

12º Salão Latino-Americano de Veículos Elétricos, Componentes e Novas Tecnologias.

ANÁLISE DE SERVIÇOS DE TRANSPORTE COM ÔNIBUS ELÉTRICOS EM ESTRADAS PARQUE

LUCAS DE PANTIS
(depantis@hotmail.com)

Estudante de Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária e Estagiário de Projeto de
Extensão da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)

LUIZ ARTUR PECORELLI PERES
(lapp_uerj@yahoo.com.br)
Professor Associado da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)

ANDRÉ RODRIGUES KREMPSE
(arodrigues2007@hotmail.com)
Engenheiro do Programa de Apoio Técnico às Atividades de Ensino, Pesquisa e Extensão
PROATEC (UERJ)

Laboratório de Sistemas de Propulsão Veicular e Fontes Eletroquímicas (LSPV/ UERJ)

RESUMO

Este trabalho apresenta uma metodologia de análise do emprego de ônibus elétricos em serviços turísticos tendo com foco estradas parque. Para isto, o texto foi inspirado tomando como exemplo, a rota Paraty – Cunha, inaugurada em março de 2016, que atravessa o Parque Nacional da Serra da Bocaina (PNSB) e constitui uma das maiores áreas protegidas da Mata Atlântica, estando localizada em trecho da Serra do Mar. Trata-se de um ambiente turístico de rara beleza natural, arquitetônica e objeto de interesse pelos aspectos culturais envolvidos. Os cálculos apresentados permitem determinar a neutralização de carbono resultante pela comparação do uso do veículo elétrico em substituição à combustão interna e expressa as emissões evitadas através do reflorestamento capaz de absorver o mesmo quantitativo de dióxido de carbono oriundo da opção de tração térmica tradicional. O volume de combustíveis que deixa de ser queimado e a comparação das eficiências energéticas dos ônibus tomados como referência apontam para o incremento de políticas públicas endereçadas aos benefícios energéticos e ambientais da eletrificação do transporte rodoviário.

Palavras chave: veículos elétricos, eficiência energética, responsabilidade ambiental, emissões atmosféricas.

INTRODUÇÃO

Este trabalho apresenta uma metodologia de análise do emprego de ônibus elétricos em serviços turísticos tendo com foco estradas parque. Para isto, o texto foi inspirado tomando como exemplo, a rota Paraty – Cunha, inaugurada este ano, que atravessa o Parque Nacional da Serra da Bocaina (PNSB) e constitui uma das maiores áreas protegidas da Mata Atlântica, estando localizada em trecho da Serra do Mar. Trata-se de um ambiente turístico de rara beleza natural, arquitetônica e objeto de interesse pelos aspectos culturais envolvidos. O município de Paraty e parte da Costa Verde fluminense e Cunha, situa-se no Vale do Paraíba, em São Paulo.

Cabe destacar, que de acordo com o noticiário oficial do Estado do Rio de Janeiro de 07/03/2016 em (<http://rj.gov.br/web/imprensa/exibeconteudo?article-id=2754284>), este informa que para elaborar o projeto citado, o governo estadual “contratou um grupo de 55 profissionais, entre professores, pesquisadores e auxiliares da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), responsável pela sua formulação, gestão ambiental da obra e implantação de programas com ações, desde o acompanhamento arqueológico das frentes de trabalho e o monitoramento da fauna e da flora, passando pela disseminação de atividades educativas com palestras nas escolas das duas cidades, e a sensibilização das comunidades para o uso consciente da rodovia”. Este mesmo grupo, que conta com integrantes do Departamento de Construção Civil e Transportes – DCCT e do Departamento de Engenharia Sanitária e Meio Ambiente - DESMA, da Faculdade de Engenharia da UERJ, anteriormente havia recebido o prêmio Crea-RJ - de Meio Ambiente 2014, tendo em vista os trabalhos realizados até então.

Neste texto, a economia de combustível e as emissões evitadas são objeto de investigação utilizando-se ônibus de propulsão elétrica, com base nas metodologias desenvolvidas no âmbito do Grupo de Estudos de Veículos Elétricos – GRUVE, fundado em 2001, na Faculdade de Engenharia da UERJ.

É importante assinalar que a utilização da tração elétrica nas aplicações tratadas neste trabalho se faz desejável tendo em vista a sua maior eficiência energética e a inexistência de emissões atmosféricas do veículo, o baixíssimo ruído além de autonomia e características mecânicas compatíveis. Diversas pesquisas que vêm sendo realizadas pelo GRUVE vêm demonstrando os benefícios energéticos e ambientais dos veículos elétricos tendo em vista a sua aderência à

matriz energética brasileira cujas fontes primárias são de forma majoritária renováveis. Neste sentido com a implantação em 2006 do Laboratório de Sistemas de Propulsão Veicular e Fontes Eletroquímicas – LSPV sucederam-se projetos no âmbito da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, entre eles pode-se citar: a “Avaliação de desempenho de veículos elétricos atuando em frotas de empresas distribuidoras de energia elétrica” e o “Desenvolvimento de redes de abastecimentos de veículos elétricos para a Cidade Inteligente Búzios”, ambos amparados pela Ampla Energia e Serviços S.A. Menciona-se também a “Metodologia de planejamento e análise para a implantação de veículos elétricos em atividades de transporte”, este amparado pela Light Serviços de Eletricidade S.A. O projeto de extensão “Produção e Divulgação de CDs Educativos sobre Veículos Elétricos” iniciado em 2001 de acordo com (Pecorelli Peres, L.A. et Freitas, C. M., 2009) tem sido um meio de levar à sociedade os conhecimentos sobre esta tecnologia. Vídeos podem ser encontrados em [<https://www.youtube.com/user/veiculoelétrico>] destacando-se entre eles: Veículos Elétricos Conquistam as Ruas do Brasil e o Projeto da UERJ e CEFET-RJ de Conversão de Veículos para Tração Elétrica – Uma Proposta Inovadora de Responsabilidade Social e Ambiental, ambos em edições bilíngües.

