Eficientização no Transporte

Projeto de Graduação

Departamento de Engenharia Mecânica

Aluno: Matheus Pinto de Alvarenga

Matrícula: 1111276

Orientador: Sergio Leal Braga

Rio de Janeiro, 30 de junho de 2016

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço especialmente a Deus pelas oportunidades que Ele sempre me proporciona, semeando minha jornada como ser humano na direção do meu crescimento espiritual e intelectual.

Agradeço a minha família, que sempre me apoiou e me incentivou desde os meus primórdios acadêmicos. Meus pais, Rogério e Eliane e meu irmão, Thiago tiveram papel fundamental na concretização deste momento tão importante para nós e, sinceramente, não acredito que palavras seriam suficientes para demonstrar a minha gratidão.

Agradeço ao meu orientador, Sergio Braga por ter aceito me auxiliar na elaboração deste projeto, seu tutorial foi fundamental para a realização deste trabalho.

Além das pessoas citadas, devo um enorme agradecimento aos meus amigos que me incentivaram, estudaram comigo, deram dicas sobre matérias e vivenciaram as dificuldades associadas a faculdade de engenharia mecânica. Graças a eles, alavanquei minha capacidade de aprendizado e obtive resultados acima da média.

Por último, mas não menos importante, sou grato à todas as instituições e empresas que fizeram parte da minha formação. Sou especialmente grato ao Colégio Santo Agostinho, à University of Greenwich e à PUC-RIO por propiciarem um excelente ambiente de aprendizado e à Transocean por ter me ensinado na prática o que é ser engenheiro.

RESUMO

Atualmente, com a concorrência corporativa em escala global, se torna extremamente importante a redução dos custos. Tal fato nos leva a refletir sobre os gastos energéticos, não só nas indústrias, como também na prestação de serviço, nas instituições militares e até mesmo nas residências.

Existem infinitos seguimentos onde podemos eficientizar o consumo da energia no mundo, dentre os quais podemos destacar alguns como:

- Transporte;
- Aparelhos eletrônicos;
- Edifícios;
- Iluminação;
- Fábricas;
- Condicionadores de ar;
- Processos de automação;

Palavras-Chave: Eficientização; transporte; emissões.

ABSTRACT

Currently, with the corporate competition on a global scale, it has become extremely important to reduce costs. This fact leads us to reflect on the energy demand, not only in industries but also in services, in the military institutions and even in homes.

There are endless segments where we can make more efficient the energy consumption in the world, among which we can highlight some as:

- Transport;
- Electronic devices;
- Buildings;
- Lighting;
- Factories;
- Air conditioners;
- Automation processes;

Keywords: Efficiency; transport; emissions.

Sumário

1. Introdução	1
1.1 Objetivo e motivação	1
1.2 Metodologia	3
2. Poluição	5
3. Combustíveis alternativos para transporte público	11
3.1 Os critérios de avaliação estabelecidos:	17
3.2 Avaliação dos pesos dos critérios	19
3.3 Avaliação das alternativas	20
3.4 Optimização do Multicritério:	22
3.4.1 Comparação de TOPSIS e VIKOR	23
4. Iniciativa eco eficiente para um sistema de transportes público sustentável	29
5. As tecnologias de baixo carbono nas frotas de ônibus da América Latina	33
5.1.1 Entendo melhor a tecnologia do ônibus híbrido e elétrico	35
6. Implementando os conceitos apresentados nas cidades do Rio de Janeiro, São Paulo e Belo Horizonte.	39
6.1.1 Cenário Atual nas Capitais RJ, SP e BH	40
6.1.2 Cenário alternativo, migrando um percentual de pessoas dos carros para o ônibus	57

6.1.3	Cenário alternativo, mudando os combustíveis nos ônibus	60
6.1.4	Cenário alternativo, mudando os combustíveis nos veículos particulares	65
7.	Conclusão.....	68
8.	Referências bibliográficas	69

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Comparação de Custos para diferentes tipode de veiculos (Fonte: Putz, 2013).	9
Figura 2 - Consumo de combustível e as emissões de GHG por km para diferentes tipos de sistemas de transporte público. Notação: DB - ônibus a diesel, T (HFO) - trólebus de combustível pesado, T (NG) - trólebus de gás natural, CNGB - ônibus de compressão de gás natural, CBB - ônibus de biogás comprimido. Fonte: (Kliucininkas et al, 2012).	31
Figura 3 – Ônibus Híbrido.	36
Figura 4 - Frota RJ.....	41
Figura 5 - Frota SP.	41
Figura 6 - Frota BH.....	42
Figura 7 - Poluição associada a uma pessoa em diferentes meios de transporte: Carro e Ônibus (g/km) no RJ.....	55
Figura 8 - Poluição associada a uma pessoa em diferentes meios de transporte: Carro e Ônibus (g/km) em BH.....	55
Figura 9 - Poluição associada a uma pessoa em diferentes meios de transporte: Carro e Ônibus (g/km) em SP.....	56
Figura 10 - CO2 associado a uma pessoa em diferentes meios de transporte: Carro e Ônibus (g/km).	56
Figura 11 - Poluição total associada a PEA por dia com três incrementos na quantidade de ônibus sobre carro no RJ.....	59
Figura 12 - CO2 total associado a PEA por dia com três incremento na quantidade de ônibus sobre carro no RJ.....	59
Figura 13 – Poluição gerada apenas por ônibus pela PEA por dia comparando a frota atual de ônibus e a frota alternativa composta por 20% elétrico, 30% híbrido, 10% etanol e 40% diesel no RJ.....	63
Figura 14 – CO2 gerado apenas por ônibus pela PEA por dia comparando a frota atual de ônibus e a frota alternativa composta por 20% elétrico, 30% híbrido, 10% etanol e 40% diesel no RJ.	63
Figura 15 - Poluição total associada a PEA por dia comparando a frota atual de ônibus e a frota alternativa composta por 20% elétrico, 30% híbrido, 10% etanol e 40% diesel no RJ.	64
Figura 16- CO2 total associado a PEA por dia comparando a frota atual de ônibus e a frota alternativa composta por 20% elétrico, 30% híbrido, 10% etanol e 40% diesel no RJ.	64
Figura 17 - CO2 associado a PEA por carro por dia comparando com nova frota de carros totalmente elétricos no RJ.	67
Figura 18 - CO2 associado total a PEA por dia hoje comparando com total gerado com nova frota de carros totalmente elétricos no RJ	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Efeitos nocivos dos principais poluentes veiculares.	6
Tabela 2 - Custos dos veículos escolhidos (baseado em Putz, 2013).	8
Tabela 3 - Peso dos Critérios.	20
Tabela 4 - Valores da função critério.	22
Tabela 5 – Resultado do ranking multicritério.	27
Tabela 6 - Frota de veículos, por tipo, segundo os Municípios da Federação - MAR/2016.	40
Tabela 7 - Porcentagem de Combustíveis nos Veículos RJ.	43
Tabela 8 - Porcentagem de Combustíveis nos Veículos SP.	43
Tabela 9 - Porcentagem de Combustíveis nos Veículos BH.	44
Tabela 10 - Preço por km em cada cidade.	44
Tabela 11 - Fator de emissão de veículos comerciais leves novos.	45
Tabela 12 – Distância média de veículo.	47
Tabela 13 - População Total / Porcentagem e Valor da PEA.	48
Tabela 14 - Porcentagem dos Meio de Locomoção.	49
Tabela 15 - Quantidade de Pessoas (PEA) por Meio de Locomoção.	49
Tabela 16 - Emissão do ônibus por km.	50
Tabela 17 - Produção de CO ₂ (g/l) por Ônibus.	50
Tabela 18 - Passageiros (em média) por Viagem em cada cidade.	51
Tabela 19- Poluição por km no RJ.	52
Tabela 20 - Poluição total associada a PEA no RJ.	52
Tabela 21 - Poluição por km em BH.	53
Tabela 22 - Poluição total associada a PEA em BH.	53
Tabela 23 - Poluição por km em SP.	54
Tabela 24 - Poluição total associada a PEA em SP.	54
Tabela 25 - Poluição por dia com 10% alterado no RJ.	57
Tabela 26 - Poluição por dia com 10% alterado no BH.	57
Tabela 27 - Poluição por dia com 10% alterado no SP.	57
Tabela 28 - Poluição por dia com 15% alterado no RJ.	58
Tabela 29 - Poluição por dia com 15% alterado no BH.	58
Tabela 30 - Poluição por dia com 15% alterado no SP.	58
Tabela 31 - Percentual de poluição comparativo entre alguns combustíveis com o combustível diesel.	60
Tabela 32- Frota de ônibus no novo cenário.	61
Tabela 33 - Poluição por dia com nova frota de ônibus no RJ.	61
Tabela 34 - Poluição por dia com nova frota de ônibus em BH.	62
Tabela 35 - Poluição por dia com nova frota de ônibus em SP.	62
Tabela 36 - Comparação com veículos elétricos na emissão de CO ₂	66

1. Introdução

1.1 Objetivo e motivação

Grandes cidades têm um apetite voraz por energia, consumindo dois terços da oferta mundial e gerando mais de 70% das emissões globais de CO₂. A rápida urbanização estimula uma demanda sem precedentes para o transporte, fonte importante de emissões de gases de efeito estufa, tornando-se um fator crítico das mudanças climáticas. As emissões de gases do efeito estufa (GEE) do setor do transporte estão aumentando a uma taxa maior do que em qualquer outro segmento.

O crescimento urbano e suas consequentes demandas de transportes não apresentam sinal de desaceleração. Mas, nesse futuro urbanizado reside uma oportunidade: a densidade urbana pode criar possibilidades para melhorar a qualidade de vida e diminuir a pegada de carbono por meio de planejamento e infraestruturas mais eficientes. Juntamente com o aumento da demanda por transporte vem a oportunidade para introdução de tecnologias mais limpas.

Ao fazer investimentos em soluções de transporte de baixo carbono, tais como veículos híbridos e elétricos, se consegue lidar melhor com os problemas globais, incluindo as mudanças climáticas e a dependência do petróleo. Programas de transporte de baixo carbono demonstram que as tecnologias de energia limpa têm potencial de reduzir significativamente as emissões de gases de efeito estufa em áreas urbanas.

O objetivo geral deste projeto de conclusão de curso é avaliar como formas mais eficientes de mobilidade, como por exemplo o transporte público, ou os veículos elétricos, podem melhorar a qualidade de vida nas cidades.

Dentro da efficientização dos transportes, será analisada:

- Os Combustíveis;
- As emissões geradas pelos veículos;
- A contribuição média destas emissões por pessoa/tipo de veículo;
- A substituição dos de veículos particulares por públicos nas cidades;
- As novas possibilidades de veículos públicos mais eco eficientes;
- As novas possibilidades de veículos particulares mais eco eficientes.

1.2 Metodologia

O presente trabalho é constituído de 7 capítulos que visam detalhar vários processos de efficientização de transportes. Nos parágrafos adiante, o escopo de cada capítulo será brevemente apresentado.

O capítulo 1 se resume à descrição do que este projeto propõe e o motivo para a escolha deste tema. Pretende-se nesta seção, apresentar ao leitor as razões que me levaram a explorar esse assunto.

O segundo capítulo pretende apresentar e contextualizar as emissões causadas pelos meios de transporte atuais. O objetivo desta seção introdutória é tornar o leitor mais familiarizado com tema

No capítulo 3, serão apresentados os principais combustíveis existentes, tanto convencionais quanto alternativos. Além de apresentar os combustíveis, suas aplicações nos transportes públicos serão devidamente explicadas nesta seção.

O capítulo 4 revelará uma exemplificação do transporte público mais eficiente já implementado. Neste capítulo, também serão analisadas as vantagens do mesmo.

No quinto capítulo, as tecnologias de baixo carbono serão analisadas e detalhadas na América Latina, focando nos cenários das cidades do Rio de Janeiro, São Paulo e Belo Horizonte.

