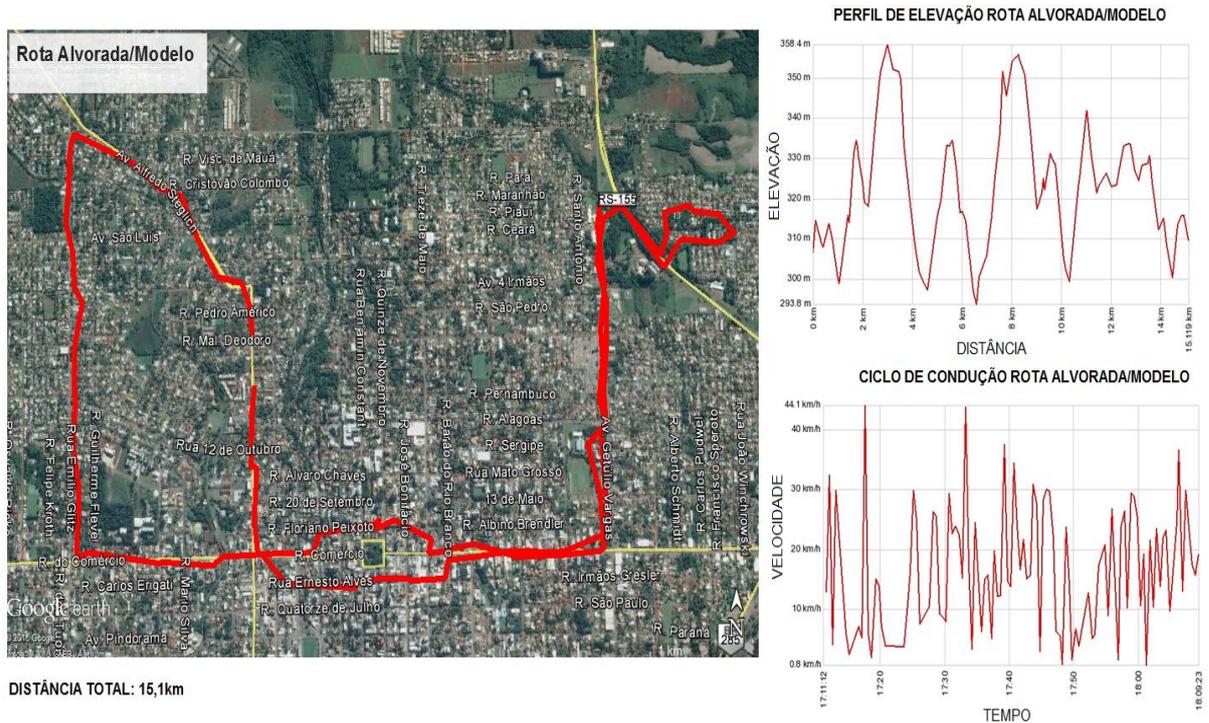
Tabela 10 - Número de viagens diárias efetuadas nos domingos por cada linha

NOME DA LINHA	Nº DE VEÍCULOS EM OPERAÇÃO	NÚMERO DE VIAGENS DIÁRIAS	HORÁRIOS DE SAÍDA/RETORNO A GARAGEM
Alvorada/Modelo	2	32	6:20/00:20
Glória/Cotrijuí	1	14	7:00/19:55
Jardim/Herval	1	14	6:25/19:50
Lambari/Cotrijuí	1	12	6:30/19:45
São Geraldo/Progresso	1	14	6:40/19:55

Fonte: Autor

Além dos dados apresentados nas tabelas, para cada rota analisada, foi elaborada uma planilha de dados em formato de arquivo “.xlsx”, relativos aos perfis de elevação de cada trajeto e os seus respectivos ciclos de condução, sendo convertidos em sinais e aplicados ao modelo elaborado em Matlab®, possibilitando desta forma, a mensuração da energia total consumida. Na Figura 16 é apresentado um exemplo dos perfis de elevação e ciclos de condução da rota Alvorada/Modelo, com seus respectivos sinais utilizados para a aplicação no modelo elaborado.

Figura 16 - Traçado, elevação e ciclo de condução da rota Alvorada/Modelo



Fonte: Autor

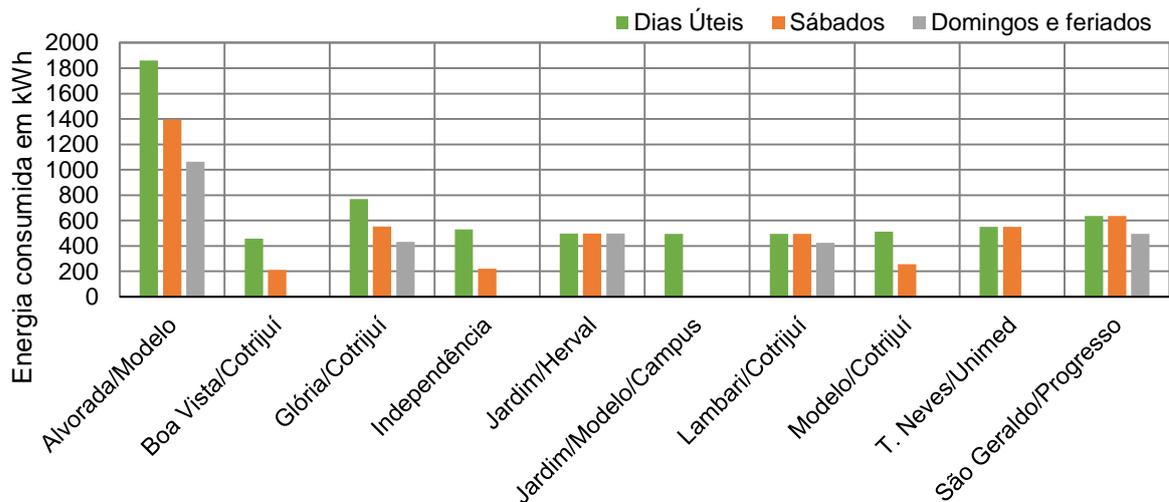
A partir dos perfis de elevação e ciclos de condução, também foram fragmentadas as rotas de forma a possibilitar o cálculo dos consumos energéticos em cada trecho considerando o número de passageiros transportados, as inclinações das vias, e os períodos de aceleração e desaceleração dos veículos. Na maioria das rotas, as distâncias dos segmentos, após a divisão, ficaram próximas a 45 metros. Não foi considerado no cálculo do consumo energético a regeneração de energia possível de ser efetuada através dos sistemas de frenagem dos veículos devido à complexidade de mensuração e a não disponibilidade de dados referentes a estes sistemas do veículo considerado no estudo. Porém, conforme os perfis de elevação apresentados percebe-se que grande parte da energia pode ser recuperada, pois os trechos são compostos em grande parte por declives.