De um ponto de vista mais amplo, o fato do Brasil apresentar uma grande produção e potencial de energia elétrica adequada ao abastecimento de veículos elétricos, a partir de hidroelétricas bem como geração solar fotovoltaica e eólica, constata-se o grande potencial de utilização destes veículos no turismo. De fato, o setor de transporte rodoviário do país é altamente dependente de energia fóssil proveniente do diesel, da gasolina e do gás natural veicular que totalizam 81,2% do consumo anual de combustíveis para este setor, conforme o Balanço Energético Nacional 2015. Acrescente-se que o mesmo documento indica que o setor de transporte rodoviário utiliza praticamente 1/3 de toda energia produzida no Brasil e é o maior emissor de dióxido de carbono fóssil, sendo seu total superior a todo o setor industrial. Ao contrário, a energia elétrica permite a utilização de diversas fontes de energia primária propiciando um leque de opções mais eficaz que os processos de combustão interna empregados pela tração rodoviária térmica. Esta diretriz está preconizada no capítulo dedicado aos transportes do documento *The future we want*, do qual o Brasil é signatário com dezenas de países que participaram da Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável - Rio+20 em 2012.

A despeito destes aspectos relevantes para a penetração do uso de veículos elétricos rodoviários na matriz de transporte do país, há diversas barreiras institucionais às lacunas

existentes nas políticas públicas para a inserção de veículos elétricos e que foram objeto de trabalhos publicados conforme (Domingues, J. M., 2013 e 2014).

Os atributos tangíveis da eletrificação do transporte rodoviário no atual estágio do seu desenvolvimento permitem de uma forma robusta e irreversível a sua adoção não somente destinada aos veículos de uso individual, mas também coletivo aliando-se, portanto, às questões em prol da mobilidade e também sociais. Sobre este ponto convém salientar que as empresas de energia elétrica, desde seu início, vislumbraram não apenas o abastecimento da iluminação, da motorização, seja residencial e industrial. Incluía como negócio o atrativo setor de transporte uma vez que até mesmo carros elétricos fizeram sucesso no final do século XIX e início do século XX de acordo com (Larminie, J. et Lowry, J., 2013). Nesta fase histórica merece mencionar a linha de ônibus elétricos, exclusivamente à bateria, que faziam o trajeto no Rio de Janeiro entre o Palácio Monroe, onde hoje se encontra o obelisco próximo à Cinelândia e a Praça Mauá em 1918 e cuja foto é reproduzida em (Mendonça, Leila L., 2001). A tecnologia veicular elétrica não se firmou neste período. O baixo preço do petróleo, as dificuldades oriundas das incipientes fontes eletroquímicas de então, a ausência da tecnologia eletrônica e também o fato do veículo a combustão interna ser mais acessível serviram de ingredientes para a sua ascensão. O encontro de interesses e ganhos econômicos das empresas petrolíferas e da indústria automotiva constituiu os pilares do sucesso avassalador da propulsão veicular à combustão interna. Entretanto, mais recentemente, a eficiência energética, as redes inteligentes de energia, nas quais os veículos elétricos atuam até mesmo como no-breaks em situações de emergência de suprimento da rede elétrica, soma-se a possibilidade de serem recarregados com energia solar. Sobrepõe-se também a imperiosa necessidade de diminuir os danos econômicos e sociais das emissões atmosféricas pelas consequências negativas da perda de qualidade do ar bem como os gases de efeito estufa e suas implicações no que diz respeito às mudanças climáticas. Estes elementos passam então a constituir de forma consistente o novo advento dos veículos elétricos rodoviários ao mercado a partir do final do século XX, conforme (Serra, J. V. F., 2012).

Visando avaliar as possibilidades e benefícios da implantação de transporte rodoviário elétrico coletivo, este texto analisa o trecho Paraty – Cunha do famoso Caminho Real, pois se trata de um ambiente turístico com localidades de rara beleza natural, arquitetônica e objeto de interesse pelos aspectos culturais envolvidos. Assim, os cálculos apresentados permitem determinar a neutralização de carbono resultante pela comparação do uso do veículo elétrico em substituição à combustão interna e expressa as emissões evitadas através do

reflorestamento capaz de absorver o mesmo quantitativo de dióxido de carbono oriundo da opção de tração térmica tradicional. O volume de combustíveis que deixa de ser queimado e a comparação das eficiências energéticas dos ônibus tomados como referência apontam para o incremento de políticas públicas endereçadas aos benefícios energéticos e ambientais da eletrificação do transporte rodoviário.

METODOLOGIA E PREMISSAS ADOTADAS

Este item descreve os procedimentos adotados para a análise de um serviço de transporte turístico com ônibus elétrico no trajeto Paraty-Cunha tendo em vista que visitantes e moradores da região atendida possam usufruir das características sustentáveis desta tecnologia.

Considerou-se a implantação do funcionamento do serviço de transporte com o ônibus elétrico, Ebus K7 de 8 m, ligando o trecho Paraty-Cunha. Para efeito de comparação foram utilizadas características adaptadas, de um modelo a combustão interna CITARO à diesel de 12 m conforme referência (Spreen, Jordy et ali, 2014). A escolha deste modelo segue o rígido padrão de desempenho energético e ambiental europeu para ônibus à combustão interna de forma a tornar robustos os resultados do trabalho. A figura 1 a seguir mostra um exemplo do modelo de ônibus elétrico considerado.

Figura 1. Exemplo de Ônibus Elétrico (8 metros).