Durante o sexto capítulo, cenários serão sugeridos a partir da implementação de alternativas eco eficientes. A intenção deste tópico é fornecer as informações necessárias de cenários com menos poluição e engarrafamentos nas cidades estudadas.

Finalmente, no sétimo capítulo, uma conclusão é apresentada, com o intuito de ressaltar os principais pontos abordados durante a elaboração deste trabalho.

2. Poluição

Como apontado em um estudo recente (Moriarty e Honnery, 2013), a produção mais limpa e mais sustentável no setor dos transportes desempenha um papel cada vez mais significativo, visto que o transporte de passageiros e o transporte de mercadorias em todo o mundo consomem aproximadamente um quarto da energia primária global total.

Só nos EUA, o setor do transporte é responsável por 28% de todas as emissões de GHG, 34% de todas as emissões de dióxido de carbono e 68% do consumo total de óleo (Ren et al., 2015). Da perspectiva global, os respectivos valores foram relatados: 22% emissões de dióxido de carbono e quase 60% da demanda de petróleo (Geng et al., 2013).

O esgotamento dos recursos fósseis naturais em todo o mundo e a situação política instável em várias áreas do Oriente Médio, do Norte África e Europa Oriental, bem como a necessidade de introduzir soluções de conversão de energia eco eficiente, estimulados, entre outros, por regulamentos internacionais (como o Protocolo de Quioto), relativa à limitação da pegada de gases de efeito estufa no meio ambiente ou as diretivas da Comissão Europeia que exigem redefinição dos objetivos da política de transportes municipais.

O artigo de Del Pero et al. (2015), destaca que a indústria de transporte é atualmente o segundo maior contribuinte para emissões de GHG na União Europeia. Como observou a avaliação de Moriarty e Honnery (2013), o transporte de passageiros é responsável por cerca de 60% do consumo total de energia no transporte e de emissões GHG.

A frota de transporte público na Europa pode ser dividida aproximadamente do seguinte modo: 89% dos veículos são equipados com motores que utilizam diesel, 7% são abastecidos com gás natural comprimido (CNG), 2,3% com bioetanol, hidrogênio e LPG, enquanto que os restantes 1,2% são elétricos.

A diretiva da UE 2009/33/CE (The Clean Vehicles Directive, abreviado como CVD) (European Comissão, 2009b), obriga todas as autoridades públicas e operadores públicos de transportes a ter em conta:

- Consumo de combustível;
- Emissões de dióxido de Carbono;
- Emissões locais nocivas (NOx, material particulado (PM), hidrocarbonetos não metano (NMHC)).

A tabela abaixo mostra os efeitos nocivos que tais emissões podem causar no ser humano.

Tabela 1- Efeitos nocivos dos principais poluentes veiculares.

Poluente	Impacto
CO	Atua no sangue reduzindo sua oxigenação, podendo causar morte após determinado período de exposição
NOx	Formação de dióxido de nitrogênio e na formação do <i>smog</i> fotoquímico e chuva ácida. É um precursor do ozônio
HC	Combustíveis não queimados ou parcialmente queimados, formam o <i>smog</i> e compostos cancerígenos. É um precursor do ozônio
MP	Pode penetrar nas defesas do organismo, atingir os alvéolos pulmonares e causar irritações, asma, bronquite e câncer de pulmão. Sujeira e degradação de imóveis próximos aos corredores de transporte

No exemplo da Alemanha, pode-se afirmar que a redução das emissões de dióxido de carbono na área de transporte é definitivamente o mais baixo em comparação com outros ramos da economia - nos anos 1990 e 2010 todos os setores da economia (com exceção de transporte propriamente dito) reduziram as emissões de dióxido de carbono em 30%, enquanto a correspondente diminuição no sector dos transportes foi de apenas 9,8% (Heinen,2012).

Ao longo de toda a Europa a emissão de dióxido de carbono na área de transporte está crescendo constantemente. O problema tornou-se tão notório que o governo francês anunciou a introdução de um sistema de soluções, a fim de limitar o número de carros movidos com motores a diesel e substituí-los por unidades de elétricas e híbridos. Até agora motores diesel foram favorecidos na França e sua percentagem em carros cresceu cerca de 80% (Reuters, 2014).

A Polónia esforça-se a cumprir as obrigações decorrentes do pacote clima-energia da União Europeia e do Protocolo de Kyoto, onde é necessário substituir gradualmente os atuais meios de transportes públicos por novas frotas ambientalmente limpas.

A questão sobre quais meios de transporte são os melhores já apareceu no primeiro congresso de transporte em Berlim, em 1886, quando carruagens conduzidas a cavalo foram comparadas com os veículos elétricos (Frota Limpa).

Hoje pode-se escolher entre ônibus com motores a diesel, híbridos, gás (CNG), elétricos ou *trolley*.

Em termos de emissões de poluentes e de ruído, os veículos com acionamentos elétricos são incomparáveis, sob a suposição de que toda a energia elétrica é verde, proveniente de estações hidrelétricas.

Uma comparação que inclui os custos de aquisição, manutenção e combustível/energia, para os veículos de 12 m de comprimento, que operando em rotas semelhantes e com cargas semelhantes, é apresentada na Tabela 2 e Figura 1 abaixo.

Tabela 2 - Custos dos veículos escolhidos (baseado em Putz, 2013).

Type of drive system	Purchase costs	Usage	Fuel consumption and costs
Diesel EURO VI	240,000 €	13,500 €/annum	38.80 l/100 km 1.10 €/l
Diesel hybrid type	300,000 €	16,000 €/annum	35.0 l/100 km 1.10 €/l
CNG Euro VI	245,000 €	15,000 €/annum	55.0 m ³ /100 km 0.71 €/m ³
Electro-bus	500,000 €	16,000 €/annum	103.0 kWh/100 km 0.10 €/kWh
Trolleybus	310,000 €	19,000 €/annum	138.0 kWh/100 km 0.10 €/kWh

Figura 1 - Comparação de Custos para diferentes tipode de veiculos (Fonte: Putz, 2013).

Os pressupostos são: período de utilização (12 anos) e km por ano (80,000). Valores comparáveis têm sido relatados em outros lugares (Kühne, 2010). A figura acima representa a informação no custo total por km para diferentes tipos de veículos na forma gráfica.

Os resultados apresentados salientam, além do aspecto ambiental, que o trólebus é um exemplo de solução do ponto de vista económico (neste caso para as aglomerações que já possuem as linhas de tração).

O desenvolvimento urbano estratégias pode se beneficiar muito com conceitos como desenvolvimento sustentável e modernização ecológica (Bayulken eHuisinigh, 2015a, b). Pode-se

esperar que, no futuro transporte de carro individual nas cidades tornar-se problemático devido, por exemplo, a engarrafamentos (Morgadinho et al., 2015).

Ao longo deste trabalho serão discutidas alternativas de combustíveis e soluções aplicadas em outros países que vêm trazendo resultados positivos. Também será estudado alterações na frota de veículos particulares e públicos nas principais cidades do Brasil e as consequências disso na emissão dos gases poluentes.

3. Combustíveis alternativos para transporte público

O desenvolvimento tecnológico de ônibus com novos combustíveis alternativos é considerado neste tópico estudado por Tzeng (2005). Vários tipos de combustíveis são considerados como fontes alternativos, ou seja, eletricidade, pilha de combustível (hidrogênio) e metanol. Os veículos elétricos, por exemplo, podem ser considerados os veículos alternativos com a menor poluição do ar. Já os veículos elétricos híbridos proporcionam um modo alternativo mais adequado, pelo menos durante o período de melhoria da tecnologia dos veículos elétricos. Um veículo elétrico híbrido é definido como um veículo com o motor de combustão interna convencional e o motor elétrico como suas principais fontes de energia.

Especialistas de diferentes grupos de tomada de decisão realizaram múltiplas avaliações de veículos alternativos. O AHP foi aplicado para determinar os pesos relativos dos critérios de avaliação. Os métodos TOPSIS e VIKOR são comparados e aplicados para determinar o melhor modo de combustível alternativo. O resultado, adiante, mostra que o ônibus híbrido elétrico é a o mais adequado para substituir as áreas urbanas a curto e médio prazo. Mas, se a distância do ônibus elétrico estender-se a uma faixa aceitável, o ônibus elétrico puro poderá ser a melhor alternativa.

Morita (2003) acreditava que os principais automóveis do século 21 serão provavelmente dos seguintes quatro tipos: veículos com motor de combustão interno (ICEVs), veículos elétricos híbridos (HEVs), veículos elétricos (EVs), e veículos de combustíveis de

célula (FCVs). McNicol et al. (2001) apontou que os principais concorrentes de FCVs são EVs, HEVs e veículos convencionais avançados movidos a ICE (ICEVs).

O principal parâmetro na definição de soluções alternativas é o combustível. De acordo com os dados recolhidos nesse estudo, as alternativas são classificadas em quatro grupos: o motor diesel convencional, o novo modo de combustível alternativo, o veículo elétrico, e o veículo elétrico híbrido.

Há um esforço mundial para desenvolver meios de transporte utilizando novos combustíveis alternativos, incluindo metanol, células de combustível (hidrogénio), e gás natural comprimido. O veículo eléctrico operando sobre eletricidade é de grande interesse, mas a tecnologia ainda está em desenvolvimento. As vantagens de EVs são principalmente que eles executam eficientemente mesmo em condições de baixa carga, e não descarregam poluentes durante o uso (Morita, 2003). Sua fraqueza fundamental é o tempo necessário para recarregar as baterias. Além disso, as desvantagens tal como distâncias curtas (geralmente menos do que 200 km) e à falta de infraestrutura de apoio significativamente reduzem sua conveniência (Morita, 2003).

O veículo híbrido eléctrico, que retém tanto o motor eléctrico e como também o motor de combustão interna, tem sido amplamente aceito pelos utilizadores (Griffith e Gleason, 1996; Harding, 1999; McNicol et al., 2001; Maggetto e Van Mierlo, 2001). Morita (2003) apontou que HEVs têm o potencial para se juntar aos veículos convencionais em termos de custo e comodidade. As vantagens de HEVs são inúmeras como a regeneração da energia dos freios,

desligamento do motor em vez de inativação, e de direção sob condições de alta carga (estas vantagens são mais perceptíveis na condução em cidades).

Além disso, os HEVs são capazes de incorporar qualquer tipo de combustão interna, ou células de combustível e mostrar uma boa eficiência, não importa que tipo de combustível que o motor utiliza. Nesse tópico, as seguintes alternativas são consideradas: gasolina-elétrico, diesel-elétrico, CNG elétrico e LPG elétrico.

Com base nos resultados globais do desenvolvimento, 12 alternativas de modo de combustível são consideradas, e as características de cada modo de combustíveis alternativos são descritos a seguir.

➤ Motor diesel convencional

O ônibus com motor diesel convencional é empregado pela maior parte das empresas de transporte. Na verdade, o motor diesel é o mais eficiente de todos os motores de combustão interna existente, tornando-se uma das principais fontes de energia no século 21 (Morita, 2003). É introduzido no conjunto de alternativas afim de compará-lo com os outros combustíveis.

➤ Gás natural comprimido GNC (ou CNG)

O gás natural é utilizado em várias formas como combustível para veículos, isto é, gás natural comprimido (GNC), gás natural liquefeito (GNL) e gás natural attached (ANG). O veículo CNG já foi comercializado em todo o mundo e é desenvolvido em sua tecnologia (há cerca de quatro milhões de veículos GNC do mundo). O veículo de gás natural comprimido está espalhado em

países com seu próprio gás natural. Veículos CNG emitem apenas pequenas quantidades de dióxido de carbono e têm alto valor de octanagem; assim, eles são adequados para utilização como veículos de transporte público (Sperling, 1995). O fornecimento, a distribuição e a segurança do gás natural são as questões mais urgente que necessitam de melhorias.