5.5 RESULTADOS OBTIDOS

Após relacionados todos os dados necessários, através da aplicação da metodologia proposta no capítulo 4, foi efetuada a mensuração do consumo energético em cada rota, considerando a substituição dos ônibus a diesel atualmente em operação pelos ônibus elétricos BYD k9. Foram consideradas durante a simulação

as alterações ocorridas no comportamento das linhas nos diferentes dias da semana, bem como os distintos ciclos de condução, elevação, carga, número de viagens, etc. Os resultados do consumo energético em kWh obtidos após a aplicação dos valores no modelo elaborado em Simulink estão apresentados na Figura 17, sendo os mesmos separados por cada linha de ônibus, em dias úteis, sábados e domingos.

Figura 17 - Consumo energético das linhas em dias úteis e finais de semana



Fonte: Autor

Conforme a Figura 17, percebe-se que o maior gasto energético está relacionado a linha “Alvorada/Modelo”, a qual resulta em um consumo diário de 1861,44 kWh em dias úteis e 1396,08 kWh e 1063,68 kWh em sábados e domingos respectivamente. Isto se deve à utilização de um maior número de veículos nesta rota, uma maior inclinação no trajeto, e ao maior número de viagens diárias. Nas demais linhas, o valor da energia consumida por trajeto se manteve mais próximo a um valor médio, devido ao comportamento semelhante e ao menor número de viagens diárias. Após definidos os valores consumidos por rota, foi efetuada a mensuração do valor total do consumo energético mensal, sendo multiplicados os valores de consumo apresentados pelo número de viagens diárias efetuadas, em cada uma das três situações, resultando em um valor final em MWh/mês. Os valores individuais e o número de viagens estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Consumo energético mensal por linha obtido na simulação

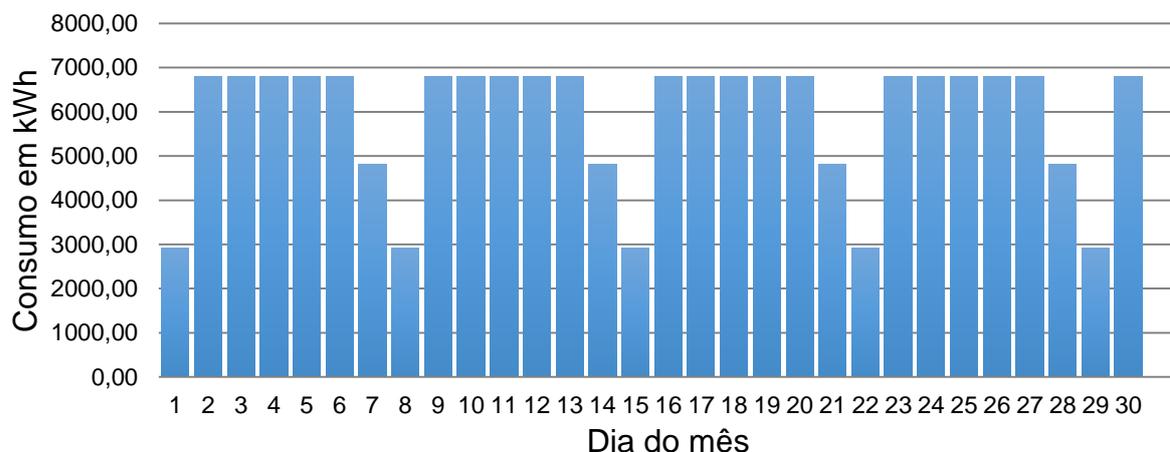
NOME DA LINHA	NÚMERO DE VIAGENS MENSAIS	CONSUMO ENERGÉTICO POR VIAGEM	CONSUMO MÉDIO POR km	CONSUMO TOTAL MENSAL
Alvorada/Modelo	1504	33,24 kWh	2,20 kWh/km	49,99 MWh
Boa Vista/Cotrijuí	297	35,12 kWh	1,69 kWh/km	10,43 MWh
Glória/Cotrijuí	667	30,77 kWh	2,15 kWh/km	20,52 MWh
Independência/Campus	272	44,16 kWh	2,52 kWh/km	12,01 MWh
Jardim/Herval	420	35,59 kWh	1,78 kWh/km	14,95 MWh
Jardim/Modelo/Campus	252	41,24 kWh	2,48 kWh/km	10,39 MWh
Lambari/Cotrijuí	410	35,32 kWh	2,23 kWh/km	14,48 MWh
Modelo/Cotrijuí	276	42,64 kWh	2,05 kWh/km	11,77 MWh
T.Neves/Unimed	350	39,21 kWh	2,68 kWh/km	13,72 MWh
São Geraldo/Progresso	520	35,37 kWh	2,14 kWh/km	18,39 MWh
TOTAL:	4968	-	-	176,66 MWh

Fonte: Autor

Se Considerado um mês com trinta dias, sem feriados, iniciando no domingo e encerrando em uma segunda-feira, seriam consumidos, aproximadamente, 176,66 MWh/mês aproximadamente, tendo em vista a operação normal das dez linhas existentes na empresa. Os picos de consumo ocorrem em dias úteis, correspondendo a 6802,07 kWh diários, frente ao consumo de 4815,64 kWh nos sábados, e 2911,74 kWh nos domingos. A estimativa da curva de carga mensal, desconsiderando os feriados e meses maiores ou menores que trinta dias, é apresentada na

Figura 18.

