

Avaliação do ciclo de vida de diferentes tecnologias de ônibus: Eficiência energética e emissões de poluentes em operação real.

Adalberto Felício Maluf Filho

Mestre em Ciências pelo Instituto de Relações Internacionais da Universidade de São Paulo (IRI-USP) e Diretor da Rede C40 Cities (Grupo das Grandes Cidade Líderes pelo Clima) em São Paulo.

Endereço: Av. Prof. Lucio Martins Rodrigues, s/n, travessas 4 e 5, Cidade Universitária, São Paulo. Email: amaluf@usp.br

RESENHA:

O presente artigo discute os resultados do programa de testes com ônibus híbridos e elétricos em quatro cidades da América Latina. O programa mediu as emissões de poluentes e a eficiência energética de diferentes tecnologias de ônibus em cada ciclo de operação. Os resultados indicam reduções de poluentes locais nos ônibus híbridos em comparação aos ônibus diesel, e de ganhos energéticos significativos dos ônibus elétricos em relação aos ônibus diesel. Com esses dados, e utilizando-se da técnica da avaliação de ciclo de vida, o artigo incorpora os resultados dos testes e compara o desempenho energético dos ônibus híbridos e elétricos em comparação aos ônibus diesel equivalentes no contexto de operação em São Paulo.

PALAVRAS-CHAVE:

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA; EMISSÃO DE POLUENTES, GASES DO EFEITO ESTUFA, ONIBUS HÍBRIDOS; ONIBUS ELÉTRICOS.

INTRODUÇÃO

Com o aumento das preocupações globais sobre o uso de energia e seus impactos nas mudanças climáticas e na sustentabilidade do ambiente urbano, muitas cidades vem buscando quantificar, com maior precisão, o uso dos recursos naturais para promover o uso mais eficiente dos recursos energéticos e financeiros (WORD BANK 2010). O transporte coletivo urbano é responsável por parcela significativa do consumo de energia nas grandes cidades (OCDE, 2011), com impactos indiretos na qualidade do ar e na qualidade de vida dos habitantes dos grandes centros urbanos.

A técnica de avaliação do ciclo de vida (ACV), em especial a abordagem consequentialista, isto é, baseada na avaliação de serviços prestados via comparação direta das diferentes opções existentes naquele mercado, pode ser de extrema importância para subsidiar o processo de tomada de decisões em relação a utilização ou expansão do material rodante nos serviço de transporte coletivo de passageiros.

Na América Latina, o setor dos transportes é o maior contribuinte para as emissões de gases do efeito estufa (GEE) e os congestionamentos estão cada vez maiores e mais frequentes na região, fruto da urbanização e acesso aos veículos privados. Nesse contexto, várias cidades da região despertaram para a importância de aprimorar seus sistemas de transporte visando promover maior inclusão social, redução nos níveis de poluentes nas cidades e disponibilizar uma opção de mobilidade eficiente e acessível a maior parte das populações urbanas.

Com o objetivo de melhorar a qualidade dos sistemas de transporte coletivo na região, quatro grandes cidades latino-americanas (São Paulo, Rio de Janeiro,

Santiago e Bogotá – todas membras da Rede C40¹) participaram do “Programa de Testes com Ônibus Híbridos e Elétricos”. O programa, financiados pelo BID (Banco Interamericano de Desenvolvimento) e pela Fundação Clinton (*Clinton Climate Initiative*), testaram 17 diferentes modelos de ônibus² urbanos para medir sua eficiência energética comparativas aos ônibus diesel similares. Além disso, foram medidos os nível de poluentes durante à operação desses ônibus em seus ciclos comerciais rotineiros em cada cidade participante. O presente artigo apresenta alguns de seus resultados, utilizando-se da ferramenta da ACV para discutir a viabilidade técnica e econômica do uso dessas novas tecnologias no contexto Brasileiro.

Uma premissa importante dos estudos de ACV se relaciona com a abrangência com que eles podem avaliar os fluxos de materiais e energia utilizados por um sistema de produtos no seu ciclo de vida completo. Embora importante, não será possível avaliar todas as fases do processo relacionado à produção dos combustíveis (ou eletricidade), dos materiais dos ônibus e desmantelamentos. Dessa maneira, depois de inventariar processos, materiais e fluxos relacionados a todo o sistema transporte coletivo urbano de passageiros, o presente artigo focou sua avaliação somente nos custos e emissões de poluentes do “tanque à roda” (Tank to Wheel), isto é, da parte operacional das diferentes tecnologias de ônibus, metodologia amplamente utilizada pela academia nesses tipos de avaliação.

O objeto do estudo foi a redução obtida de poluentes locais e globais (Monóxido de carbono - CO, Óxidos de Nitrogênio - NOx, Hidrocarbonetos totais - HC, material particulado – PM e Dióxido de Carbono - CO₂), bem como a eficiência energética de cada tecnologia em comparação ao ônibus diesel similar na operação comercial (consumo energético), conforme resultados publicados dos testes.

Dentre as tecnologias testadas, encontravam-se diferentes tipos de ônibus diesel convencional (modelo representativo de cada uma das cidade); ônibus diesel com 100% de diesel feito a partir da cana de açúcar (teste piloto em São Paulo), duas tecnologias de ônibus híbridos (em série e em paralelo) e três modelos de ônibus elétricos (trólebus, que capta energia de rede aérea, e dois modelos puramente elétricos plug-in, que captam energia da rede durante à noite).