➤ Gás Liquefeito de Petróleo GLP (ou LPG)

Há países que têm utilizado este modo de combustível para o transporte público. No Japão, Itália e Canadá, entorno de 7% dos ônibus são alimentados por GLP (Sperling, 1995), e alguns países europeus estão planejando empregar veículos LPG, devido as considerações sobre poluição.

➤ Combustível de Célula (hidrogénio)

A chamada bateria de célula de combustível pode transformar hidrogênio e oxigênio em energia para veículos (Sperling, 1995), no entanto, o hidrogénio não é apropriado para armazenamento a bordo (Morita, 2003). A pesquisa de um combustível de célula a hidrogênio em ônibus já foi concluída com sucesso e os resultados dos testes com o veículo experimental operando com combustível de hidrogénio indicam que este veículo tem uma superfície ampla na câmara de combustão, baixa temperatura de queima, e o combustível é facilmente inflamável (DELUCCHI, 1989). A empresa Daimler-Benz já desenvolveu um protótipo de veículo com combustível de célula. Até o momento, os únicos veículos oferecidos para venda com a tecnologia de combustível de célula é o táxi Zevco Londres, que foi lançado em Londres em julho de 1998 (Harding, 1999). Devido ao fato de a energia para operar o veículo vir a partir de uma reação química (entre o hidrogénio e oxigénio) nenhuma substância prejudicial é produzida, apenas

água pura emitida, sob a forma de ar. Um tanque de combustível totalmente carregado pode durar entorno de 250 km.

➤ Metanol

A pesquisa de metanol está relacionada com veículos com motores a gasolina. A taxa em combinação de metanol no combustível é de 85% (o chamado M85). O motor que pode usar esse combustível com diferentes taxas de combinação é denominado como veículos de combustível flexível (FFV). O motor FFV pode rodar sem problemas com qualquer combinação de taxa de gás com metanol, e o metanol atuará como um combustível alternativo e ajudará a reduzir a emissão de fumaça preta e os óxidos nitrosos (NOx). Postos de combustíveis que fornecem metanol já está disponível no Japão desde 1992 (Sperling,1995). A energia térmica de metanol é inferior à da gasolina, e a capacidade contínua de viagem deste veículo é inferior ao de veículo convencional. Além disso, o composto aldeído que vem junto com a queima de metanol forma um ácido forte, e os pesquisadores devem prestar mais atenção a este modo de combustível.

➤ Veículo elétrico “Opportunity charging”

A fonte de energia para o “opportunity charging electric vehicle” (OCEV) é a combinação de uma bateria carregada e uma oportunidade de carregamento rápido durante o tempo em que o ônibus está ocioso, quando parado. Sempre que o ônibus começar, a partir do depósito, a bateria será totalmente carregada. Durante os 10-20 s, quando o ônibus estiver parado, o poderoso sensor de recepção no ônibus elétrico (instalado sob o ônibus) vai ser abaixado para a placa de alimentação de carga instalado em frente a parada do ônibus para carregar a bateria.

Dentro de 10 segundos de uma parada, a bateria que está carregada com 0.15kWh de potência (dependendo do poder de fornecimento da instalação projetada), fornece a energia adequada para movê-lo até a próxima parada.

➤ Carga elétrica direta

Este tipo de ônibus elétrico está no estágio de design de protótipo. O poder para este veículo vem principalmente da bateria carregada. Uma vez que a energia da bateria é insuficiente, o veículo terá que voltar para a garagem para a recarga. O desenvolvimento de uma bateria adequada é crítico para este modo de veículo. Se uma quantidade maior de a eletricidade puder ser armazenada na bateria, a distância deste veículo irá aumentar.

➤ Ônibus elétrico com baterias permutáveis

O objetivo de um ônibus elétrico com uma bateria permutável é efetuar uma rápida carga da bateria e assim alcançar uma maior distância. O ônibus é modificado para criar mais espaço para a bateria dentro e o número de baterias é ajustado para atender às necessidades das diferentes rotas. A troca tem que ser rápida para que assim a mobilidade do veículo possa ser mantida.

➤ Ônibus híbrido elétrico com motor a gasolina

O veículo elétrico-gasolina tem um motor elétrico como sua principal fonte de energia e um motor de pequeno porte a gasolina. Quando a energia elétrica falhar, o motor a gasolina pode assumir e continuar a viagem. A energia cinética entregue durante o movimento será transformada em energia elétrica para aumentar a distância dos veículos.

➤ Ônibus híbrido elétrico com motor a diesel

O veículo elétrico-diesel tem um motor elétrico como sua principal fonte de energia e um motor de pequeno porte a diesel. Quando a energia elétrica falhar, o motor diesel pode assumir e continuar a viagem, enquanto a energia cinética entregue durante o movimento será transformada em energia elétrica para aumentar a distância dos veículos.

➤ Ônibus híbrido elétrico com motor de CNG

O veículo elétrico-CNG tem um motor elétrico como sua principal fonte de energia e um motor de pequeno porte CNG. Quando a energia elétrica falhar, o motor CNG pode assumir e continuar a viagem, enquanto a energia cinética entregue durante o movimento será transformada em energia elétrica para aumentar a distância dos veículos.

➤ Ônibus híbrido elétrico com motor de LPG

O veículo elétrico-LPG tem um motor elétrico como sua principal fonte de energia e um motor de pequeno porte LPG. Quando a energia elétrica falhar, o motor LPG pode assumir e continuar a viagem, enquanto a energia cinética entregue durante o movimento será transformada em energia elétrica para aumentar a distância dos veículos.

3.1 Os critérios de avaliação estabelecidos:

A avaliação dos modos alternativos de combustível pode ser realizada de acordo com diferentes aspectos. Quatro critérios de avaliação são considerados neste tópico: social, econômico, tecnológico e transporte.

A fim de avaliar as alternativas, 11 critérios de avaliação são estabelecidos, como se segue:

- (1) Suprimento de energia: Este critério é baseado na quantidade anual de energia que pode ser fornecida, na confiabilidade do abastecimento de energia, a confiabilidade do armazenamento de energia, e sobre o custo do fornecimento de energia.
- (2) Eficiência energética: Este critério representa a eficiência dos veículos movidos por cada combustível.
- (3) Poluição do ar: Este critério refere-se à medida que um combustível associado a um veículo contribui para a poluição do ar, uma vez que os veículos com diversos modos de combustível geram um impacto no ar de forma diferente.
- (4) Poluição sonora: Este critério refere-se ao ruído produzido durante o funcionamento do veículo.
- (5) Relacionamento industrial: A indústria de veículo convencional é uma indústria locomotiva, e é intrinsecamente relacionada com outra produção industrial; a relação de cada alternativa a outra produção industrial é tomado como o critério.
- (6) Custos de implementação: Este critério refere-se aos custos de produção e implementação de veículos alternativos.
- (7) Custos de manutenção: Este critério refere-se aos custos de manutenção para veículos alternativos.
- (8) Capacidade do veículo: Este critério representa a distância máxima, a inclinação de escalada e velocidade média associada com cada combustível.

- (9) Instalação da estrada: Este critério refere-se às características das estradas necessárias para o funcionamento dos veículos alternativos (como o pavimento, e declive).
- (10) Velocidade de fluxo do tráfego: Este critério refere-se à comparação entre a velocidade média dos veículos alternativos para um determinado tráfego. Se a velocidade do fluxo de tráfego for mais elevada do que a velocidade do veículo, o veículo não seria apropriado para operar em certas rotas.
- (11) Sensação de conforto: Este critério refere-se à questão específica a respeito sensação de conforto e ao fato de que os usuários tendem a prestar atenção aos acessórios do veículo (ar-condicionado, porta automática, etc.).

3.2 Avaliação dos pesos dos critérios

Na avaliação dos pesos dos critérios, os especialistas de tomada de decisão participantes eram das áreas de fabricação de ônibus elétricos, de institutos acadêmicos, de organizações de pesquisas e de setores de operações de ônibus. Eles avaliaram a importância relativa (subjetivamente) para cada um dos critérios. Os valores médios de pesos são apresentados na tabela abaixo. Estes dados mostram que a velocidade de fluxo de tráfego é o fator mais importante na avaliação dos veículos alternativos; o segundo em importância é a poluição do ar, indicando a necessidade de novos modos de combustíveis alternativos.

Tabela 3 - Peso dos Critérios.

Criterion	Manufacture	Academic institute	Research organization	Bus operator	Average
1 Energy supply	0.0357	0.0314	0.0340	0.0249	0.0313
2 Energy efficiency	0.1040	0.0943	0.1020	0.0748	0.0938
3 Air pollution	0.1355	0.2090	0.1595	0.1605	0.1661
4 Noise pollution	0.0452	0.0697	0.0532	0.0535	0.0554
5 Industrial relationship	0.0923	0.0357	0.0480	0.0757	0.0629
6 Employment cost	0.0900	0.0680	0.0343	0.1393	0.0829
7 Maintenance cost	0.0300	0.0227	0.0114	0.0464	0.0276
8 Vehicle capability	0.1373	0.0953	0.1827	0.0803	0.1239
9 Road facility	0.0827	0.0590	0.1520	0.0283	0.0805
10 Speed of traffic flow	0.1520	0.2420	0.1400	0.2637	0.1994
11 Sense of comfort	0.0957	0.0730	0.0833	0.0523	0.0761

O bom procedimento analítico exige fazer histogramas dos dados, para verificar a forma de sua distribuição, antes de prosseguir com a análise multicritério. Se os dados não são normalmente distribuídos, e o desvio-padrão não é pequena, a análise de sensibilidade que abranja a gama de pesos deve ser realizada dentro do processo multicritérios de tomada de decisão.

3.3 Avaliação das alternativas

A abordagem de avaliação aplicado neste trabalho baseia-se na avaliação feita pelos peritos profissionais. O valor médio avaliado para a alternativa j de acordo com o critério i é determinada pela relação:

$$f_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N u_{lij} ,$$

onde u_{lij} é o valor de desempenho dado pelo perito l à alternativa j de acordo com o critério i, N é o número de peritos que participam no processo de avaliação. A "função de valor" u tem as

seguintes propriedades: $0 \leq u \leq 1$, e $u_{ij} > u_{ik}$, o que significa que a alternativa j é melhor do que a alternativa k de acordo com o critério.

A seleção dos membros do grupo de peritos é de extrema importância no processo de avaliação do problema MCA/ MCDM. A seleção de ônibus de combustível alternativo é um problema público e especialistas credíveis são realmente importantes para avaliar este problema.

Os especialistas das indústrias, dos departamentos do governo, acadêmicos e de institutos de pesquisa são reconhecidos como especialistas com credibilidade. Por esta razão, os especialistas deste estudo em Taiwan foram convidados a partir do Bureau de Transportes da cidade de Taipei, da administração de Proteção Ambiental, do Instituto do Ministério do Transporte e das Comunicações, associação de Veículos, do Comitê de Energia e o pessoal de investigação sobre veículos elétricos.

A informação encontrada em pesquisas anteriores (emissões de fumaça preta, a capacidade de viagem contínua) foi a informação básica de referência e foi listado no questionário elaborado para os especialistas. Dentro do processo de avaliação (método Delphi), os resultados da avaliação foram apresentados aos peritos para a segunda avaliação. Eles tiveram que reconsiderar os valores de desempenho de cada combustível alternativo e reavaliar as alternativas. Dezesete questionários válidos foram obtidos a partir do processo de avaliação.

Os resultados da avaliação após a segunda avaliação são apresentados na Tabela 4, abaixo. De acordo com o critério de fornecimento de energia, o valor médio de desempenho é mais elevado para o ônibus a diesel (0,820), e o mais baixa para o ônibus de hidrogênio (0,360).