Figura 18 - Estimativa da curva de carga mensal



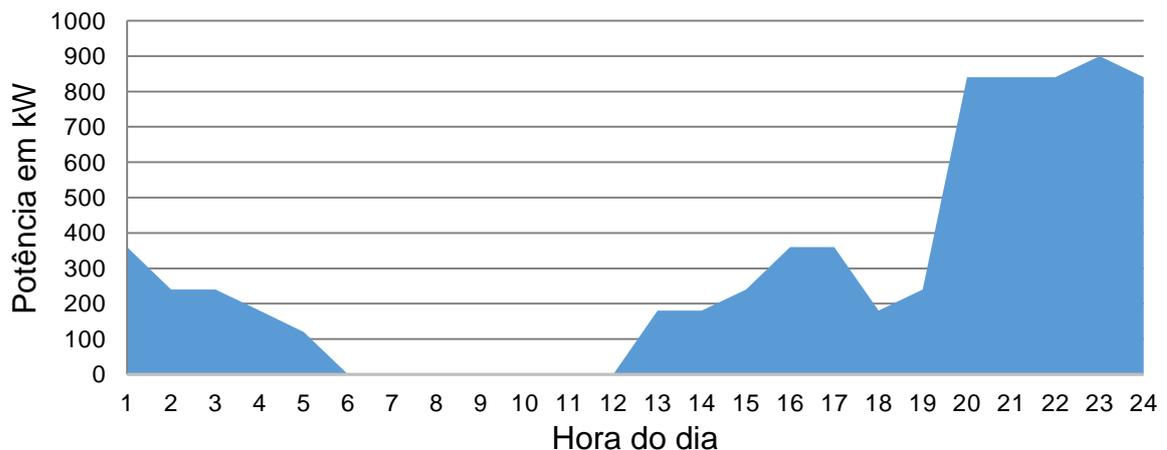
Fonte: Autor

Na elaboração das curvas de carga diárias, foi considerado que sempre que esgotada a carga das baterias ou ao final de sua operação, os veículos são

deslocados até a garagem e conectam-se aos carregadores, permanecendo assim até completarem a sua carga total. Como os horários, o número de veículos e o número de linhas em operação são diferentes em cada caso, as curvas foram separadas por dias úteis, sábados e domingos, da mesma forma que na mensuração dos consumos diários por rota.

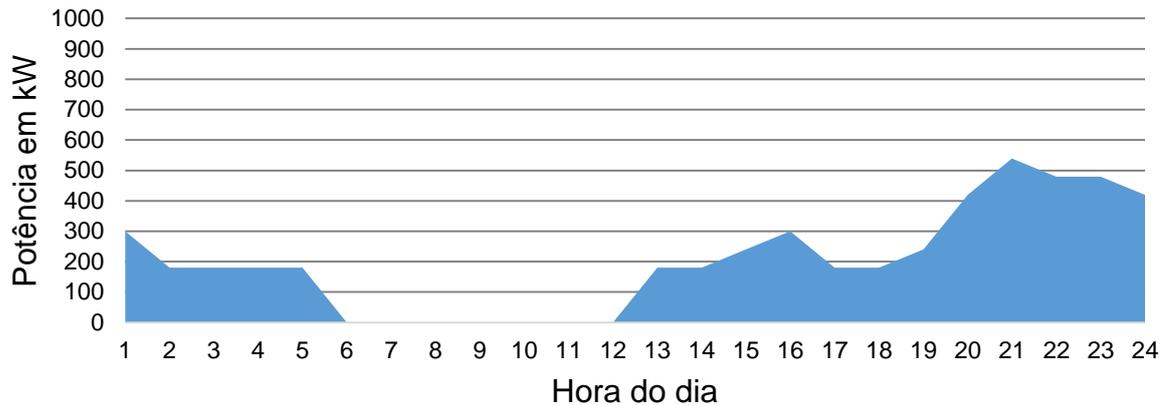
Para a determinação do tempo de recarga dos veículos, foram utilizadas as informações fornecidas pelo fabricante, que afirma que para uma recarga completa são necessárias 5 horas, correspondendo à capacidade máxima da bateria que é 324 kWh. Na mensuração da potência drenada da rede durante a recarga, foi tomado como base o número de carregadores em operação simultânea, considerando a potência média de 60 kW por carregador, conforme os dados fornecidos pela BYD. Na Figura 19, Figura 20 e Figura 21 são apresentadas as estimativas das curvas de carga nos dias úteis, sábados e domingos respectivamente.