Fonte: <http://bydeurope.com/vehicles/ebus/types/8.php> (Acessado em 30/06/2016 às 15:51).

Com base nas referências citadas foi elaborada a Tabela 1, em seguida, referente às características técnicas e de desempenho destes ônibus.

Tabela 1: Características Técnicas e Consumo Energético dos Ônibus Considerados

Ônibus Elétrico		Ônibus a Combustão Interna à Diesel	
Capacidade das Baterias	260 kWh	Poder Calorífico	10100 kcal / kg
Rendimento do Carregador e Instalação	0,95 (*)	Consumo	0,279 l / km (**)
Autonomia	200 km	Densidade	850 kg / m ³

(*) Valor estimado. (**) Valor estimado com base nos testes do ônibus modelo CITARO de 12 m (Spreen, Jordy et ali, 2014) considerando a redução de capacidade de transporte relativa a um ônibus de 8 m.

A Tabela 2 apresenta os dados dos fatores de emissões atmosféricas do ônibus a combustão interna, conforme segue:

Tabela 2: Fatores de Emissões do Ônibus a Combustão Interna (g/km)

CO ₂ (dióxido de carbono)	NO _x (óxidos de nitrogênio)	NO ₂ (dióxido de nitrogênio)
659 (**)	0,30 (**)	0,06 (**)

(**) Valor estimado com base nos testes do ônibus modelo CITARO de 12 m (Spreen, Jordy et ali, 2014) considerando a redução de capacidade de transporte relativa a um ônibus de 8 m.

As premissas e hipóteses de funcionamento e logística do serviço turístico proposto compreendem o seguinte:

- Os trajetos são disponibilizados todos os dias atendendo ao horário da Tabela 3, que se encontra a seguir:

Tabela 3: Partidas e Chegadas Entre Paraty e Cunha.

Partida da localidade Paraty e chegada em Cunha		Partida da localidade Cunha e chegada em Paraty		Partida da localidade Cunha e chegada em Paraty		Partida da localidade Paraty e chegada em Cunha	
2 ^a / 4 ^a / 6 ^a e Domingo		2 ^a / 4 ^a / 6 ^a e Domingo		3 ^a / 5 ^a e Sábado		3 ^a / 5 ^a e Sábado	
Paraty	Cunha	Cunha	Paraty	Cunha	Paraty	Paraty	Cunha
7:00	8:00	09:00	10:00	7:00	8:00	09:00	10:00
11:00	12:00	14:00	15:00	11:00	12:00	14:00	15:00
16:00	17:00	xxxx	xxxx	16:00	17:00	xxxx	xxxx

- Existência de um posto de recarga e respectivas instalações em ambas as localidades.

- O trajeto é percorrido em uma hora e possui cerca de 50 km, com horário de tráfego de 7 h às 17 h. Os cálculos de base anual consideram o ano com 52 semanas.
- O ônibus elétrico possui modo de direção regenerativo atuante em frenagens e declives.
- A recarga plena correspondente a autonomia é efetuada em três horas.
- A potência para suprimento à recarga do ônibus elétrico tomou como referência a capacidade do respectivo carregador igual a 80 kW assumindo-se um rendimento de 0,95.
- A Tabela 4 a seguir indica os horários diários de recarga do ônibus elétrico e as suas respectivas durações:

Tabela 4: Horários da Recarga Diária dos Ônibus Elétricos em Paraty e Cunha

Período de Recarga (Eletroposto)		Período de Recarga (Eletroposto)		Período de Recarga (Eletroposto)		Período de Recarga (Eletroposto)	
2 ^a / 4 ^a / 6 ^a e Domingo		2 ^a / 4 ^a / 6 ^a e Domingo		3 ^a / 5 ^a e Sábado		3 ^a / 5 ^a e Sábado	
Paraty		Cunha		Paraty		Cunha	
6:00	6:50	----	----	----	----	6:00	6:50
10:00	10:50	----	----	----	----	10:00	10:50
----	----	12:00	13:40	12:00	13:40	----	----
15:00	15:50	----	----	----	----	15:00	15:50

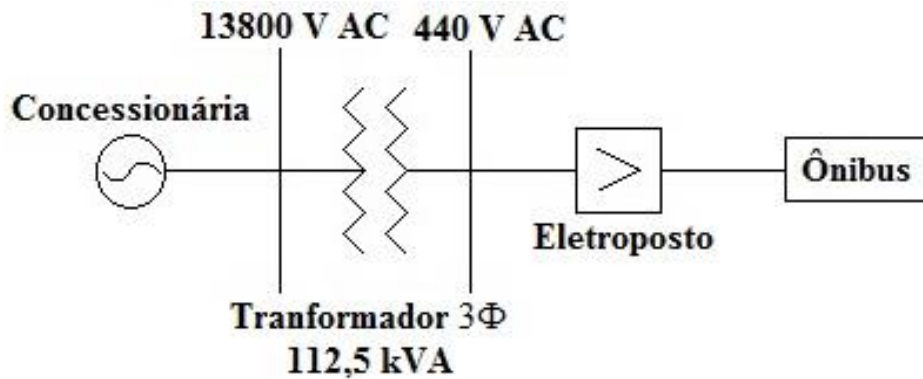
A programação diária de horários de trajeto foi elaborada buscando atender públicos distintos tanto de visitantes como moradores das localidades.

Os trajetos diários totalizam 250 km. Quanto aos horários de recarga do ônibus elétrico procurou-se evitar a coincidência dos horários de ponta da rede elétrica e a maximização do fator de carga da instalação.

Este horário adotado de forma hipotética em condições futuras mais realistas, na medida em que a frota de ônibus elétricos se implante e haja trajetos noturnos esta poderá ser ampliada. Contempla-se assim um cenário de expansão do transporte rodoviário elétrico bem como dos ganhos energéticos e ambientais descritos.