No que diz respeito à eficiência energética, os valores médios de desempenho são muito elevados para os veículos elétricos. Os valores médios de desempenho para os veículos elétricos são os mais elevados de acordo com poluição do ar e poluição sonora, mas os valores são muito baixos de acordo com a capacidade do veículo e facilidade de estradas. Analisando os dados da Tabela 4, pode-se concluir que as taxas dos veículos elétricos são muito boas de acordo com os critérios da energia, impacto ambiental, relacionamento industrial e custo de implementação; enquanto que o modo de transporte utilizando diesel convencional tem alta taxa no quesito capacidade do veículo e (novos) recursos necessários e estrada; já considerando os modos de transporte que utilizam gás natural, metanol e hidrogênio estão associadas com os "valores médios".

Tabela 4 - Valores da função critério.

Alternatives	Energy supply	Energy efficiency	Air pollution	Noise pollution	Industrial relations	Employment cost	Maintenance cost	Capability vehicle	Road facility	Speed of traffic	Sense of comfort
1. Diesel bus	0.82	0.59	0.18	0.42	0.58	0.36	0.49	0.79	0.81	0.82	0.56
2. CNG bus	0.77	0.70	0.73	0.55	0.55	0.52	0.53	0.73	0.78	0.66	0.67
3. LPG bus	0.79	0.70	0.73	0.55	0.55	0.52	0.53	0.73	0.78	0.66	0.67
4. Hydrogen	0.36	0.63	0.86	0.58	0.51	0.59	0.74	0.56	0.63	0.53	0.70
5. Methanol	0.40	0.54	0.69	0.58	0.51	0.52	0.68	0.52	0.63	0.60	0.70
6. Charging	0.69	0.76	0.89	0.60	0.72	0.80	0.72	0.54	0.35	0.79	0.73
7. Electric dir.	0.77	0.79	0.89	0.59	0.73	0.80	0.72	0.47	0.44	0.87	0.75
8. Electric bat	0.77	0.79	0.89	0.59	0.73	0.80	0.72	0.51	0.48	0.87	0.75
9. Hybrid-gas.	0.77	0.63	0.63	0.52	0.66	0.63	0.65	0.67	0.70	0.80	0.74
10. Hyb-diesel	0.77	0.63	0.51	0.58	0.66	0.63	0.65	0.67	0.70	0.80	0.74
11. Hyb.-CNG	0.77	0.73	0.80	0.48	0.63	0.66	0.65	0.67	0.71	0.62	0.78
12. Hyb.-LPG	0.77	0.73	0.80	0.48	0.63	0.66	0.65	0.67	0.71	0.62	0.78

3.4 Optimização do Multicritério:

Os métodos MCDM VIKOR e TOPSIS baseiam em uma função de agregação que representa proximidade com o(s) ponto(s) de referência(s). Mais detalhes sobre estes dois

métodos, favor, referir-se a Tzeng e Opricovic (2003). Estes dois métodos introduzem diferentes formas de agregar funções (Lpmetric) para o ranking. O método Vikor introduz Q_j como uma função de L1 e LN, enquanto que o método TOPSIS introduz C^*_j como uma função de L2. Eles usam diferentes tipos de normalização para eliminar as unidades de funções critério: o método Vikor usa normalização linear, enquanto que o método TOPSIS utiliza normalização vetorial. Encontramos a solução da seleção de combustível alternativo de ônibus através deles, e os resultados são mostrados na Tabela 5.

3.4.1 Comparação de TOPSIS e VIKOR

A análise multicritérios (MCA) é apropriada para resolver os problemas relacionados com vários aspectos. TOPSIS e Vikor são dois métodos que são fáceis de aplicar entre os métodos de classificação de MCA. No entanto, estes dois métodos são diferentes nas definições básicas. Opricovic e Tzeng (2003, 2004) discutiram as diferenças desses dois métodos. Neste tópico, foram aplicados estes dois métodos para encontrar a solução composta de combustíveis alternativos para ônibus, e mostraram a diferença desses métodos. As principais características do Vikor e TOPSIS são resumidas aqui, a fim de esclarecer as diferenças entre estes dois métodos.

3.4.1.1 Base Processual

Ambos os métodos assumem que existe uma matriz de desempenho f_{jnxJ} obtida por meio da avaliação de todas as alternativas em termos de cada critério. A normalização é utilizada para eliminar as unidades de valores do critério. Uma função de agregação é formulada e é

utilizado como um índice ranking. Além da classificação, o método VIKOR propõe uma solução com uma taxa de vantagem.

3.4.1.2 Normalização

A diferença aparece na normalização usada dentro destes dois métodos. O método VIKOR usa normalização linear (Opricovic e Tzeng, 2003,2004), e o valor normalizado não depende da unidade de avaliação de um critério. O método TOPSIS usa normalização do vetor, e o valor normalizado pode ser diferente para diferentes unidades de avaliação de um determinado critério. Uma versão posterior do método TOPSIS usa normalização linear (Opricovic e Tzeng, 2003,2004).

3.4.1.3 Agregação

A principal diferença aparece nas abordagens de agregação. O método VIKOR introduz uma função agregante, que representa a distância entre a solução ideal. Este índice de classificação é uma agregação de todos os critérios, a importância relativa dos critérios, e um equilíbrio entre a satisfação total e individual. O Método TOPSIS introduz o índice de classificação, incluindo as distâncias do ponto ideal e do ponto negativo ideal. No entanto, o ponto de referência poderia ser uma grande preocupação na tomada de decisões, e para ser o mais próximo quanto possível do ideal é a razão da escolha humana. Estar longe de um ponto poderia ser uma meta apenas em uma situação particular, e a importância relativa permanece uma questão em aberto. O método TOPSIS usa distância Euclidiana N-dimensional que por si

poderia representar algum equilíbrio entre a satisfação total e indivíduo, mas usá-lo de uma maneira diferente do que Vikor, onde um peso v é introduzido.

3.4.1.4 Solução

Ambos os métodos proporcionam uma lista de classificação. A alternativa classificada por Vikor como a mais alta é a mais próximo da solução ideal.

No entanto, a alternativa classificada por TOPSIS mais alta é a melhor em termos de índice de classificação, que não significa que é sempre a mais próximo da solução ideal. Além de classificação, o método Vikor propõe uma solução compromisso com uma taxa de vantagem.

3.4.1.5 Solução Compromisso

O método de classificação foi aplicado com dados fornecidos pelo grupo de peritos (avaliação média dos valores na Tabela 4, e os pesos médios na Tabela 3). A lista de classificação obtida (por VIKOR) é apresentado na Tabela 5.

Os resultados do ranking também são obtidos através da aplicação de outro método, chamado TOPSIS, que é uma modificação de programação de compromisso.

Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) foi desenvolvido com base no conceito de que a alternativa escolhida deve ter a distância mais curta entre o solução ideal e o mais distante da solução negativa ideal, utilizando distância euclidiana (Hwang e Yoon, 1981). Os resultados do ranking (por TOPSIS) também são apresentados na Tabela 5.

Existem quatro soluções compromisso obtidos pela Vikor, pois os quatro primeiros são próximos. Este resultado mostra que o ônibus eléctrico híbrido é o mais adequado, seguido pelos veículos eléctricos na lista de classificação (Tabela 5).

A análise de estabilidade de preferência foi realizada (por Viktor) e os intervalos de peso de estabilidade por um único critério são obtidas, como se segue.

$$0.021 \leq w_1 \leq 0.213 \text{ (input } w_1=0.031); 0.000 \leq w_2 \leq 0.096 \text{ (input } w_2=0.094);$$

$$0.116 \leq w_3 \leq 0.168 \text{ (input } w_3=0.166); 0.000 \leq w_4 \leq 0.063 \text{ (input } w_4=0.055);$$

$$0.000 \leq w_5 \leq 0.175 \text{ (input } w_5=0.063); 0.000 \leq w_6 \leq 0.099 \text{ (input } w_6=0.083);$$

$$0.000 \leq w_7 \leq 0.040 \text{ (input } w_7=0.028); 0.123 \leq w_8 \leq 0.298 \text{ (input } w_8=0.124);$$

$$0.073 \leq w_9 \leq 0.358 \text{ (input } w_9=0.081); 0.105 \leq w_{10} \leq 0.202 \text{ (input } w_{10}=0.199);$$

$$0.000 \leq w_{11} \leq 0.188 \text{ (input } w_{11}=0.076).$$

Os intervalos de estabilidade dos pesos mostram que a solução compromisso obtida (por Viktor, Tabela 5) é muito sensível às mudanças nos pesos dos critérios.

Com diferentes pesos da Tabela 3, os seguintes conjuntos de soluções compromisso (por Viktor) são obtidos:

Os veículos eléctricos (três modos) estão no conjunto de soluções compromisso com os pesos dados pelos setores de “operadores de ônibus” e por “institutos académicos”;

Veículos elétricos híbridos, auxiliados com gasolina e motor a diesel, são a solução compromisso obtido com os pesos dados por "fabricantes";

Veículo elétrico híbrido com motor a gasolina, modo de combustível GNC e LPG, e veículo elétrico híbrido com motor a diesel estão no conjunto de soluções de compromisso obtidos com os pesos dados pela "organização de pesquisa".

Os resultados da classificação obtida pelo método TOPSIS indicam que os veículos elétricos podem ser considerados como a melhor solução compromisso, e os veículos elétricos híbridos podem ser considerados como a segunda melhor solução compromisso.

Tabela 5 – Resultado do ranking multicritério.

Ranking by VIKOR			Ranking by TOPSIS			
Rank	Alternative	Q	I Rank	Evaluation Index	II Rank	Evaluation Index
1	Hybrid electric bus gasoline engine	0.168	4	0.749	9	0.756
2	Electric bus exchangeable battery	0.172	1	0.945	1	0.975
3	Electric bus opportunity charging	0.224	2	0.933	3	0.964
4	Electric bus direct charging	0.253	3	0.931	2	0.967
5	Hybrid electric bus diesel engine	0.281	7	0.700	11	0.488
6	Liquid propane gas (LPG)	0.479	11	0.345	8	0.830
7	Compress natural gas (CNG)	0.480	10	0.399	7	0.830
8	Hybrid electric bus with CNG	0.510	5	0.700	4	0.889
9	Hybrid electric bus with LPG	0.510	6	0.700	5	0.889
10	Conventional diesel engine	0.806	12	0.301	12	0.097
11	Methanol	0.852	9	0.527	10	0.698
12	Fuel cell (hydrogen)	0.925	8	0.563	6	0.865

De acordo com os resultados da Tabela 5, o motor a diesel convencional é classificado muito baixo, refletindo a necessidade de um modo de combustível alternativo. Pode-se concluir então que o ônibus elétrico híbrido é o substituto mais adequado para as áreas urbanas em curto e médio prazo.

Mas, se a distância do ônibus elétrico puder ser estendida para um intervalo aceitável, o ônibus elétrico puro poderia ser a melhor alternativa.

Parece que os especialistas concordaram unanimemente que é necessário desenvolver um modo de combustível alternativo para o transporte público.

No próximo capítulo se analisará uma prática eco eficiente que já está sendo implantada na Europa. Depois, mais adiante um estudo teórico da redução da poluição, em três cidades do Brasil, será apresentado, nele os veículos de transporte público convencionais serão substituídos por uma frota com combustíveis alternativos.

4. Iniciativa eco eficiente para um sistema de transportes público sustentável

O transporte público baseado em redes de tróibus oferece novas oportunidades para o desenvolvimento sustentável das cidades. Este tópico descreve os efeitos decorrentes da modernização de um sistema de transporte tróibus existentes em Tichy, Polônia.

As soluções inovadoras em matéria de design de tração e o uso de veículos modernos equipados com baterias de tração e sistemas de geração tornou possível alcançar os efeitos positivos esperados relacionados com a economia de energia, proteção ambiental e limitação das emissões de gases de efeito estufa, em particular, o dióxido de carbono.

Experiências positivas resultaram em luz verde para investimentos sucessivos e desenvolvimento de uma nova linha de quase 5 km de comprimento e compras de novos veículos equipados com baterias de tração que os tornam capazes de percorrer uma distância de 20 km, sem uma nova tração.

O objetivo fundamental do projeto TROLLEY era promover o ônibus elétrico como o transporte mais limpo e mais econômico para as cidades e regiões da Europa Central. O projeto teve início em fevereiro de 2010 e durou até março 2013.