Figura 19 - Estimativa da curva de carga diária em dias úteis



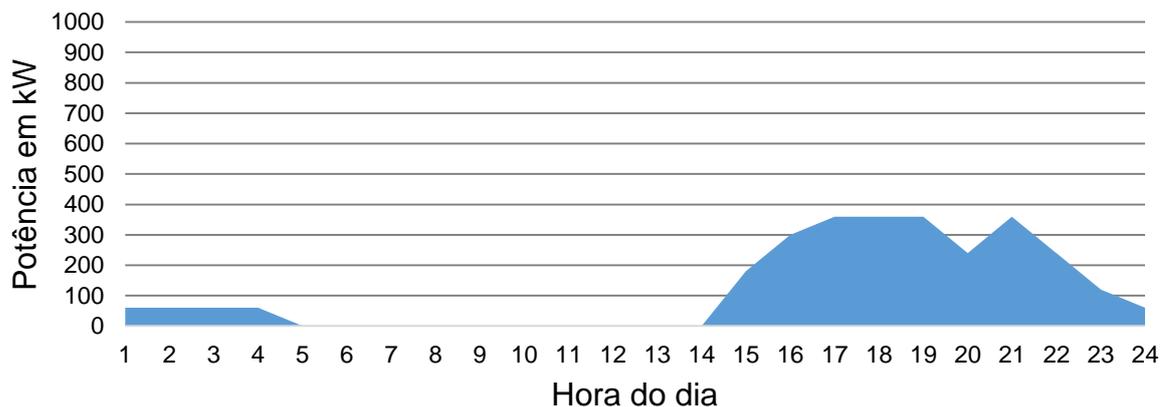
Fonte: Autor

Figura 20 - Estimativa da curva de carga diária nos sábados



Fonte: Autor

Figura 21 - Estimativa da curva de carga diária nos domingos



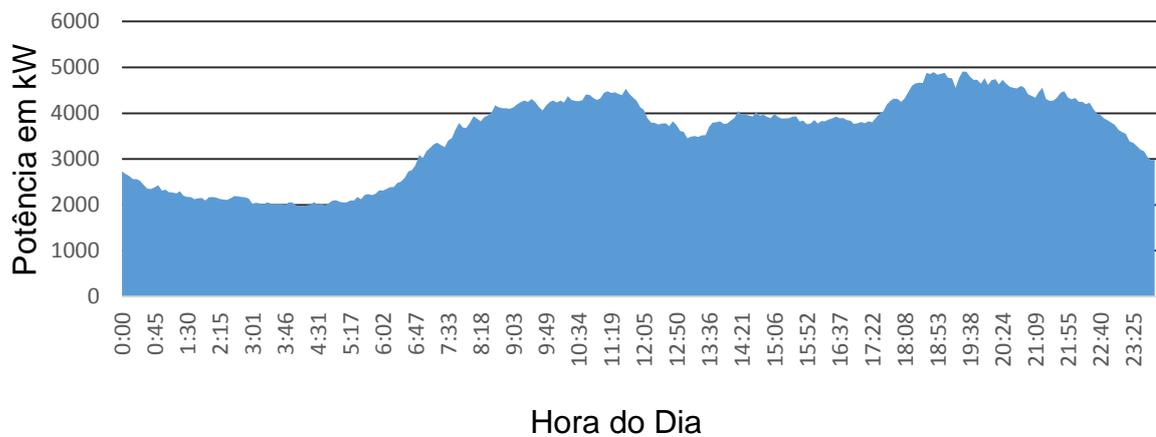
Fonte: Autor

Conforme as curvas de carga apresentadas, percebe-se que, considerando o uso nas condições citadas, a demanda máxima exigida da rede de distribuição é de aproximadamente 900kW, às 23 horas, nos dias úteis. Nos finais de semana, devido à redução do número de veículos em operação, os picos de demanda são relativamente menores, correspondendo a 540 kW nos sábados, às 21 horas, e nos domingos 360 kW, no período compreendido entre às 18 e 21 horas.

Tendo em vista que as recargas consideradas no estudo seriam efetuadas na garagem da empresa, foram recolhidos com a concessionária de energia local, o Departamento Municipal de Energia Elétrica de Ijuí - DEMEI, os dados de carregamento e a capacidade de carga do alimentador correspondente a rede de distribuição que atende a empresa analisada. Os dados fornecidos foram referentes

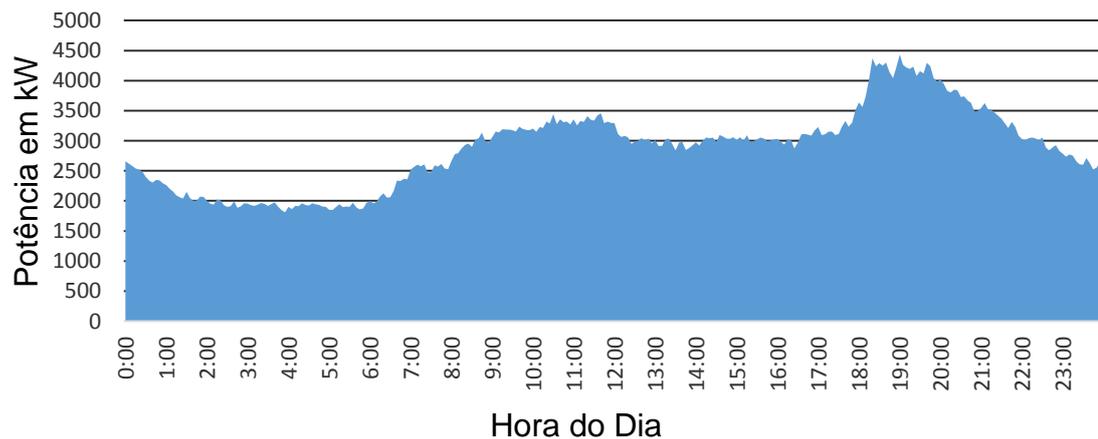
ao alimentador cadastrado como “AL13”, tendo como base o mês de julho de 2016, conforme informado pela concessionária. Com isto, visando a comparação entre o real carregamento do alimentador e o suposto acréscimo de carga gerado pela substituição da atual frota da empresa pelos modelos BYD K9, considerados na simulação, foram elaboradas as curvas de carga deste alimentador, também considerando dias úteis, sábados e domingos. Na Figura 22, Figura 23 e Figura 24 estão apresentadas estas curvas.

Figura 22 - Curva de carga em dias úteis do alimentador AL13



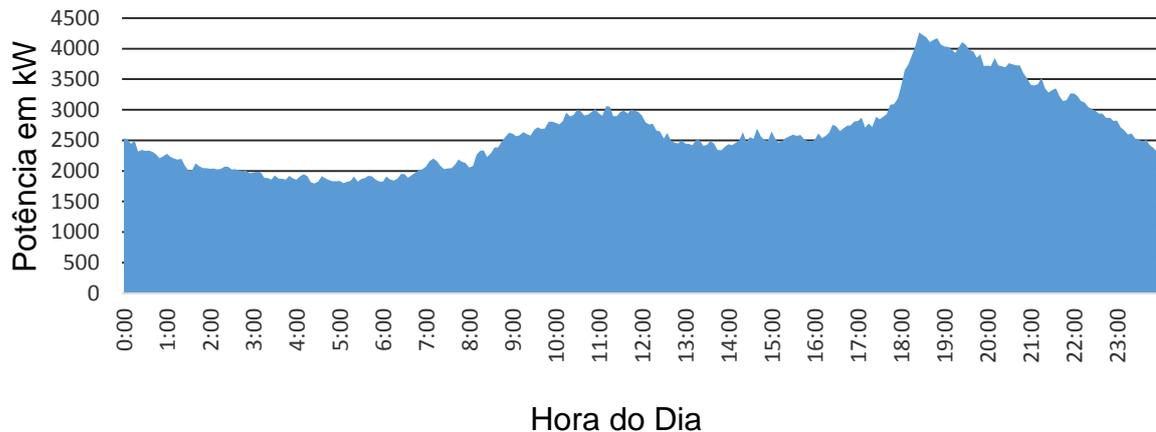
Fonte: (DEPARTAMENTO MUNICIPAL DE ENERGIA ELÉTRICA DE IJUÍ, 2016)

Figura 23 - Curva de carga nos sábados do alimentador AL13



Fonte: (DEPARTAMENTO MUNICIPAL DE ENERGIA ELÉTRICA DE IJUÍ, 2016)