A figura 2 mostra o diagrama esquemático de recarga na rede das concessionárias de energia, em Paraty e Cunha.

Figura 2. Diagrama de recarga do ônibus elétrico na rede da concessionária de energia.



EMISSIONES DO VEÍCULO À COMBUSTÃO INTERNA E REFLORESTAMENTO

A equação (1) é empregada nos cálculos para estimativa do montante de emissões anuais evitadas oriundas de veículos à combustão interna, que toma como referência (Pecorelli Peres, L.A., 2011):

$$MO(i, j, k) = FE(i, j) \times NV(j) \times DP(k) \times \sum nda.(j, k) \quad (1)$$

Onde:

$MO(i, j, k)$ - designa o montante de emissões atmosféricas da substância i , do veículo a combustão interna j , no percurso k ;

$FE(i)$ – fator de emissão atmosférica da substância i do veículo à combustão interna j ;

$NV(j)$ – número de veículos à combustão interna j ;

$DP(k)$ – distância do percurso k ;

$nda(j, k)$ – número de dias do ano que o veículo j faz o percurso de distância k .

Tomando como referências (Agnesini, Marília Vasconcellos; 2012 e Santos, D.R.R., 2010) que apresentaram cálculos para expressar a neutralização de carbono em termos do número de árvores necessárias para absorver emissões de dióxido de carbono fóssil, foram estabelecidas as equações (2), (3) e (4) que recebem um tratamento matemático elaborado neste trabalho. Neste caso, elas foram empregadas, caso se utilizasse exclusivamente o ônibus à combustão interna. Como as árvores mencionadas atingem a sua plenitude ao final de 20 anos após serem plantadas, a absorção calculada atingirá sua plenitude ao final deste período.

$$Narv = \frac{[\{\sum_{i=1}^{i=n} Emi(i)\}] \times Fcp}{Ffix(j) \times Na} \quad (2)$$

Onde:

Narv - n° de mudas de árvores a serem plantadas em uma área *A(j)* onde *j* exprime a espécie;

Emi(i) - emissões de CO₂ fóssil de cada fonte (*i*) considerada;

Ffix(j) - fator de fixação de carbono em biomassa referente à espécie de árvore *j*;

Na - número de anos considerados para as mudas das árvores atingirem a plenitude;

Fcp - Fator de compensação de perdas das mudas, em geral, considerado igual a 1,2.

A equação (3) fornece a expressão geral do fator de fixação, *Ffix(j)*.

$$Ffix(j) = \frac{IMA(j) \times TC \times Fcc \times Na}{Frefa} \quad (3)$$

Onde:

Ffix(j) - fator de fixação de carbono em biomassa referente à espécie de árvore *j*;

IMA(j) - incremento médio anual de biomassa viva acima do solo e abaixo do solo constituída pela matéria seca acumulada anualmente no local de plantio;

TC - teor de carbono da matéria seca acumulada anualmente;

Fcc - fator de conversão da massa de carbono para CO₂ igual à fração 44/12;

Na - número de anos para neutralizar plenamente o total das emissões *Emi (i)* de CO₂ fóssil;

Frefa - fator de referência expresso pelo número de espécies arbóreas por área de plantio.

O valor adotado para *IMA(j)* foi de 2 toneladas de matéria seca / (ha.ano) de acordo com IPCC (2003) e corresponde à florestas com idade > 20 anos.

Com respeito ao teor de carbono adotou-se 50% e os valores referentes à *Na* e *Frefa* correspondem, respectivamente, a 20 anos e 1667 árvores / há de acordo com (Bechara, 2006). Quanto à espécie arbórea trata-se do *Pinus* de acordo (NETTO PÉLLICO, S; et. al. 2008). A biomassa abaixo do solo relativa ao *IMA (j)* foi considerada por omissão igual a 0, conforme (Agnesini, Marília Vasconcellos; 2012 e Santos, D.R.R., 2010)

Note-se que o incremento médio anual de biomassa (IMA) de florestas tropicais e subtropicais é utilizado tomando como referência os dados citados em Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry (LULUCF) publicado pelo Painel Internacional de Mudanças Climáticas - PIMC no ano de 2003.

Para os cálculos deste texto, são utilizadas as emissões de dióxido de carbono fóssil provenientes do ônibus a combustão interna, igual a 659 g/km, conforme Tabela 2, o que possibilita estimar a quantidade de árvores a serem plantadas bem como o número delas por hectare. A área $A(j)$ necessária para o plantio da espécie de árvore a ser considerada pode ser estimada pela equação 4 a seguir:

$$A(j) = \frac{N_{arv}}{F_{refa}} \quad (4)$$

Onde:

$A(j)$ - área de plantio da espécie j ;

F_{refa} - fator de referência expresso pelo número de espécies arbóreas por área de plantio.

Assinala-se que a metodologia descrita neste trabalho leva em conta para o cálculo da emissão total $Emi(i)$ do veículo a combustão interna, conforme equação (1), a compensação das emissões provenientes das unidades térmicas da rede elétrica para suprir a recarga do ônibus elétrico no trajeto considerado. Para isto, pode-se adotar o modelo matemático de simulação do sistema elétrico conforme (Pecorelli Peres, L.A., 2000). Neste trabalho, de forma simplificada considerou-se este abatimento de acordo com o Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa da Eletrobrás, do ano de 2013, tomando-se o fator de emissão das termelétricas (somente as empresas da Eletrobrás) no Brasil igual à 0,115 tCO₂/MWh.