O projeto Trolley foi o maior empreendimento do programa Europeu da Comissão "INTERREG Central Europe". O orçamento total do projeto foi de 4,2 milhões de euros, dos quais 3,2 milhões foi financiado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER).

Os objetivos do projeto podem ser resumidos como:

- Elaboração e implementação de conceitos inovadores que visam enfrentar desafios técnicos e ambientais para os sistemas de transporte público baseados em ônibus elétrico;
- Desenvolvimento de manuais e guias sobre armazenamento de energia avançado e possibilidade de converter os ônibus a diesel para ônibus elétricos;
- Viabilizar estudos sobre a extensão da rede de trólebus para áreas urbanas de baixa densidade;
- Promoção de ônibus elétrico como um meio de transporte urbano eco eficiente;
- Intercâmbio de experiências e conhecimentos sobre transportes públicos elétrico sustentável na Europa;
- Definição de orientações e determinações para o desenvolvimento de transporte trólebus no futuro.

Como referido anteriormente, o ônibus elétrico pode ser de fato uma solução “eco-friendly” para o transporte público, o que pode ser comprovado por exemplo por inspeção dos dados fornecidos no estudo (Kliucininkas et al., 2012). Os autores realizaram uma análise comparativa das alternativas de transporte público, no exemplo, da cidade lituana de Kaunas.

Eles realizaram a avaliação dos encargos ambientais dos diferentes sistemas de transporte utilizando a Metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida. Os resultados da sua análise

para a etapa, em que a conversão do combustível em energia de movimento (do veículo) tem lugar, está representado na Figura 2. Valores comparáveis foram relatados por outros autores, por exemplo, no papel (Tica et al., 2011).

Figura 2 - Consumo de combustível e as emissões de GHG por km para diferentes tipos de sistemas de transporte público. Notação: DB - ônibus a diesel, T (HFO) - tróibus de combustível pesado, T (NG) - tróibus de gás natural, CNGB - ônibus de compressão de gás natural, CBB - ônibus de biogás comprimido. Fonte: (Kliucininkas et al, 2012).

O transporte tróibus está se tornando mais flexível e acessível para toda a área da cidade. Com a experiência adquirida durante a realização do projeto Trolley, bem como os próprios resultados da investigação, foi possível projetar um protótipo veicular equipado com o

fornecimento baseado em supercapacitores, que deve ser utilizado para mais testes sobre a redução de perdas na rede.

Estas ações têm abordado com sucesso o conceito do desenvolvimento sustentável na área de transporte e no desenvolvimento de estratégias nacional de transportes, que estabeleceu uma série de metas a serem alcançados até 2030, entre outros, no desenvolvimento de uma rede moderna que consistente na infraestrutura de transporte, na eliminação do impacto ambiental negativo, bem como no aumento do número de passageiros, a fim de reduzir os problemas de congestionamento.

As premissas do projeto são, aliás, coerentes com as recomendações da Comissão Europeia relativa a formação de sistemas de transporte urbano futuro (transportes urbanos "inteligente" e um aumento da sua eficiência, a integração de diferentes ramos de transporte e desenvolvimento de sistemas intermodais).

Tal estudo estimula melhor entender a situação da América Latina, onde se pode melhorar e quais os impactos ambientais podem ser reduzidos.

5. As tecnologias de baixo carbono nas frotas de ônibus da América Latina

O setor de transporte tem um impacto significativo no aumento das emissões de gases de efeito estufa, assim, a mudança para veículos com fontes de energia mais limpas continua a ser um desafio extremamente importante. Cidades da América Latina têm trabalhado para melhorar seus sistemas de transporte e alcançar melhor qualidade do ar.

Na América Latina, onde o setor dos transportes já é o maior contribuinte para as emissões de GEE, várias cidades têm trabalhado para aprimorar seus sistemas de transporte visando melhorar a qualidade do ar, aumentar a segurança rodoviária e promover a inclusão social. Dessa maneira, vários governos locais já estão considerando as tecnologias de baixo carbono nos ônibus como um salto à frente das tecnologias poluentes, e assim, alcançar esses objetivos.

Os resultados do Programa para Testes de Ônibus Híbridos e Elétricos (o “Programa”), que foi concebido pelo C40-CCI e vem sendo apoiado ativamente pelo BID com o financiamento de \$1,49 milhões de dólares, demonstram que as tecnologias híbridas e elétricas produzem volumes menores de GEE e poluentes atmosféricos locais, além de serem mais econômicas do que os motores dos ônibus a diesel convencionais. Como esperado, os resultados diferem de acordo com os padrões e ciclos de condução de cada cidade, o grau de treinamento dos motoristas e a topografia, como ondulações do terreno e altitude, embora esta última variável, que está relacionada com a disponibilidade de oxigênio, não afete os ônibus elétricos.

Existem fortes evidências dos benefícios ambientais e sociais da adoção de ônibus híbridos e elétricos por meio da redução de poluentes locais, que têm um grande impacto sobre a saúde e outras externalidades como a poluição sonora e o conforto.

O programa estabelece exemplos e cenários de investimentos em ônibus híbridos e elétricos por empresas de tecnologia para ônibus, cidades e operadores de transportes locais; compila e compartilha resultados entre a rede de participantes, as partes interessadas e cidades dos países latino-americanos. É projetado, em última instância, para direcionar a implantação de frotas de ônibus com tecnologias de baixo carbono nas cidades da América Latina. Essas frotas poderão incluir até 30.000 ônibus híbridos e elétricos nos próximos 10 anos, resultando na redução acumulada das emissões na ordem de 10 milhões de toneladas de Dióxido de carbono equivalente (CO₂e) no mesmo período.

Os resultados da fase técnica do Programa mostraram que a adoção de ônibus híbridos pode reduzir as emissões de CO₂ em até 35% (26% em média) se comparadas as dos ônibus a diesel convencionais. Uma redução média entre 60% e 80% das emissões locais é atingida, juntamente com a redução de 30% no consumo de combustível. Já os ônibus elétricos não apresentam emissões locais e reduzem o consumo de energia em até 77%, quando comparamos o uso de eletricidade com o diesel.

Enquanto as análises econômicas mostraram custos de aquisição mais altos para os ônibus híbridos e elétricos, as avaliações dos ciclos de vida total mostraram que os ônibus híbridos e elétricos podem reduzir os custos globais da cidade e dos operadores em longo prazo.

Em particular, os híbridos têm o custo de aquisição entre 50% e 60% maior e os elétricos entre 125% e 150% maior do que os convencionais a diesel.

Nas condições atuais, ambas as tecnologias com base em baterias mostraram desempenhos tecnológicos comparáveis e custos de manutenção semelhantes aos dos ônibus a diesel. Espera-se que no futuro, essas condições melhorem para as tecnologias híbridas e elétricas. Caso este mercado se estabeleça, os ônibus híbridos e elétricos poderão superar, em longo prazo, os veículos tradicionais, por meio da economia de energia, redução das emissões e dos custos de manutenção, assim como em maior durabilidade.

5.1.1 Entendo melhor a tecnologia do ônibus híbrido e elétrico

As tecnologias dos ônibus híbridos e elétricos são conhecidas como tecnologias de baixo carbono. Os ônibus híbridos combinam um motor a combustão interna convencional e um sistema de propulsão elétrico, chamados de ônibus híbridos diesel-elétrico. A propulsão elétrica destina-se a conseguir uma maior economia de combustível se comparada a um veículo convencional. Os ônibus híbridos diesel-elétrico modernos utilizam novas tecnologias para melhorar sua eficiência, como a frenagem regenerativa, que converte a energia cinética do veículo em energia elétrica que carrega a bateria, ao invés de ser dissipada como energia térmica, como ocorre quando o freio é utilizado.

Em geral, os veículos híbridos elétricos podem ser classificados de acordo com a forma como a energia é fornecida à unidade de tração: em paralelo ou em série. Em híbridos paralelos, tanto o motor a combustão interna quanto o motor elétrico estão ligados à transmissão mecânica

e podem transmitir, simultaneamente, energia para mover as rodas, o que geralmente ocorre por meio de uma transmissão convencional. Nos híbridos em série, apenas o motor elétrico impulsiona o veículo, o motor a combustão interna funciona somente como um gerador para alimentar o motor elétrico ou para recarregar as baterias. Híbridos em série costumam ter motores a combustão menores e o pacote de baterias maior do que os híbridos em paralelo. Já os híbridos paralelos possuem motores menores em comparação aos motores dos veículos convencionais equivalentes.

Os ônibus híbridos não exigem maiores investimentos em infraestrutura, apresentam um consumo de combustível menor e consequentemente reduzem as emissões de CO₂, óxidos de nitrogênio e material particulado.

Figura 3 – Ônibus Híbrido.

Os ônibus elétricos são alimentados por eletricidade e impulsionados por motores elétricos que respondem a sistemas controladores da energia enviada aos motores. Esses ônibus podem funcionar com formas diferentes de fontes de energia: conectados permanentemente à eletricidade, por meio de fios elétricos (Trólebus); temporariamente coletando energia elétrica a

partir de uma estrutura aérea de carga; complexos sistemas sem fio; ou ainda utilizando baterias que precisam ser conectadas a uma fonte de eletricidade fixa e recarregadas. Essas recargas podem ser de várias horas ininterruptas ou em pequenos períodos durante o dia, alguns segundos (ultra capacitores, com baixa autonomia) ou minutos (baterias, com autonomia entre 30 e 300 km).

Os veículos a bateria são movidos pela energia química armazenada nos conjuntos de baterias recarregáveis e não possuem motor de combustão interna. Estes Veículos Elétricos à Bateria (VEB) ou ônibus elétricos são dependentes de uma estação de recarga para que a bateria possa ser plugada. A melhor eficiência do motor é obtida com o uso do motor elétrico incorporado ao cubo da roda, conferindo uma economia adicional ao eliminar a necessidade da transmissão diferencial e das respectivas peças mecânicas. Isto reduz tanto o peso total do ônibus quanto as perdas resultantes do atrito.

Ônibus elétricos não possuem emissões de escapamento e as emissões provenientes de sua cadeia produtiva podem chegar próximas a zero, se a geração de eletricidade para carregá-los utilizar fontes de baixo carbono, como hidroelétricas, solares e eólicas.

Dependendo da tecnologia escolhida, uma frota de ônibus elétricos pode requerer instalações de sistemas de cabos elétricos ao longo das ruas (trólebus), estações de carregamento nos terminais de ônibus, uma combinação entre sistemas de carga rápida e lenta (durante a noite) ou múltiplas recargas por dia diretamente nos pontos de ônibus. Em qualquer destes casos, algumas alterações devem ser realizadas nas garagens dos operadores.

Os resultados do programa mostraram melhor desempenho dos ônibus híbridos e elétricos quando comparados aos ônibus a diesel convencionais em relação às emissões provenientes do escapamento e a eficiência energética. Na América Latina, a adoção de novas tecnologias de baixo carbono está sujeita aos diversos cenários políticos relacionados à regulamentação e sistemas fiscais.

Por exemplo, os subsídios atuais dados ao diesel, que direcionam os investimentos para tecnologias a diesel convencional e as barreiras à importação de novas tecnologias, na forma de impostos que favorecem a continuidade da produção local dos ônibus a diesel.

Potencialmente, as maiores vantagens destas tecnologias são os benefícios sociais, ao meio ambiente e a saúde. Adicionalmente, a adoção de veículos elétricos em larga escala, ajuda no desenvolvimento de mercados para os ônibus de baixo carbono e aumenta a estabilidade operacional, diminuindo a incerteza dos preços, já que os custos da energia elétrica são mais previsíveis do que os de qualquer combustível líquido.

No próximo capítulo será elaborado um estudo das mudanças na frota atual das cidades do Rio de Janeiro, São Paulo e Belo Horizonte e os impactos gerados com isso.