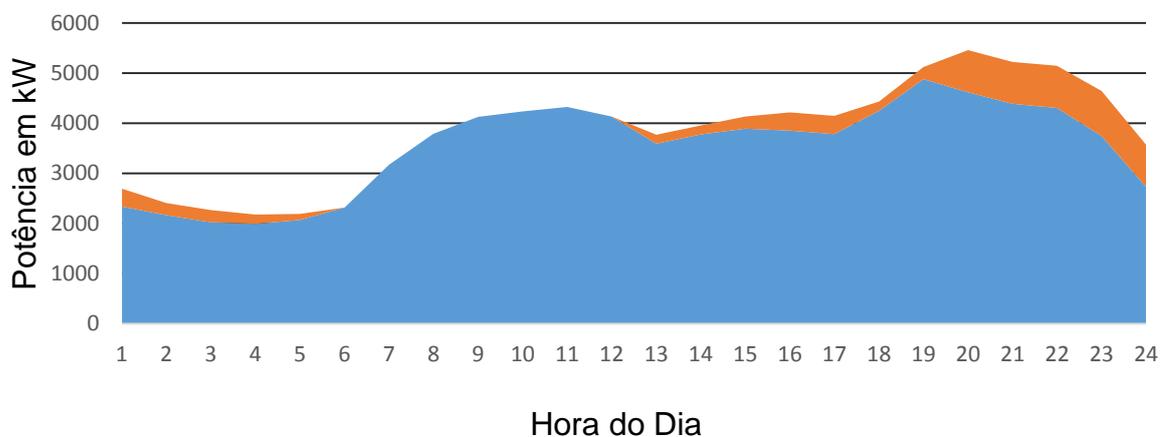
Figura 24 - Curva de carga diária nos domingos do alimentador AL13



Fonte: (DEPARTAMENTO MUNICIPAL DE ENERGIA ELÉTRICA DE IJUÍ, 2016)

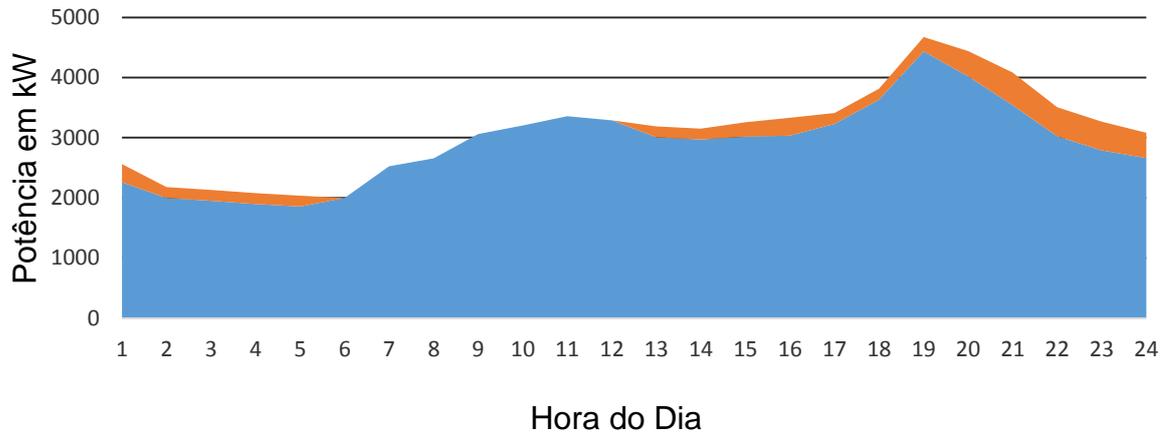
Assim, com as curvas de carga do alimentador AL13, possível ponto de fornecimento de energia para o carregamento dos ônibus considerados, foi efetuada uma análise de carga com o acréscimo de demanda ocasionado pela utilização dos ônibus em questão, gerando as curvas de carga apresentadas na Figura 25, na Figura 26 e na Figura 27, correspondendo a demanda nos dias úteis, sábados e domingos com a utilização da frota de ônibus elétricos puros considerada. Nestas figuras a curva em azul representa a carga atual do alimentador, e a curva laranja representa o possível acréscimo de carga referente a utilização dos ônibus elétricos puros, conforme as condições estabelecidas na simulação.

Figura 25 - Demanda do alimentador AL13 em dias úteis com a utilização da frota



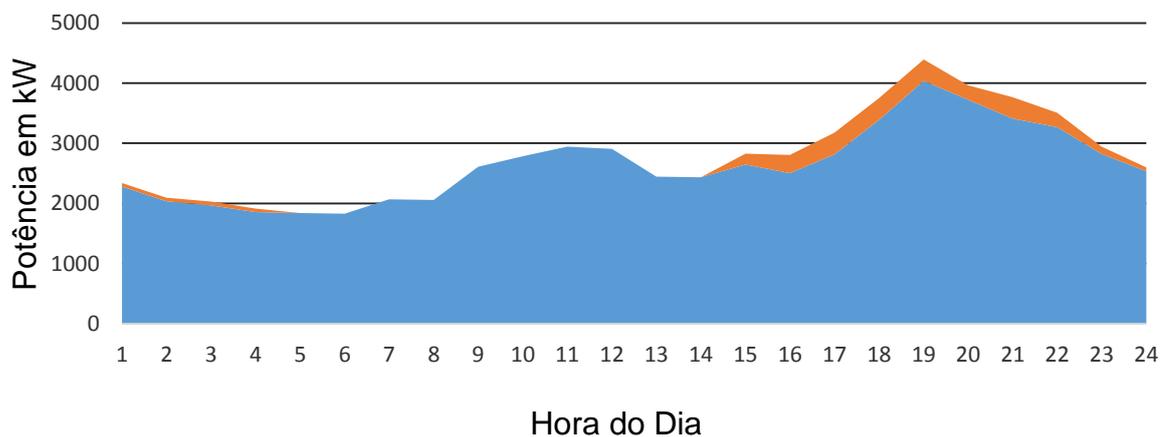
Fonte: Autor

Figura 26 - Demanda do alimentador AL13 nos sábados com a utilização da frota



Fonte: Autor

Figura 27 - Demanda do alimentador AL13 nos sábados com a utilização da frota



Fonte: Autor

Com base nas curvas de carga analisadas, tendo em vista que conforme informado pela concessionária o alimentador AL13 possui capacidade de atender uma demanda máxima de 11MW, a substituição da frota da empresa Medianeira Transporte por modelos Elétricos Puros poderia ser atendida de forma satisfatória pela concessionária de energia, sem a necessidade de grandes alterações no sistema de distribuição. Entretanto, uma análise relacionada ao fator de potência, quedas de tensão em todo o trecho da rede e geração de distúrbios devido a não linearidade da carga inserida, apesar de não ser considerada na afirmação, em uma implementação futura se faz necessária, considerando as condições de operação do sistema como um todo.