RESULTADOS

As Figuras 3, 4, 5 e 6 apresentam os gráficos do comportamento horário diário da demanda de potência ativa dos postos de recarga em Paraty e Cunha de acordo com a programação apresentada na Tabela 4:

Figura 3: Demanda Diária de Recarga no Eletroposto em Paraty (2^a / 4^a / 6^a e Domingo)

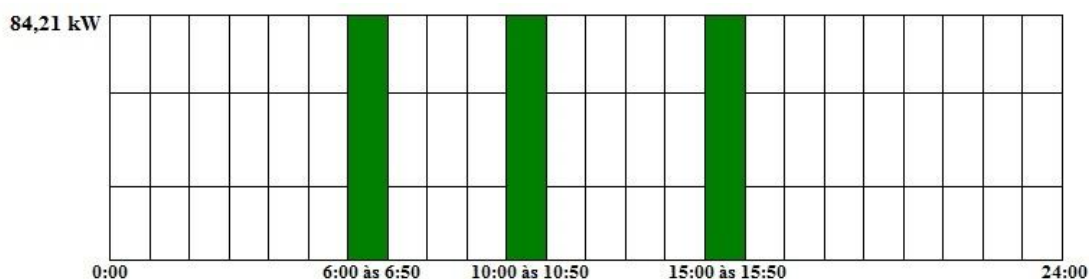


Figura 4: Demanda Diária de Recarga no Eletroposto em Paraty (3ª / 5ª e Sábado)

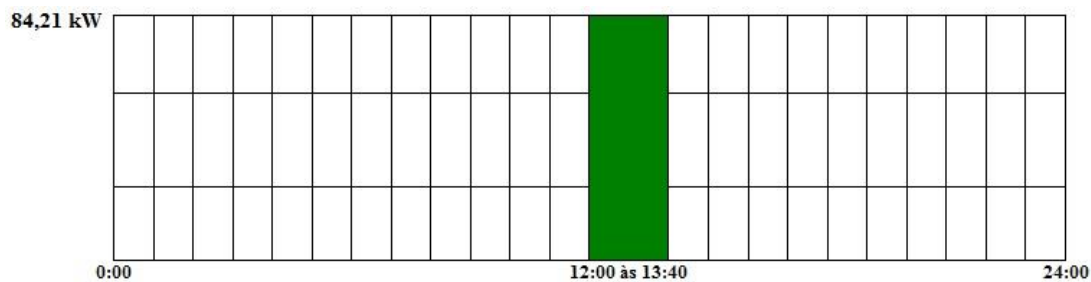


Figura 5: Demanda Diária de Recarga no Eletroposto em Cunha (2ª / 4ª / 6ª e Domingo)

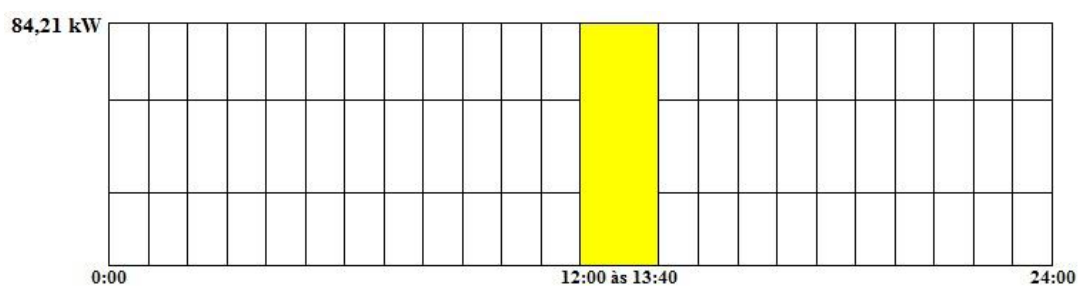
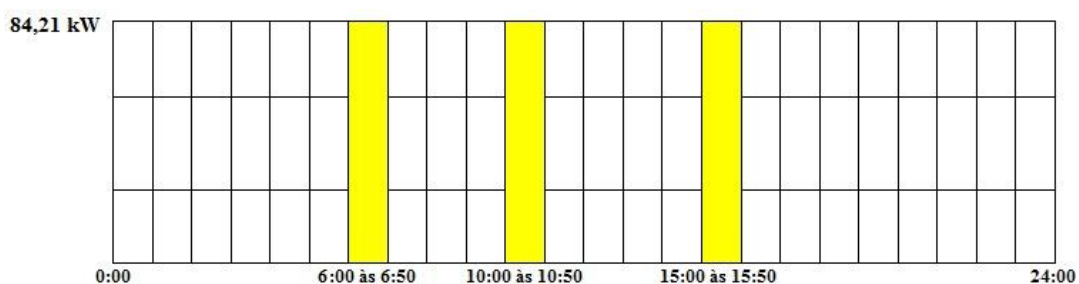


Figura 6: Demanda Diária de Recarga no Eletroposto em Cunha (3ª / 5ª e Sábado)



Com base nos gráficos das Figuras 3, 4, 5 e 6 foram calculados os consumos de energia ao longo de uma semana típica nos eletropostos de Paraty e Cunha apresentados na Tabela 5:

Tabela 5: Consumos de Energia Diária e Semanal dos Eletropostos em Paraty e Cunha

Dias da Semana	Eletroposto Paraty (kWh)	Eletroposto Cunha (kWh)
Segunda	210,53	140,35
Terça	140,35	210,53
Quarta	210,53	140,35
Quinta	140,35	210,53
Sexta	210,53	140,35

Continuação da

Tabela 5: Consumos de Energia Diária e Semanal dos Eletropostos em Paraty e Cunha

Sábado	140,35	210,53
Domingo	210,53	140,35
Total	1263,17	1192,99

Os valores apresentados na Tabela 5 permitiram avaliar o consumo anual do serviço de transporte prestado pelo ônibus elétrico resultando em 127,720 MWh. Este fornecimento de energia elétrica é uma parcela do total produzido pelo sistema elétrico interligado brasileiro, cujas fontes térmicas que utilizam combustíveis fósseis representam cerca de 28%, de acordo com o Balanço Energético Nacional 2014.