6. Implementando os conceitos apresentados nas cidades do Rio de Janeiro, São Paulo e Belo Horizonte.

Neste tópico será abordada a poluição gerada pelos veículos nas três grandes cidades e também maneiras de tentar diminuir esses valores. O estudo será dividido em quatro etapas.

Primeiramente se apresentará a frota veicular de cada uma das cidades e se estudará a quantidade de poluição gerada em termos de HC, CO, NOx, PM e também CO₂. A partir desses valores se chegará ao valor mais aproximado possível de poluentes gerados por carros e ônibus para então se calcular a poluição associada por indivíduo durante seu trajeto diário, nas três capitais.

Em seguida serão criados três cenários onde esses valores serão modificados na tentativa de melhorar a qualidade do ar.

No primeiro cenário serão mantidos os combustíveis presentes nos veículos, apenas implementando uma mudança no meio de transporte da população, ou seja, se diminuirá a quantidade de pessoas em veículos particulares e será aumentada a quantidade de pessoas utilizando transporte público (ônibus).

No segundo cenário se mantém a quantidade da frota de veículos particulares e públicos, porém se introduz os combustíveis alternativos nos ônibus e então se analisa a poluição.

Finalmente, no último cenário se mantem a quantidade da frota como no anterior, entretanto serão alterados os combustíveis utilizados nos veículos particulares e assim serão analisados os benefícios gerados com essa mudança.

6.1.1 Cenário Atual nas Capitais RJ, SP e BH.

Para melhor entender a poluição produzida nas grandes cidades, primeiro precisa-se conhecer a quantidade de veículos presente nelas. Na tabela 6, retirada do DENATRAN, se encontram as frotas veiculares nas três cidades estudadas.

Tabela 6 - Frota de veículos, por tipo, segundo os Municípios da Federação - MAR/2016

MUNICIPIO	BELO HORIZONTE	RIO DE JANEIRO	SAO PAULO
TOTAL	1,714,609	2,692,218	7,665,349
AUTOMOVEL	1,170,639	1,957,709	5,364,197
BONDE	0	0	8
CAMINHAO	35570	43014	125388
CAMINHAO TRATOR	4385	4019	23640
CAMINHONETE	134745	121570	450258
CAMIONETA	80972	144226	409807
CHASSI PLATAF	10	41	196
CICLOMOTOR	855	7428	3270
MICRO-ONIBUS	6,255	18,311	37,693
MOTOCICLETA	211719	281562	875333
MOTONETA	17246	41446	140939
ONIBUS	8,809	18,286	43,380
QUADRICICLO	1	7	21
REBOQUE	18332	15082	47647
SEMI-REBOQUE	4319	5543	36929
SIDE-CAR	21	32	90
OUTROS	248	202	584
TRATOR ESTEI	13	0	4
TRATOR RODAS	289	298	3115
TRICICLO	427	662	969
UTILITARIO	19754	32780	101881

Em seguida, são apresentados três gráficos para melhor analisar o cenário.

Figura 4 - Frota RJ.

Figura 5 - Frota SP.

Figura 6 - Frota BH.

Facilmente percebe-se que a quantidade de automóveis é muito maior que qualquer outro tipo da frota, e que isto deve ser mudado.

Diante desse número alarmante, calculam-se quantas gramas de poluente são emitidos por carro e então se compara com a quantidade emitida por ônibus. Para isso serão realizados alguns cálculos que vão ser explicados a seguir.

Para realizar o cálculo da poluição veicular, primeiro deve-se entender quais são os principais combustíveis utilizados em cada cidade estudada.

Novamente, através do site do DENATRAN, se conseguem tais informações que são listadas abaixo, onde os principais combustíveis utilizados estão destacados em amarelo.

Tabela 7 - Porcentagem de Combustíveis nos Veículos RJ.

Porcentagem de Combustíveis nos Veículos RJ	
GASOLINA	38.6557
ALCOOL/GASOLINA	32.3182
GASOLINA/GAS NATURAL VEICULAR	10.6390
GASOLINA/ALCOOL/GAS NATURAL	6.7807
ALCOOL	5.1895
DIESEL	4.6492
Sem Informação	0.9143
ALCOOL/GAS NATURAL VEICULAR	0.8380
GAS METANO	0.0074
GASOLINA/ELETRICO	0.0048
ELETRICO/FONTE INTERNA	0.0012
GASOGENIO	0.0009
ELETRICO/FONTE EXTERNA	0.0004
GASOL/GAS NATURAL COMBUSTIVEL	0.0004
GAS NATURAL VEICULAR	0.0001
DIESEL/GAS NATURAL VEICULAR	0.0001

Tabela 8 - Porcentagem de Combustíveis nos Veículos SP.

Porcentagem de Combustíveis nos Veículos SP	
GASOLINA	50.75149
ALCOOL/GASOLINA	34.81999
ALCOOL	6.47625
DIESEL	4.83272
Sem Informação	1.50078
GASOLINA/GAS NATURAL VEICULAR	1.15777
GASOLINA/ALCOOL/GAS NATURAL	0.29019
ALCOOL/GAS NATURAL VEICULAR	0.07544
GASOL/GAS NATURAL COMBUSTIVEL	0.04130
GAS METANO	0.02888
ELETRICO/FONTE EXTERNA	0.00847
ALCOOL/GAS NATURAL COMBUSTIVEL	0.00684
GASOLINA/ELETRICO	0.00617
ELETRICO/FONTE INTERNA	0.00295
GASOGENIO	0.00040
GAS NATURAL VEICULAR	0.00026
DIESEL/GAS NATURAL COMBUSTIVEL	0.00007
DIESEL/GAS NATURAL VEICULAR	0.00004

Tabela 9 - Porcentagem de Combustíveis nos Veículos BH.

Porcentagem de Combustíveis nos Veículos BH	
ALCOOL/GASOLINA	51.7851
GASOLINA	36.7879
DIESEL	5.8552
ALCOOL	3.1866
Sem Informação	1.7241
GASOLINA/GAS NATURAL VEICULAR	0.3976
GASOLINA/ALCOOL/GAS NATURAL	0.2090
ALCOOL/GAS NATURAL VEICULAR	0.0435
GASOLINA/ELETRICO	0.0044
ALCOOL/GAS NATURAL COMBUSTIVEL	0.0036
ELETRICO/FONTE INTERNA	0.0012
ELETRICO/FONTE EXTERNA	0.0006
GASOL/GAS NATURAL COMBUSTIVEL	0.0004
GAS NATURAL VEICULAR	0.0002
GASOGENIO	0.0002
GAS METANO	0.0001
VIDE/CAMPO/OBSERVACAO	0.0001

Tais quantidades percentuais fazem sentido quando comparados com o custo do km produzido por cada combustível em cada cidade, como percebemos na tabela 10 (valores retirados da ANP).

Tabela 10 - Preço por km em cada cidade.

Combustível	Consumo (Km / l) ou (Km / m3) ou (km / kWh)	RJ		SP		BH	
		Preço Médio ao Consumidor R\$/l ou (para GNV R\$/m3) ou (R\$/kWh)	Preço por km (R\$)	Preço Médio ao Consumidor R\$/l (para GNV R\$/m3)	Preço por km (R\$)	Preço Médio ao Consumidor R\$/l (para GNV R\$/m3)	Preço por km (R\$)
Gasolina	9.4	3.924	0.42	3.463	0.37	3.578	0.38
Etanol	9.00	3.137	0.35	2.206	0.25	2.387	0.27
Diesel	10.30	3.066	0.30	2.934	0.28	2.984	0.29
Gás (GNV)	13.80	2.044	0.15	1.905	0.14	2.199	0.16
Energia Elétrica	5.63	0.580	0.10	0.237	0.04	0.510	0.09

O baixo preço do etanol em BH e SP estimula a maior utilização de veículo a álcool como substituto de gasolina. Já no RJ ocorre algo diferente, por não possuir o preço do etanol tão barato, quanto nas outras cidades, os motoristas utilizam o gás natural como principal alternativa.

Obviamente, cada combustível produz quantidades diferentes de poluentes HC, NOx, CO, PM e CO2 por km. A tabela abaixo, retirada do CETESP, mostra a quantidade de poluentes gerada por cada um.

Tabela 11 - Fator de emissão de veículos comerciais leves novos

Fator de emissão de veículos comerciais leves novos					
Frota	HC = (NMHC + CH4) (g/km)	CO (g/km)	NOx (g/km)	PM (g/km)	CO2 (g/km)
Gasolina C	0.02	0.159	0.014	0	236
Flex	0.64	0.485	0.0475	0	244
Diesel	0.027	0.07	0.28	0.016	258
GNV (gasolina convertido)	0.21	0.37	0.28	0.0017	148
Etanol	0.0238	0.5574	0.023	0	0
Gasolina / GNV/Etanol	0.21	0.37	0.28	0.0017	148

Agora que a poluição gerada por combustível por km e a porcentagem de cada combustível empregado na frota de cada cidade foi dada, pode-se finalmente calcular a poluição por km por carro através das seguintes processo:

- I. Multiplica-se a porcentagem de combustível das frotas de cada cidade pela poluição em gramas de cada combustível;
- II. Em seguida somam-se as poluições de cada tipo.

$$HC = \% Gasolina \times HC_{gasol} \cdot \frac{(g)}{km} + \% Etanol \times HC_{etan} \cdot \frac{(g)}{km} + \% Diesel \\ \times HC_{diesel} \cdot \frac{(g)}{km} + \% GNV \times HC_{gnv} \cdot \frac{(g)}{km} + \% Flex \times HC_{flex} \cdot \frac{(g)}{km}$$

$$CO = \% Gasolina \times CO_{gasol} \cdot \frac{(g)}{km} + \% Etanol \times CO_{etan} \cdot \frac{(g)}{km} + \% Diesel \\ \times CO_{diesel} \cdot \frac{(g)}{km} + \% GNV \times CO_{gnv} \cdot \frac{(g)}{km} + \% Flex \times CO_{flex} \cdot \frac{(g)}{km}$$

$$NOx = \% Gasolina \times NOx_{gasol} \cdot \frac{(g)}{km} + \% Etanol \times NOx_{etan} \cdot \frac{(g)}{km} + \% Diesel \\ \times NOx_{diesel} \cdot \frac{(g)}{km} + \% GNV \times NOx_{gnv} \cdot \frac{(g)}{km} + \% Flex \times NOx_{flex} \cdot \frac{(g)}{km}$$

$$PM = \% Gasolina \times PM_{gasol} \cdot \frac{(g)}{km} + \% Etanol \times PM_{etan} \cdot \frac{(g)}{km} + \% Diesel \\ \times PM_{diesel} \cdot \frac{(g)}{km} + \% GNV \times PM_{gnv} \cdot \frac{(g)}{km} + \% Flex \times PM_{flex} \cdot \frac{(g)}{km}$$

$$CO2 = \% Gasolina \times CO2_{gasol} \cdot \frac{(g)}{km} + \% Etanol \times CO2_{etan} \cdot \frac{(g)}{km} + \% Diesel \\ \times CO2_{diesel} \cdot \frac{(g)}{km} + \% GNV \times CO2_{gnv} \cdot \frac{(g)}{km} + \% Flex \times CO2_{flex} \cdot \frac{(g)}{km}$$

Finalmente:

$$Poluição \text{ por } km /_{veiculo} = \sum Poluição = HC + CO + NOx + PM + CO2$$

Agora que a poluição por km por carro foi calculada, algumas aproximações serão feitas para se obter a poluição por passageiro por quilômetro e a poluição por passageiro por dia.

Segundo um estudo realizado pela FETRANPOR, existe uma média de aproximadamente 1,8 passageiros por carro e através deste valor se encontrará a poluição associada a uma pessoa por km através da formula a seguir:

$$\text{Poluição por km/pessoa} = \text{Poluição por km/veiculo} \div \text{Qtd. Media pessoas/veiculo}$$

Por meio de outro estudo realizado estimou-se a média de quanto um carro se locomove por ano, aproximadamente 15,000 km e então se aproxima à distância diária percorrida por um carro.

$$\text{Distância media carro/dia} = \text{Distância media carro/ano} \div 360$$

Tabela 12 – Distancia média de veiculo.