5.6 RESUMO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentados os resultados de acréscimo de carga em um alimentador urbano obtidos através de simulação, considerando a substituição da frota de ônibus a diesel da empresa Medianeira Transporte por modelos elétricos puros. Ao final foram geradas curvas de carga correspondentes às estações de recarga utilizadas no modelo de ônibus elétrico BYD K9, sendo as demandas geradas, acrescentadas a curva de carga do possível alimentador que forneceria a energia elétrica para estas estações.

Considerando os dados gerados, percebe-se que o acréscimo de demanda é atendido de forma satisfatória pelo alimentador estudado, não necessitando de obras de ampliação em sua capacidade, para a frota considerada. Constata-se também, que existe grande variação nas curvas de demanda em função dos dias da semana, sendo o acréscimo de carga reduzido em sábados e domingos, bem como, em horários específicos.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 CONCLUSÕES

Dentre as várias opções disponíveis para a substituição dos tradicionais meios de transporte coletivo por elétricos, os ônibus elétricos puros apresentam-se como uma das alternativas mais promissoras tecnicamente, pois podem facilmente substituir os veículos tradicionais, sem grandes obras de infraestrutura, ao contrário das outras opções de transporte elétrico coletivo. Além do mais, os ônibus elétricos são mais confortáveis e fáceis de dirigir, tanto em áreas urbanas, quanto em rodovias, e atualmente dispõem de boa aceleração e potência. Aliado a isto, no caso do Brasil, como a matriz energética é basicamente composta por recursos hídricos e fontes renováveis, a substituição dos ônibus a diesel por elétricos ocasionaria uma redução considerável nas emissões de poluentes, tanto a nível local, quanto global, pois os motores elétricos apresentam um melhor rendimento que os motores a combustão.

Por outro lado, os ônibus disponíveis no mercado possuem um alto custo de aquisição quando comparados aos modelos a diesel, o qual está diretamente relacionado a capacidade das baterias, característica que faz com que estes veículos percam competitividade quando considerados somente os custos iniciais. Porém, a longo prazo, se considerados os custos de operação, constata-se que estes são extremamente menores, tendo em vista que os gastos com trocas de filtros de combustíveis, fluidos, óleos lubrificantes e demais componentes, inexistentes nos modelos elétricos, são eliminados. Além disso, conforme a Resolução nº414 de 2010 da Aneel, o fornecimento de energia elétrica destinado ao serviço público de tração elétrica possui tarifa diferenciada, o que torna o custo por KWh reduzido nestes casos. Outro fator, também a ser considerado, está relacionado aos sistemas de frenagem regenerativa, os quais não foram analisados no estudo. Devido ao menor desgaste proporcionado aos sistemas de freios, e ao reaproveitamento da energia cinética do veículo, estes sistemas refletem diretamente na redução dos custos de operação.

Entretanto, no estudo apresentado, não foi efetuada a comparação entre os custos, devido a não disponibilidade dos valores de aquisição dos modelos de ônibus da BYD, nem das tarifas aplicadas à energia elétrica, na classe de consumo correspondente. Isto impossibilitou também a comparação entre o custo-benefício dos modelos elétricos, e o tempo de retorno de investimento, considerando a substituição

dos veículos nas rotas analisadas. Outro custo não comparado foi em relação a infraestrutura necessária para a recarga destes veículos, pois devido a demanda acrescentada, seriam necessárias adequações nas instalações elétricas da empresa, e dependendo do caso, obras de reforço nos circuitos alimentadores, referentes ao sistema de distribuição. Estes custos além de serem variáveis, dependem de contratos e acordos efetuados entre a empresa e a concessionária de energia elétrica local.

Em relação aos impactos ocasionados na rede elétrica, ao final da análise concluiu-se que o acréscimo de demanda ocasionado pela migração do transporte a diesel por elétrico nas linhas analisadas não apresenta grandes problemas, sendo possível o atendimento das cargas através do alimentador utilizado no estudo. Considerando que este alimentador possui capacidade de atender uma demanda de até 11MW, e a sua curva de carga atual se mantém em torno de 5MW, com um aumento aproximado de 1MW, correspondente a demanda máxima acrescentada pelos ônibus, fica evidenciada a viabilidade técnica da utilização apresentada no estudo, existindo ainda uma boa margem de sobra de potência, não implicando assim em grandes alterações no sistema. Porém, existe a necessidade de uma coordenação dos horários de recarga dos veículos na empresa, pois caso a recarga seja efetuada sem controle algum, como considerado no estudo, os picos de demanda ocorridos coincidiriam com os horários de pico dos alimentadores locais, o que não é desejável.

Finalizando, conclui-se que a substituição dos ônibus a diesel por elétricos na empresa analisada, se apresentou tecnicamente viável, considerando as condições atuais do sistema elétrico da cidade. Porém, apesar de apresentar várias vantagens, que vão desde aspectos ambientais, técnicos e econômicos, a sua relação custo-benefício deve ser muito bem analisada. Despesas com infraestruturas de recarga, o elevado custo das baterias e o baixo valor de aquisição de modelos a diesel diminuem o interesse das empresas de transporte em opções mais limpas e eficientes, pois o investimento na tecnologia apresentada somente apresenta retorno financeiro a longo prazo. Além disso, as vantagens da utilização de modelos elétricos não podem ser consideradas uniformes em todas as regiões, pois características locais como custo do óleo diesel, relevo do terreno, disponibilidade de energia elétrica, dentre vários outros fatores influenciam de forma significativa a relação custo-benefício da migração entre as tecnologias.

6.2 TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros, primeiramente, pode-se mencionar o aprimoramento do modelo veicular utilizado no trabalho, de forma a considerar as perdas decorrentes dos processos de carga e descarga das baterias, dos sistemas auxiliares dos veículos, bem como as parcelas energéticas recuperadas através dos sistemas de freios regenerativos, valores os quais foram desconsiderados no estudo apresentado. Além disso, diante dos valores obtidos, se faz necessário um estudo detalhado do carregamento dos alimentadores e demais componentes relacionados a rede elétrica de distribuição local, tendo em vista as curvas de carga e os consumos energéticos obtidos através do estudo. Isto proporcionaria uma análise precisa dos pontos críticos, fornecendo dados concretos os quais podem ser utilizados posteriormente para a definição das necessidades de ampliações, adequações e investimentos na rede e seus respectivos dispositivos.