Desta forma, estas emissões indiretas foram estimadas em 14,69 toneladas de dióxido de carbono fóssil conforme as premissas assumidas nesta metodologia. Assinala-se que esta avaliação é bem conservativa, pois a tendência futura é que a energia necessária à recarga possa ser parcialmente atendida por eletropostos que disponham de fontes solares fotovoltaicas conectadas a rede, além do acréscimo esperado de usinas eólicas e hidráulicas no sistema brasileiro.

DESEMPENHO DO ÔNIBUS A COMBUSTÃO INTERNA

A Tabela 6 apresenta o desempenho energético e ambiental do ônibus à combustão interna tomado como comparação neste estudo.

Tabela 6: Consumos de Combustível e Emissões do Ônibus a Combustão Interna

Período	Consumo de Combustível (litros)	Emissões Atmosféricas		
		CO ₂ (kg)	NO _x (g)	NO ₂ (g)
Diário	69,75	164,75	75	15
Semanal	488,25	1153,25	525	105

Os resultados anuais decorrentes dos valores apresentados na Tabela 6 indicam um consumo anual de combustível equivalente a 25,389 m³ de diesel. Com respeito às emissões atmosféricas estima-se em termos anuais 59,97 toneladas de dióxido carbono fóssil bem como 27, 30 kg de NO_x e 5,46 kg NO₂ respectivamente.

COMPARAÇÃO DE DESEMPENHO DOS SISTEMAS DE PROPULSÃO

Os consumos anuais de energia elétrica e diesel foram colocados em uma base comum cujos valores resultantes encontram-se na Tabela 7.

Tabela 7: Desempenho Energético e Ambiental Anuais dos Sistemas de Propulsão

Sistema de Propulsão	Reabastecimento	Eficiência (MJ/km)	Emissões Computadas		
			CO ₂ (ton)	NO _x (kg)	NO ₂ (kg)
Elétrico	127,720 MWh	5,05	14,69 (indiretas)	n.a. (*)	n.a. (*)
Combustão Interna (diesel)	25,389 m ³	10,04	59,97 (cano de descarga)	27,30	5,46

(*) n.a. significa não aplicável.

Constata-se que mesmo adotando-se critérios conservativos nos cálculos efetuados a eficiência energética do ônibus a combustão interna é 49,7 % inferior a do ônibus elétrico e as emissões de dióxido de carbono fóssil são reduzidas drasticamente de 75,5 %. Há, portanto, uma economia de combustível considerável. Como a tarifa para recarga referente a um mesmo trajeto é diferenciada, pois trata-se de consumidor comercial há, em geral, ganhos econômicos sensíveis por quilômetro percorrido. Para cada caso caberá uma análise financeira adequada.

REFLORESTAMENTO EQUIVALENTE DA NEUTRALIZAÇÃO DE CARBONO

A utilização do ônibus elétrico propicia que sejam evitadas anualmente de forma efetiva 45,28 toneladas de dióxido de carbono fóssil ao se computar as emissões indiretas provocadas pelas usinas térmicas da rede elétrica de abastecimento à recarga.

O emprego das equações citadas na descrição da metodologia empregada neste trabalho permite interpretar esta neutralização de carbono em termos do número de árvores que precisariam ser plantadas para se obter o mesmo efeito da introdução do veículo elétrico.

Este cálculo resulta um total de 1235 árvores cuja área estimada é de 0,74 hectares sendo necessários cerca de 20 anos para a sua plena absorção.

A neutralização de CO₂ / ano, obtida pelas 1235 árvores em relação ao emprego de apenas um único ônibus elétrico, pode ser estimada adotando-se um comportamento proporcional.

Os resultados obtidos estão representados na Tabela 8 a seguir na qual se percebe a eficácia imediata do uso do ônibus elétrico em relação ao reflorestamento.

Ressalte-se que a forma com que foi elaborado este cálculo permite facilmente a estimativa destes benefícios caso, por exemplo, operasse outras frotas em percursos semelhantes.

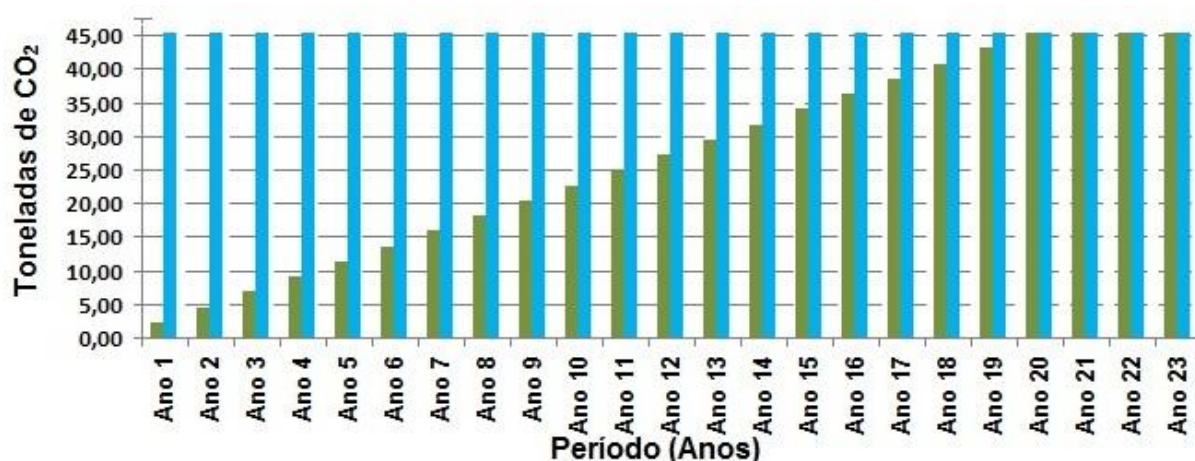
Tabela 8- Neutralização Anual de CO₂ / Ano Efetuada por Árvores e Ônibus Elétrico