Media de distância Carro se locomove	
Km / ano	15.000
Km /dia	41,66

Assim, a partir das distancias diárias percorridas por carro e a poluição associada a individuo por km encontra-se ao valor de poluição diária individual quando utilizado o veículo particular.

$$\text{Poluição por pessoa/dia} = \text{Poluição por km/pessoa} \times \text{Distância media carro/dia}$$

Afim de encontrar em última instância a poluição gerada na cidade, pelos habitantes que utilizam os veículos particulares como forma de transporte, são usados os valores baseados na população economicamente ativa (PEA), aquela que utiliza os meios de transporte para ir e voltar do seu trabalho.

$$PEA = \text{População residente da cidade} \times \%PEA$$

Tabela 13 - População Total / Porcentagem e Valor da PEA

População residente RJ - 2015	6,320,446	População economicamente ativa RJ - 2016	51.70%	3,267,671
População residente SP - 2015	11,253,503	População economicamente ativa SP - 2015	56.40%	6,346,976
População residente BH - 2015	2,375,151	População economicamente ativa BH - 2015	52.80%	1,254,080

Um estudo realizado pelo CNI trouxe a porcentagem da população que utiliza cada meio de transporte para se locomover, e baseando se nesses valores se consegue calcular o número absoluto de pessoas que utilizam cada veículo por dia. A equação abaixo explicita os resultados.

Serão utilizados apenas os valores relativos a ônibus público e veículos próprios neste estudo comparativo.

Tabela 14 - Porcentagem dos Meio de Locomoção.

Meios de locomoção da População (CNI)	
Opção:	Atual
Ônibus público	24%
A pé	22%
Veículos próprio	19%
Motocicletas	10%
Vans/ônibus fretados	9%
Bicicletas	7%
Outros	9%
Total	100%

$$Qtd.pessoas \text{ por veículo} = PEA \times \% \text{ meios de transporte}$$

Tabela 15 - Quantidade de Pessoas (PEA) por Meio de Locomoção.

Quantidade de Pessoas (PEA) por Meios de locomoção:	RJ	BH	SP
Ônibus público	784,240.94	300,979.13	1,523,274.17
Veículos próprio	620,857.41	238,275.15	1,205,925.38

Assim, finalmente, o valor que é buscado é alcançado, a poluição gerada por carro pela população economicamente ativa por dia e por cidade.

$$Carro/PEA = \text{Poluição por pessoa} / \text{dia} \times Qtd.pessoas \text{ de carro}$$

O estudo nesse momento visa comparar a poluição gerada por carros e por ônibus quando utilizados por indivíduos. Com isso, se repetem os passos e contas anteriores, substituindo nas equações o termo “veículo” por “ônibus”, a fim de se encontrar a poluição gerada por ônibus pela população economicamente ativa por dia e por cidade.

$$Onibus/_{PEA} = \text{Poluição por pessoa} /_{dia} \times Qtd. pessoas de onibus$$

Os dados de valores de combustíveis e poluentes dos ônibus são apresentados nas tabelas abaixo.

Tabela 16 - Emissão do ônibus por km.

Fator de emissão de veículos pesados com motores do ciclo Diesel em g/km						
Frota	Tipo	HC(g/km) (NMHC + CH ₄)	CO (g/km)	NOx (g/km)	PM	CO ₂
Ônibus	Urbanos	0.015	0.54	2.69	0.021	1280

Tais valores foram retirados diretamente da CETESP, com exceção da produção de CO₂ por km, que foi calculada.

Os veículos movidos a diesel emitem mais CO₂ por unidade de volume ou peso de combustível em relação aos demais modais motorizados. Utilizou-se neste trabalho um fator de emissão médio de 3,2 kg de CO₂ /l de diesel.

Tabela 17 - Produção de CO₂ (g/l) por Ônibus.

Tipo	Autonomia (Km /l)	CO ₂ (Kg/l)	CO ₂ (g/l)
Urbanos	2.5	3.2	1280

Uma das principais diferenças no cálculo para ônibus é o do número de passageiros por veículo. Este número baseia-se na quantidade total de passageiros por km, na quilometragem média das viagens e então no valor desejado de passageiros por trajeto.

$$Passageiros\ totais /_{km} = Passageiros\ Pagantes + Passageiros\ Gratuitos /_{km\ totais}$$

$$Quilometragem\ media /_{viagem} = Quilometros\ totais \div numero\ de\ viagens$$

$$Passageiros\ totais /_{viagem} = Passageiros\ totais /_{km} \times km\ media /_{viagem}$$

Assim, baseado em valores retirados do FETRANSPOR, SPTrans e ANTP encontram-se os valores abaixo:

Tabela 18 - Passageiros (em média) por Viagem em cada cidade.

Medidas / Cidade	RJ	SP	BH
Passageiros totais por km	1. 83	2.84	2.42
Km media por Viagem	37.92	15.78	23.10
Passageiros totais por viagem	70	44.86	56

Baseado nesses valores e equações referenciados a cima, finalmente chega-se aos valores atuais de poluição por individuo no ônibus e no carro, que servirão de referência para comparações e melhorias nos próximos capítulos desse trabalho.

As tabelas a seguir trazem os resultados buscados.

Tabela 19- Poluição por km no RJ.

Cidade:		RJ				
Poluição (g / km)		HC	CO	NOx	PM	CO2
Poluição por km	Carro	0.25	0.31	0.08	0.00104	207.86
	Pessoa / Carro	0.14	0.17	0.05	0.00	115.48
	Ônibus	0.015	0.54	2.69	0.021	1280
	Pessoa / Ônibus	0.0002	0.0077	0.0386	0.0003	18.4125
Poluição por pessoa por dia	Pessoa / Carro	5.87	7.29	1.94	0.02	4,811.57
	Pessoa / Ônibus	0.0089	0.3236	1.6122	0.0125	767.1885
	Carros PEA	3,645,230	4,524,779	1,203,620	14,946	2,987,300,814
	Ônibus PEA	7,050	253,825	1,264,427	9,871	601,660,683

Tabela 20 - Poluição total associada a PEA no RJ.

		RJ				
		HC	CO	NOx	PM	CO2
Poluição por dia na Cidade associada a PEA	Carros PEA	3,645,230	4,524,779	1,203,620	14,946	2,987,300,814
	Ônibus PEA	7,050	253,825	1,264,427	9,871	601,660,683
	Total	3,652,281	4,778,605	2,468,048	24,817	3,588,961,497

Tabela 21 - Poluição por km em BH.

Cidade:		BH				
Poluição (g / km)		HC	CO	NOx	PM	CO2
Poluição por km	Carro	0.34	0.33	0.05	0.0009	228.28
	Pessoa / Carro	0.19	0.18	0.03	0.00	126.82
	Ônibus	0.015	0.54	2.69	0.021	1280
	Pessoa / Ônibus	0.0002	0.009	0.048	0.0003	22.897
Poluição por pessoa por dia	Pessoa / Carro	7.90	7.67	1.09	0.02	5,284

Tabela 22 - Poluição total associada a PEA em BH.

		BH				
		HC	CO	NOx	PM	CO2
Poluição por dia na Cidade associada a PEA	Carros PEA	1,881,500	1,828,494	258,548	5,167	1,259,116,317
	Ônibus PEA	3,365	121,141	603,462	4,711	287,149,306
	Total	1,884,865	1,949,635	862,010	9,878	1,546,265,623

Tabela 23 - Poluição por km em SP.

Cidade:		SP				
Poluição (g / km)		HC	CO	NOx	PM	CO2
Poluição por km	Carro	0.24	0.29	0.04	0.0007	217.20
	Pessoa / Carro	0.13	0.16	0.02	0.00	120.67
	Ônibus	0.015	0.54	2.69	0.021	1280
	Pessoa / Ônibus	0.0003	0.0120	0.0599	0.0004	28.5295
Poluição por pessoa por dia	Pessoa / Carro	5.46	6.69	0.90	0.02	5,027
	Pessoa / Ônibus	0.01393	0.5014	2.49819	0.01950	1,188

Tabela 24 - Poluição total associada a PEA em SP.

		SP				
		HC	CO	NOx	PM	CO2
Poluição por dia na Cidade associada a PEA	Carros PEA	6,583,582	8,068,905	1,079,355	21,584	6,063,200,181
	Ônibus PEA	21,219	763,915	3,805,432	29,707	1,810,763,184
	Total	6,604,802	8,832,821	4,884,787	51,292	7,873,963,365

Para fins de comparação, gráfico são plotados a seguir comparando a poluição por pessoa que utiliza carro e a poluição por pessoa que utiliza ônibus diariamente nas três cidades estudadas.

Figura 7 - Poluição associada a uma pessoa em diferentes meios de transporte: Carro e Ônibus (g/km) no RJ.

Figura 8 - Poluição associada a uma pessoa em diferentes meios de transporte: Carro e Ônibus (g/km) em BH.

Figura 9 - Poluição associada a uma pessoa em diferentes meios de transporte: Carro e Ônibus (g/km) em SP.

Figura 10 - CO2 associado a uma pessoa em diferentes meios de transporte: Carro e Ônibus (g/km).

6.1.2 Cenário alternativo, migrando um percentual de pessoas dos carros para o ônibus

Nesta etapa serão criados cenários alternativos visando melhorar os índices de poluição nas cidades estudadas. O primeiro cenário alternativo será baseado na mudança do número de pessoas que utiliza o carro diariamente, por meios de transporte coletivos.

Na próxima tabela serão aumentadas a quantidade de pessoas usando ônibus em 10% e diminuídas em 10% a porcentagem absoluta de pessoas nos carros, obtendo-se os seguintes resultados.

Tabela 25 - Poluição por dia com 10% alterado no RJ.

		RJ				
		HC	CO	NOx	PM	CO2
Poluição por dia na Cidade associada a PEA	Carros PEA	1.726.688	2.143.316	570.136	7.079	1.415.037.228
	Ônibus PEA	9.988	359.586	1.791.272	13.983	852.352.634
	Total	1.736.676	2.502.902	2.361.408	21.063	2.267.389.862

Tabela 26 - Poluição por dia com 10% alterado no BH.

		BH				
		HC	CO	NOx	PM	CO2
Poluição por dia na Cidade associada a PEA	Carros PEA	891.237	866.128	122.470	2.447	596.423.518
	Ônibus PEA	4.767	171.616	854.904	6.673	406.794.850
	Total	896.004	1.037.745	977.375	9.121	1.003.218.369

Tabela 27 - Poluição por dia com 10% alterado no SP.

		SP				
		HC	CO	NOx	PM	CO2
Poluição por dia na Cidade associada a PEA	Carros PEA	3.118.538	3.822.113	511.273	10.224	2.872.042.191
	Ônibus PEA	30.061	1.082.213	5.391.028	42.086	2.565.247.844
	Total	3.148.600	4.904.327	5.902.302	52.310	5.437.290.035

Depois aumenta-se a quantidade de pessoas usando ônibus em 15%, diminuindo em 15% a porcentagem absoluta de pessoas nos carros, obtendo-se os seguintes resultados.

Tabela 28 - Poluição por dia com 15% alterado no RJ.

		RJ				
		HC	CO	NOx	PM	CO2
Poluição por dia na Cidade associada a PEA	Carros PEA	767.416	952.585	253.393	3.146	628.905.434
	Ônibus PEA	11.457	412.466	2.054.694	16.040	977.698.610
	Total	778.874	1.365.051	2.308.088	19.187	1.606.604.044

Tabela 29 - Poluição por dia com 15% alterado no BH.

		BH				
		HC	CO	NOx	PM	CO2
Poluição por dia na Cidade associada a PEA	Carros PEA	396.105	384.946	54.431	1.087	265.077.119
	Ônibus PEA	5.468	196.854	980.626	7.655	466.617.622
	Total	401.573	581.800	1.035.057	8.743	731.694.742

Tabela 30 - Poluição por dia com 15% alterado no SP.