Outra análise que se faz necessária, está vinculada aos sistemas de recarga dos veículos. Como o modelo de ônibus analisado somente possui estações de recarga lenta, não foi possível a elaboração de uma análise considerando o impacto decorrente da utilização de estações de recarga rápida, as quais de certa forma, são mais prejudiciais ao sistema de distribuição do que as de recarga lenta. Além disso, devido a tecnologia de recarga rápida ser relativamente recente, não existem ainda normas específicas relacionadas as tensões, potências, e topologias das estações, fazendo com que sejam são disponibilizadas poucas informações relativas aos sistemas existentes. Sendo assim, fica também como sugestão de trabalho futuro, uma análise do impacto relacionado ao uso de sistemas compostos por estações de recarga rápida, mesclados com sistemas de recarga lenta, tendo em vista o sistema elétrico local existente.

6.3 TRABALHOS PUBLICADOS

Durante a elaboração deste trabalho foi gerado o seguinte artigo científico publicado em congresso internacional:

- **4th EEVC - European Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Congress**

Título do trabalho: “Analysis of the Impact of the Use of the Collective Electric Transport in the Electrical Distribution System”

Data: 2 a 4 de Dezembro de 2015

Local: Bruxelas, Bélgica.

REFERÊNCIAS

- AEROMOVEL BRASIL S.A. **Aeromóvel**, 2016. Disponível em: <<http://www.aeromovel.com.br/>>. Acesso em: 25 fev. 2016.
- AMES, V. D. B. **Controvérsias Tecnológicas: O caso do Aeromóvel em Porto Alegre/RS**. UFRGS. Porto Alegre, p. 161. 2014.
- ANDRADE, C. E. S. D.; D'AGOSTO, M. D. A. A contribuição dos sistemas metroviários para o atingimento das metas de redução das emissões de gases do efeito estufa – estudos em metrô do Brasil e de Portugal. **Revista dos Transportes Públicos - ANTP**, São Paulo, 2015. 29-40.
- ANTP. **Relatório 2013 – Sistema de Informações da Mobilidade Urbana da ANTP**. Associação Nacional de Transportes Públicos. São Paulo. 2015a.
- ANTP. **Relatório Comparativo 2003/2012**. Associação Nacional de Transportes Públicos. São Paulo, p. 36. 2015b.
- BOMBARDIER. INNOVIA Monorail 300 – São Paulo, Brazil. **Bombardier**, 2016. Disponível em: <<http://www.bombardier.com/content/bombardiercom/en/transportation/projects/project.innovia-sao-paulo-brazil.html?f-region=americas>>. Acesso em: 05 nov. 2015.
- BOSSCHE, P. V. D. Electric Vehicle Charging Infrastructure. **Electric and Hybrid Vehicles: Power Sources, Models, Sustainability, Infrastructure and the Market**, ed. by G. Pistoia, Amsterdam, 2010.
- BOULANGER, A. et al. Vehicle Electrification: Status and Issues. **Proceedings of the IEEE**, v. 99, n. 6, p. 1116-1138, jun. 2011.
- BRITTO, J. F. F. H. **Modelagem Dinâmica do Sistema Aeromóvel de Transportes**. UFRGS. Porto Alegre, p. 138. 2008.
- BYD. BYD - BUILD YOUR DREAMS, 2016. Disponível em: <<http://www.byd.com/la/auto/ebus.html>>. Acesso em: 2016 maio 10.
- C40/ISSRC. **Low carbon technologies can transform Latin America's bus fleets. Lessons from the C40 – CCI Hybrid & Electrical Bus Test Program**. IDB. [S.l.], p. 50. 2013.
- CAMPATELLI, G. et al. **New business models for electric mobility - A possible future scenario**. Electric Vehicle Conference (IEVC), 2014 IEEE International. Florença: IEEE. 2014. p. 1-8.
- CARVALHO, C. H. R. D. **Emissões Relativas de Poluentes do Transporte Motorizado de Passageiros nos Grandes Centros Urbanos Brasileiros**. IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Brasília, p. 40. 2011.
- DEMERY JR, L. W.; SETTY, M. D. **Rail Transit Systems Worldwide: Traffic Density & Related Statistics**. Publictransit.us. Vallejo, p. 16. 2008.

DEPARTAMENTO MUNICIPAL DE ENERGIA ELÉTRICA DE IJUÍ. DEMEI. **DEMEI Ijuí**, 2016.

DYKE, K. J.; SCHOFIELD, ; BARNES,. The Impact of Transport Electrification on Electrical Networks. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 57, n. 12, p. 3917-3926, dez. 2010.

ELETRA INDUSTRIAL LTDA. Elétrico Puro | Eletra Bus - Tecnologia em tração elétrica. **Eletrabus**, 2015. Disponível em: <http://www.eletrabus.com.br/eletra_por/tecnologia_eletrico.html>. Acesso em: 01 mar. 2016.

EMTU. Projetos de desenvolvimento Tecnológico. **Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos de São Paulo**, 2015. Disponível em: <<http://www.emtu.sp.gov.br/EMTU/home.fss>>. Acesso em: 04 out. 2015.

EPE. **Balanco Energético Nacional 2015 - Relatório Síntese - Ano Base 2014**. Ministério de Minas e Energia. Rio de Janeiro, p. 61. 2015.

FERNANDEZ, D. et al. **Electrical vehicles impact analysis for distribution systems with THD and load profile study**. Power Electronics and Power Quality Applications (PEPQA), 2015 IEEE Workshop on. Bogotá: IEEE. 2015. p. 1-6.

FERRAZ, A. C. P.; TORRES, G. E. **Transporte Público Urbano**. 2. ed. São Carlos: Rima Editora, 2004. 428 p.

FERRO, A. Trólebus 60 anos - pelos fios da resistência. **ABVE**, 2009. Disponível em: <<http://www.abve.org.br/destaques/2009/destaque09015.asp>>. Acesso em: 08 abr. 2015.

FILIPPO, G. D.; MARANO, V.; SIOSHANSI, R. Simulation of an Electric Transportation System at The Ohio State University. **Applied Energy**, Amsterdã, v. 113, p. 1686–1691, jan. 2014.

GALLO, J. B.; RUBIN, T. B.; TOMIC, J. **Peak Demand Charges and Electric Transit Buses**. U.S. Department of Transportation. Pasadena, p. 56. 2014.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **IBGE**, 2016. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 10 mar. 2016.