Neutralização de CO ₂ (ton) / Ano		
Ano	Árvores (Quantidade 1235)	Ônibus Elétrico (Quantidade 1)
Ano 1	2,26	45,28
Ano 2	4,53	45,28
Ano 3	6,79	45,28
Ano 4	9,06	45,28
Ano 5	11,32	45,28
Ano 6	13,58	45,28
Ano 7	15,85	45,28
Ano 8	18,11	45,28
Ano 9	20,38	45,28
Ano 10	22,64	45,28
Ano 11	24,90	45,28
Ano 12	27,17	45,28
Ano 13	29,43	45,28
Ano 14	31,70	45,28
Ano 15	33,96	45,28
Ano 16	36,22	45,28
Ano 17	38,49	45,28
Ano 18	40,75	45,28
Ano 19	43,02	45,28
Ano 20	45,28	45,28
Ano 21	45,28	45,28
Ano 22	45,28	45,28
Ano 23	45,28	45,28

Cabe comentar que os valores apresentados na Tabela 8 acima, ao se expressar as emissões evitadas anuais pelo ônibus elétrico em termos do reflorestamento equivalente não presumem a substituição de um empreendimento pelo outro. Estes resultados destacam, portanto, atributos favoráveis à eletrificação do transporte rodoviário não encontrado nos veículos à combustão interna.

O gráfico da figura 7 a seguir, mostra o comportamento da neutralização de CO₂ anual, resultante do plantio de 1235 árvores, representada pelas barras em verde, e a utilização de um ônibus elétrico, cujas barras são representadas em azul, respectivamente, conforme avaliação efetuada considerando a estrada parque Paraty – Cunha, como exemplo.

Figura 7 - Neutralização Anual de CO₂ / Ano Efetuada por Árvores e Ônibus Elétrico



CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A metodologia apresentada de análise energética e ambiental do emprego de ônibus elétrico em serviços turísticos demonstrou de forma robusta a compatibilidade e coerência de resultados, de forma que possa ser empregada no planejamento e avaliação de desempenho de futuras frotas. Esta constatação foi possível observando-se os resultados de testes reais efetuados em diversas cidades brasileiras com ônibus elétricos conforme descritos por (Maluf, Adalberto, 2014).

Procurou-se desta forma desenvolver procedimentos conservativos levando em conta o fato de que a estrada Paraty - Cunha possui diversos trechos com acentuados aclives que exigem um consumo maior de energia do veículo empregado. A inclusão das perdas elétricas nas instalações e no processo de retificação segue esta diretriz, uma vez que se adotou um rendimento de 0,95 e a utilização da plena capacidade do carregador do veículo. Com respeito ao ônibus à combustão interna tomado como referência, a utilização de um ônibus de alto padrão favorece este objetivo tendo em vista que o relatório efetuado pela TNO conforme (Spreen, Jordy et al, 2014) atende a norma EURO VI. Além disto, considera-se como elemento adicional de robustez deste procedimento a compensação das emissões produzidas na rede que supre a recarga do ônibus elétrico. Em decorrência disto, foi possível calcular as emissões efetivas de dióxido de carbono evitadas. De forma inovadora foi então indicada a sua neutralização equivalente em termos de árvores a serem plantadas bem como a área necessária para este empreendimento. Os valores apresentados neste trabalho na Tabela 8, ao se expressar as emissões evitadas anuais pelo ônibus elétrico em termos do reflorestamento

equivalente não presumem a substituição de um empreendimento pelo outro. Admite-se, portanto, que a avaliação de investimentos voltados para a implantação de serviços de locomoção turísticos poderá contar com os cálculos correspondentes a este reflorestamento agregando-se assim argumentos favoráveis a eletrificação do transporte rodoviário.

A logística de estabelecimento dos percursos intercalados com recargas em horários considerados oportunos se mostrou satisfatória, inclusive, demonstrando ser possível empregá-la em diversos trechos encontrados na Estrada Real que possam ser atendidos por ônibus elétricos e cumprindo programações sem que a autonomia disponível e o tempo de recarga causem restrições. A recarga noturna e fora do horário de ponta é altamente desejável caso se empregue as modalidades de tarifa verde ou azul a qual apresenta preços de energia menores neste período. Vale comentar que os veículos a combustão interna não contam com este atrativo adicional uma vez que o preço de reabastecimento de diesel ou qualquer outro combustível é invariável ao longo do dia.

Aprimoramentos estão sendo introduzidos neste modelo de avaliação de forma a simular o comportamento dinâmico do percurso a ser realizado introduzindo-se o aplicativo desenvolvido no âmbito do GRUVE/UERJ conforme (Soares, David, 2014). Há também que considerar outros fatores de emissão atmosférica, objeto de legislação específica, como o monóxido de carbono e material particulado. Os danos para qualidade do ar são apreciáveis e sua implicação se traduz na redução da expectativa de vida dos cidadãos expostos a estes impactos e o aumento considerável de custos sociais elevados, principalmente do Sistema Único de Saúde - SUS devido aos atendimentos decorrentes causados por enfermidades respiratórias e alérgicas, de acordo com (Rodrigues, C. G., et ali 2015).