		SP				
		HC	CO	NOx	PM	CO2
Poluição por dia na Cidade associada a PEA	Carros PEA	1.386.017	1.698.716	227.232	4.544	1.276.463.196
	Ônibus PEA	34.482	1.241.363	6.183.827	48.275	2.942.490.174
	Total	1.420.499	2.940.080	6.411.059	52.819	4.218.953.370

São plotados a seguir os três cenários em um único gráfico quantitativo, tomando como exemplo a cidade do Rio de Janeiro.

Figura 11 - Poluição total associada a PEA por dia com três incrementos na quantidade de ônibus sobre carro no RJ.

Figura 12 - CO2 total associado a PEA por dia com três incremento na quantidade de ônibus sobre carro no RJ.

6.1.3 Cenário alternativo, mudando os combustíveis nos ônibus

Nesta etapa será criado um outro cenário alternativo, visando melhorar os índices de poluição nas cidades estudadas. O segundo cenário alternativo será baseado na alteração do combustível utilizado nos meios de transporte coletivos.

Os ônibus das cidades são quase que unicamente movidos a combustível diesel. Adiante, será demonstrada a quantidade de poluente que seriam reduzidas, caso fossem empregados ônibus com combustíveis alternativos, como elétricos, híbridos dentre de outros.

Primeiro, criando-se a tabela a seguir, se consegue um comparativo percentual de poluentes produzidos por cada veículo alternativo quando comparados com o veículo a diesel convencional (tais dados foram retirados do Institute of Transportation).

Tabela 31 - Percentual de poluição comparativo entre alguns combustíveis com o combustível diesel.

Comparativo (%) Ônibus Diesel x outros					
Bus	PM (g/km)	NOx (g/km)	HC (g/Km)	CO (g/km)	CO2 (g/km)
Elétrico Puro	0	0	0	0	0,1764
Híbrido elétrico	0,1825	0,5517	0	0	0,6470
CNG	0,0158	0,4629	7,5923	0,0711	0,8235
Metanol	0,0555	0,2733	1,0076	0,5116	1,0588
Etanol	0,2777	0,7062	5,8384	2,4035	0
Célula	0	0,00191	0,2461	0,6072	0,1176
Diesel	1	1	1	1	1

Na tabela 31 foram apresentados alguns dos combustíveis alternativos existentes e então calculada a proporção de poluentes em relação ao diesel, considerando a poluição do diesel como o valor base para os demais.

Uma nova frota de ônibus é apresentada na tabela 32 a seguir. Ao serem inseridos diferentes valores às porcentagens de veículos híbridos, elétricos e etanol pode-se analisar os novos valores de poluição gerados e então compará-los com o atual.

Tabela 32- Frota de ônibus no novo cenário

	RJ	BH	SP	RJ	BH	SP
Bus	Porcentagem de Cada Tipo de Frota			Quantidade de Cada Tipo de Frota		
Elétrico Puro	20%	20%	20%	1802	659	2777
Híbrido elétrico	30%	30%	30%	2702	989	4165
CNG	0%	0%	0%	0	0	0
Metanol	0%	0%	0%	0	0	0
Etanol	10%	10%	10%	901	330	1388
Célula	0%	0%	0%	0	0	0
Diesel	40%	40%	40%	3603	1318	5553

As tabelas a seguir quantificam os resultados desse estudo sobre os poluentes.

Tabela 33 - Poluição por dia com nova frota de ônibus no RJ

		RJ				
		HC	CO	NOx	PM	CO2
Poluição por dia na Cidade associada a PEA	Carros PEA	3,645,230	4,524,779	1,203,620	14,946	2,987,300,814
	Ônibus PEA	6,936	162,537	804,356	4,763	378,692,312
	Total	3,652,167	4,687,317	2,007,977	19,709	3,365,993,126

Tabela 34 - Poluição por dia com nova frota de ônibus em BH

		BH				
		HC	CO	NOx	PM	CO2
Poluição por dia na Cidade associada a PEA	Carros PEA	1,881,500	1,828,494	258,548	5,167	1,259,116,317
	Ônibus PEA	6,936	77,572	383,888	2,273	180,735,151
	Total	1,888,437	1,906,067	642,436	7,440	1,439,851,469

Tabela 35 - Poluição por dia com nova frota de ônibus em SP

		SP				
		HC	CO	NOx	PM	CO2
Poluição por dia na Cidade associada a PEA	Carros PEA	6,583,582	8,068,905	1,079,355	21,584	6,063,200,181
	Ônibus PEA	20,877	489,174	2,420,799	14,335	1,139,715,651
	Total	6,604,459	8,558,079	3,500,154	35,920	7,202,915,832

A seguir foram plotados alguns gráficos comparativos da poluição gerada, escolhendo como exemplo a cidade do Rio de Janeiro.

Neles são analisadas as poluições no cenário atual e no cenário alternativo criado, além de uma comparação com a proporção de poluição total emitida nos dois cenários.

Figura 13 – Poluição gerada apenas por ônibus pela PEA por dia comparando a frota atual de ônibus e a frota alternativa composta por 20% elétrico, 30% híbrido, 10% etanol e 40% diesel no RJ.

Figura 14 – CO2 gerado apenas por ônibus pela PEA por dia comparando a frota atual de ônibus e a frota alternativa composta por 20% elétrico, 30% híbrido, 10% etanol e 40% diesel no RJ.

Figura 15 - Poluição total associada a PEA por dia comparando a frota atual de ônibus e a frota alternativa composta por 20% elétrico, 30% híbrido, 10% etanol e 40% diesel no RJ.

Figura 16- CO2 total associado a PEA por dia comparando a frota atual de ônibus e a frota alternativa composta por 20% elétrico, 30% híbrido, 10% etanol e 40% diesel no RJ.

6.1.4 Cenário alternativo, mudando os combustíveis nos veículos particulares

Nesta última etapa foi criado um terceiro cenário alternativo, visando melhorar os índices de poluição de CO₂. Este cenário alternativo será baseado apenas na alteração do combustível utilizado nos transportes privados.

Os carros são, quase que unicamente, movidos a combustíveis fosseis como apresentado anteriormente. Adiante, será demonstrada a quantidade de CO₂ que seriam reduzidas, caso fossem empregados combustíveis elétricos e híbridos nos carros.

É importante lembrar que a matriz elétrica brasileira emite CO₂ também, mesmo que seja em sua maior parte composta por hidrelétricas. Um estudo realizado pelo IPEA calculou que são gerados 87g de CO₂ por kWh.

Assim o veículo elétrico produz por quilômetro: 15.467 gramas de CO₂, ou seja aproximadamente 7% do valor da convencional dos carros.

A seguir foram plotados alguns gráficos comparativos da poluição gerada, escolhendo como exemplo a cidade do Rio de Janeiro.

Neles são analisadas as poluições no cenário atual e no cenário alternativo criado, além de uma comparação com a proporção de poluição total emitida nos dois cenários.

Tabela 36 - Comparação com veículos elétricos na emissão de CO2

Cidade:		RJ		BH		SP	
		Cenário Atual da Frota	Cenário da Frota 3	Cenário Atual da Frota	Cenário da Frota 3	Cenário Atual da Frota	Cenário da Frota 3
Poluição (g / km)		CO2					
Poluição por km	Carro	207.86	15.47	228.28	16.99	217.20	16.16
	Pessoa / Carro	115.48	8.59	126.82	9.44	120.67	8.98
	Ônibus	1280	1280	1280	1280	1280	1280
	Pessoa / Ônibus	18.41	18.41	22.89	22.89	28.52	28.52
Poluição associada a pessoa por dia	Pessoa / Carro	4,811	358	5,284	393	5,027	374
	Pessoa / Ônibus	767	767	954	954	1188	1188
Poluição associada a pessoa por dia total		5,578	1,125	6,238	1,347	6,216	1,562

Figura 17 - CO2 associado a PEA por carro por dia comparando com nova frota de carros totalmente elétricos no RJ.

Figura 18 - CO2 associado total a PEA por dia hoje comparando com total gerado com nova frota de carros totalmente elétricos no RJ

7. Conclusão

Através desse estudo, constata-se, mais uma vez, que o sistema atual de transporte é insustentável e que deve ser alterado pelo bem do planeta.

Fica claro que, quando empregada uma nova frota de ônibus, movida por combustíveis alternativos, consegue-se uma melhoria significativa na quantidade do ar. Porém, quando se comparam esses ganhos aos obtidos na substituição de veículos particulares por transporte público, os ganhos são muito maiores.

Outro cenário criado neste estudo foi obtido através da modificação dos veículos particulares atuais por frotas eco eficientes. O resultado demonstrou também reduções significativas nas emissões de CO₂, nas cidades analisadas.

Tudo isso confirma que a solução para os problemas urbanos de congestionamento e poluição passa pelo emprego de um transporte público mais eficiente, que estimule a população das grandes cidades a migrarem dos veículos particulares para os transportes de massa de boa qualidade.

8. Referências bibliográficas

ANP. SISTEMA DE LEVANTAMENTO DE PRECOS. 2016. Disponível em:
<http://www.anp.gov.br/preco/prc/resumo_por_estado_index.asp>. Acesso em: 15 maio 2016.

ANTP (Org.). Sistema de Informações da Mobilidade Urbana: Relatório Geral 2013.
Brasil

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS EMPRESAS DE TRANSPORTES URBANOS
(Org.). Desempenho e qualidade nos sistemas de onibus urbanos. 2008. Disponível em:
<<http://www.ntu.org.br/novo/upload/Publicacao/Pub635109544561475593.pdf>>. Acesso em: 01
ago. 2008.

Antti Lajunen, ENERGY CONSUMPTION AND COST-BENEFIT ANALYSIS OF
HYBRID AND ELECTRIC CITY BUSES. Finland: Elsevier, v. 38, 28 out. 2013. Páginas 1 -
15.

BRASIL. DENATRAN. (Org.). Frota Nacional. 2016. Disponível em:
<<http://www.denatran.gov.br/frota2016.htm>>. Acesso em: 01 mar. 2016.

CETESB (Org.). EMISSÕES VEICULARES: NO ESTADO DE SÃO PAULO. Sp:
Governo do Estado de São Paulo, 2013.

C40 (Org.). As tecnologias de baixo carbono podem transformar as frotas de ônibus da
América latina. América Latina: Idb, 2016.

Gwo-Hshiung Tzeng, Cheng-Wei Lin, Serafim Opricovic,, MULTI-CRITERIA ANALYSIS OF ALTERNATIVE-FUEL BUSES FOR PUBLIC TRANSPORTATION. Taiwan: Elsevier, v. 33, n. 11, 01 jul. 2005. Páginas 1373 - 1383.

IBGE. (Org.). Informações Estatísticas. 2016. Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?lang=&codmun=330455&search=rio-de-janeiro|rio-de-janeiro>>. Acesso em: 01 jun. 2016.

Morita, K., 2003. Automotive power source in 21st century. Journal of Society of Automotive Engineers of Japan 24 (1), 3–7. Lech Borowik, Artur Cywiński,

MODERNIZATION OF A TROLLEYBUS LINE SYSTEM IN TYCHY AS AN EXAMPLE OF ECO-EFFICIENT INITIATIVE TOWARDS A SUSTAINABLE TRANSPORT SYSTEM. Poland: Elsevier, v. 117, 14 dez. 2015. Páginas 188-198.

Moriarty, P., Honnery, D., 2013. Greening passenger transport: a review. J. Clean. Prod. 54, 14e22.

Putz, R., 2013. Auf dem Weg zum Elektrobus e Analyse der Lebenszykluskosten verschiedener Busantriebskonzepte (Towards electro-bus e an analysis of life cycle costs of different bus drive concepts) in German), available at: <http://www.clean-fleets.eu> (accessed 05.10.15).