IEC. EVs charging wirelessly - IEC E-tech. **International Electrotechnical Commission**, 2016. Disponível em: <<http://iecetech.org/issue/2015-09/EVs-charging-wirelessly>>. Acesso em: 20 maio 2016.

IRIZAR. Irizar Coaches e Buses. **The Irizar Brand**, 2016. Disponível em: <<http://www.irizar.com/en/irizar>>. Acesso em: 10 abr. 2016.

JANG, Y. ; KO, D. **System Architecture and Mathematical Model of Public Transportation System Utilizing Wireless Charging Electric Vehicles**. 15th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. Anchorage: IEEE. 2012. p. 1055-1060.

LARMINIE, J.; LOWRY, J. **Electric Vehicle Technology Explained**. 2. ed. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2012. 340 p.

MARTINS, J. Eletricidade sobre rodas. **O Setor Elétrico**, São Paulo, n. 76, p. 157, Maio 2012.

MEDIANEIRA TRANSPORTE. **Medianeira Transportes Urbanos**, 2016. Disponível em: <<http://www.medianeiratransporte.com.br/>>. Acesso em: 03 jun. 2016.

MOREIRA, M. O. **Um estudo de caso para a previsão de carga de médio e longo prazo brasileira**. UNICAMP. Campinas, p. 2015. 2015.

MORRISON, A. **The Tramways of Brazil**. 1. ed. Nova York: Bonde Press, 1989. 197 p.

MUNICÍPIO DE IJUI. **Plano Diretor de Mobilidade Urbana - Redes de Mobilidade Urbana**. Município de Ijuí - Poder Executivo. Ijuí, p. 48. 2011.

NAUMANN, S.; VOGELPOHL, H. **Models and Methods for the Evaluation and the Optimal Application of Battery Charging and Switching Technologies for Electric Busses**. Electromobility+ Conference. Berlim: [s.n.]. 2015. p. 74.

NEW FLYER. newflyer.com. **Xcelsior New Flyer**, 2016. Disponível em: <<http://www.newflyer.com/index/xcelsior>>. Acesso em: 10 mar. 2016.

OLIVEIRA, U. J. D. F. et al. **Monotrilho - Uma opção de transporte público para a região metropolitana da Grande Vitória**. XLII SBPO. Bento Gonçalves: [s.n.]. 2010. p. 1272-1283.

OPTARE GROUP. Our Vehicles. **Optare**, 2016. Disponível em: <<http://www.optare.com/vehicles>>. Acesso em: 01 abr. 2016.

PERROTTA, D. et al. Electrical Bus Performance Modeling for Urban Environments. **SAE International Journal of Alternative Powertrains**, 16 abr. 2012. 34-45.

PERROTTA, D. et al. On the potential of regenerative braking of electric buses as a function of their itinerary. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, Guimarães, 54, 4 out. 2012. 1156-1167.

PETZHOLD, G. S. **Sistemas de Transporte Público Urbano: Análise Comparativa Entre Modais de Alta Capacidade**. UFRGS. Porto Alegre, p. 87. 2013.

PEZERICO, L. A. D. M. **Sistemas de Avaliação de Desempenho no Transporte Urbano: Uma Abordagem para o Setor Metroviário**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 153. 2002.

PIHLATIE, M. et al. **Fully Electric City Buses – The Viable Option**. Electric Vehicle Conference (IEVC), 2014 IEEE International. Florença: IEEE. 2014. p. 1-8.

PROTERRA. www.proterra.com. **Proterra**, 2015. Disponível em: <<http://www.proterra.com/>>. Acesso em: 20 jan. 2016.

ROGGE, M.; WOLLNY, ; SAUER,. Fast Charging Battery Buses for the Electrification of Urban Public Transport - A Feasibility Study Focusing on Charging Infrastructure and Energy Storage Requirements. **Energies**, Basel, 21 maio 2015. 4587-4606.

SAE. J1772:SAE Electric Vehicle and Plug in Hybrid Electric Vehicle Conductive Charge Coupler. **SAE International**, 2016. Disponível em: <<http://standards.sae.org/wip/j1772/>>. Acesso em: 20 maio 2016.

SCOMI RAIL CORPORATION. Scomi - Monorail. **Scomirail.com**, 2016. Disponível em: <<http://www.scomirail.com/monorail.htm>>. Acesso em: 11 fev. 2016.

SEBASTIANI, M. T. **Um Modelo de Simulação para Otimização da Alocação de Estações de Recarga para Ônibus Elétricos no Transporte Público de Curitiba**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, p. 94. 2014.

SHANKAR, R.; MARCO, J. Method for estimating the energy consumption of electric vehicles and plug-in hybrid electric vehicles under real-world driving conditions. **IET Intelligent Transport Systems**, Stevenage, v. 7, n. 1, p. 138-150, mar. 2013.

SINHUBER, P.; ROHLFS, ; SAUER , U. **Conceptional Considerations for Electrification of Public City Buses**. Emobility - Electrical Power Train, 2010. Leipzig: IEEE. 2010. p. 1-5.

SINHUBER, P.; ROHLFS, W.; SAUER, D. U. **Study on Power and Energy Demand for Sizing the Energy Storage Systems for Electrified Local Public Transport Buses**. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. Seoul: IEEE. 2012. p. 315-320.

SISTRAN ENGENHARIA. **Tecnologias Veiculares Alternativas para o Transporte Coletivo**. São Paulo: ANTP, v. 15, 2014. 88 p.

SISTRAN ENGENHARIA, INECO E INECO DO BRASIL. **Estudo Comparativo de Tecnologias Veiculares de Tração Aplicáveis a Ônibus Urbanos**. São Paulo: ANTP, v. 15, 2014. 88 p.

TAYLOR, J. et al. **Evaluation of the impact of plug-in electric vehicle loading on distribution system operations**. 2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Calgary: IEEE. 2009. p. 1-8.

TOPON, P.; HISASHI, Y. **Operation and Charging Scheduling of Electric Buses in a City Bus Route Network**. IEEE 17th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). Qingdao: IEEE. 2014. p. 2780-2786.

WAISMAN, J. **Veículos Leves sobre Trilhos (VLT) no Brasil: semelhanças e diferenças entre os projetos**. 20º Congresso Brasileiro de Transporte e Trânsito. Santos: [s.n.]. 2015.

ZIVANOVIC, Z.; MIŠANOVIC, S. **Fully electric buses are promising technology in the future**. International Congress "Motor Vehicles & Motors 2014". Aerodrom: Proceedings on CD. 2014. p. 81-106.