Os resultados encontrados são promissores tendo em vista a expressiva garantia de ganhos energéticos, a redução das emissões atmosféricas e atributos favoráveis exclusivos dos sistemas de propulsão elétrica. Fazem parte deste elenco o emprego da energia solar fotovoltaica e a possibilidade de oferecer suporte de energia às redes elétricas quando estão em recarga, caso disponham dos chamados dispositivos “V2G” acrônimo de “Vehicle To Grid” que permite o envio de energia elétrica a rede de distribuição. Os cálculos foram realizados considerando apenas um ônibus elétrico com percursos diários de 250 km e são facilmente extrapolados para uma frota maior. A viabilização econômica da eletrificação rodoviária está sendo conseguida em diversos países mediante a introdução de políticas públicas adequadas. Para isto é levada em conta a eficiência operacional, a diversificação das

fontes energéticas empregadas, a agregação às redes inteligentes de energia bem como a introdução de sinais econômicos propícios para uma eficaz transição tecnológica.

REFERÊNCIAS

AGNESINI, M. V. Estudo da Neutralização da Emissão de Gases do Efeito Estufa na Escola de Engenharia de Lorena. Faculdade de Engenharia de Lorena da USP, 2012.

BECHARA, F. C. Unidades Demonstrativas de Restauração Ecológica Através de Técnicas Nucleadoras: Floresta Estacional Semidecidual, Cerrado e Restinga. Piracicaba, 248p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo - USP; 2006.

DOMINGUES, J. M.; PECORELLI PERES, L. A.; SEROA DA MOTTA, R. Environmental Regulation & Automotive Industrial Policies in Brazil: The Case of “INOVAR – AUTO”; Law and Business Review of the Americas; Volume 20, Summer 2014, Number 3, pgs. 399-420.

DOMINGUES, J. M.; PECORELLI PERES, L. A. Electric Vehicles, Energy Efficiency, Taxes and Public Policy in Brazil; Law and Business Review of the Americas, volume 19 - Winter 2013, Number 1, pages 55 to 78, ISSN 1571-9537.

LARMINIE, J.; LOWRY, J. Electric Vehicle Technology Explained. West Sussex. John Wiley & Sons. 2003. 296 p. ISBN 0-470-85163-5.

MALUF, ADALBERTO Mobilidade Inteligente. 16º ETRANSPORT 10ª FETRANSRIO, 5 a 7 de novembro de 2014, Riocentro, Rio de Janeiro.

MENDONÇA, LEILA L. Cidade em Movimento: Energia Elétrica e Meios de Transporte no Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: Centro de Memória da Eletricidade no Brasil, Armazém das Letras Gráfica e Editora Ltda, 2001.

NETTO PÉLLICO, S; et.al. Estimativa do Potencial de Neutralização de Dióxido de Carbono no Programa Vivat Neutracarbo em Tijuca do Sul, Agudos do Sul e São José dos Pinhais, pr – Curitiba, 2008.

PECORELLI PERES, L. A.; FREITAS, C. M. A Divulgação de Conhecimentos Através de CDs sobre Veículos Elétricos. Experiência de um Projeto de Extensão que Propiciou Implantar um Laboratório de Sistemas de Propulsão Veicular; Interagir: Pensando a Extensão; Nº 14, Rio de Janeiro DEPEXT/ /SR-3/UERJ; Janeiro-Dezembro de 2009; ISSN 15198847.

PECORELLI PERES, L. A.; RODRIGUES, L. C. R.; ROCHA, S., FABIO; COSTA, WASHINGTON Níveis Quantitativos de Eficiência e Emissões de Sistemas de Propulsão

Veicular, IV Congresso Brasileiro de Eficiência Energética – IV CBEE, Universidade Federal de Juiz de Fora 2011, Juiz de Fora, 2011.

PECORELLI PERES, L. A. Avaliação dos Impactos Energéticos e Ambientais da Introdução de Veículos Elétricos, 2000, 211f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá - UNIFEI, 2000.

RODRIGUES, C. R.; VORMITTAG, E.M.P.; CAVALCANTE, J. H.; SALDIVA, PAULO H. N. Projeção da Mortalidade e Internações Hospitalares na Rede Pública de Saúde Atribuíveis à Poluição Atmosférica. Revista Brasileira de Estudos de População, vol. 32 no. 3 São Paulo Sept./Dec. 2015 ISSN 0102-3098.

SERRA, J. V. F. Electric Vehicles: Technology, Policy and Commercial Development. New York. Earthscan. c2012. 224 p.

SOARES, DAVID; RÊGO, F. BARROS, PECORELLI PERES, L. A. Aplicativo para Estudos e Análise de Desempenho de Veículos Elétricos, 10º Salão Latino-Americano de Veículos Elétricos, Componentes e Novas Tecnologias, São Paulo 4 a 6 de Setembro de 2014.

SANTOS, D.R.R.; PICANÇO, A.P.; MACIEL, G.F.; SERRA, J.C.V. Estudo de Neutralização dos Gases de Efeito Estufa da Universidade Federal Do Tocantins - Reitoria E Campus Universitário d Palmas: Uma Forma de Mitigação Ambiental; Rev. Geogr. Acadêmica v.4, n.2 (xii.2010), pág. 29 – 40, ISSN 1678-7226

SPREEN, JORDY; VONK, WILLAR; VERMEULEN, ROBIN TNO Report R1307 NOx and PM emissions of a Mercedes Citaro Euro VI bus in urban operation, September, 2014.

Agradecimentos

Os autores expressam seus agradecimentos pelo suporte e apoio da Sub-Reitoria de Extensão e Cultura (UERJ) ao estudante Lucas De Pantis bem como do Programa de Apoio Técnico às Atividades de Ensino, Pesquisa e Extensão – PROATEC da Sub- Reitoria de Pós Graduação e Pesquisa (UERJ) ao engenheiro André Rodrigues Krempser, em projetos coordenados pelo Professor Associado Luiz Artur Pecorelli Peres do Departamento de Engenharia Elétrica (UERJ).