DIAGNOSTICO

Utilizar a técnica das avaliações do ciclo de vida de produtos e serviços é comum na literatura sobre transportes. Desde ações e políticas relacionadas ao incentivo para compra de veículos novos, ou a extensão de vida útil dos veículos existentes, até mesmo ACV mais específicas sobre produtos, como baterias ou combustíveis. Esse estudo se insere nesse contexto, e pretende preencher uma lacuna acadêmica de avaliar o uso energético e a emissão de poluentes das diferentes tecnologias de ônibus urbanos em uso atualmente na America Latina.

Os sistemas de ônibus municipais e metropolitanos representam cerca de 85,91% dos deslocamentos do transporte público nas cidades com mais de 60 mil habitantes no Brasil, contra somente 13,06% dos sistemas metroviários (ANTP, 2011). Dessa maneira, uma avaliação completa do ciclo de vida da operação dos ônibus urbanos pode ser muito importante para subsidiar o poder publica na tomada de decisão sobre as tecnologias que trazem o melhor benefício ambiental e econômico para as cidades Brasileiras.

PROPOSICOES

¹ C40 Cities (*Climate Leadership Group*) é uma rede de grandes cidades comprometidas com a implementação de programas que visem a redução de gases do efeito estufa. (www.c40cities.org).

² Os fornecedores participantes dos testes foram Volvo, Eletra/Mercedes, Youngman, Hankuk, e BYD.

O programa de testes com ônibus híbridos e elétricos coordenados pela C40 fizeram seis (6) campanhas nas quatro cidades participantes dos testes (São Paulo, Rio de Janeiro, Santiago e Bogotá) num período de quase 18 meses. Nessas campanhas foram testados 17 diferentes modelos e tecnologias de ônibus urbanos divididos nas quatro cidades. A metodologia utilizada nos testes, chamada de VSP (*Vehycle Specific Power*) mede a energia necessária para superar a resistência aerodinâmica (e do piso), numa equação de velocidade, aceleração e potência instantânea, em função da unidade de massa dos veículos. Nos testes, cada ônibus rodou no mínimo 750kms de operação comercial, simulando carga máxima (com bombonas de água equivalentes ao peso dos passageiros embarcados) relacionando emissão de poluentes e consumo de combustível, de cada veículo, segundo a segunda, em função da altitude e fluxo dos gases do escapamento. Dessa maneira, diferentes dados eram gravados, em ciclos de 30 minutos, e depois comparavam-se cada tecnologia com o ônibus diesel similar que também rodava na mesma linha, em função de um modelo empírico comparando ambos os resultados.

Os ônibus convencionais, movidos por motor a combustão interno diesel, que foram testados variavam das tecnologias Euro 2 e Euro 3 em Bogotá, Euro 3 no Brasil, e Euro 3 com e sem filtros e sistemas de catalisadores em Santiago. Esses modelos são representativos da maior parte das frotas nessas cidades. Já os ônibus híbridos testados são divididos em duas tecnologias, paralela e em série, sendo que os híbridos paralelo foram testados nas quatro cidades participantes, enquanto os híbridos em série foram testados somente nas cidades Brasileiras.

Os ônibus híbridos combinam um motor a combustão interna convencional diesel com um sistema de propulsão elétrico, por isso são chamados de ônibus híbridos. A propulsão elétrica visa conseguir maior economia de combustível uma vez que os motores elétricos são mais eficientes do que os motores a combustão interna. Os ônibus híbridos e também os elétricos puro utilizam-se de algumas importantes tecnologias, como a frenagem regenerativa, que converte a energia cinética do veículo em energia elétrica para carregar a bateria, o que aumenta a eficiência do conjunto, já que não dissipa parte da energia em calor quando o freio é utilizado.

Os ônibus híbridos são classificados em dois grupos tecnológicos: em paralelo ou em série. Nos híbridos paralelos, tanto o motor elétrico quanto o motor a combustão interna estão ligados à transmissão mecânica do veículo. Nessa tecnologia, o motor elétrico geralmente transmite energia para mover as rodas nas baixas velocidades, e o motor a combustão entra quando o veículo adquire uma velocidade operacional maior (entre 20 a 30km/hora). Já nos híbridos em série, somente o motor elétrico impulsiona o veículo. Nessa tecnologia, o motor a combustão serve como um mini gerador para recarregar as baterias e impulsionar o motor elétrico, que por sua vez, tracionam as rodas do veículo.

Já os ônibus elétricos, por sua vez, tem seu sistema de tração impulsionados exclusivamente por motores elétricos ligados aos sistemas de armazenamento de energia. No caso dos trólebus, que captam energia da rede aérea, ou dos ônibus elétricos com ultra-capacitores, que se conectam durante alguns segundos a uma rede externa durante a parada dos ônibus, a fonte de energia é externa e retirada durante a operação. Os ônibus elétricos à bateria mais recentes e com maior desenvolvimento tecnológico, em geral chamados de ônibus elétricos *plug-in*, precisam carregar suas baterias durante a noite (entre 3 a 5 horas), dependendo da tecnologia, e suas autonomies variam entre 100 a 300 kms dependendo dos modelos de baterias utilizadas. Alguns fornecedores usam carregadores externos, enquanto outros não precisam de carregadores externos (os próprios inversores funcionam como carregadores). Nesses casos, os ônibus elétricos à bateria precisam de pequenos adaptadores acoplados a rede tradicional de energia de média ou baixa voltagem.

Os ônibus híbridos tendem a emitir menos poluentes e a consumir menos combustível em função de dispor de um motor a combustão menor do que os ônibus convencionais. Já os ônibus elétricos à bateria não possuem quaisquer tipos de

emissões de poluentes no escapamento, o que impacta positivamente a poluição urbana. Além disso, se esses ônibus estiverem sendo utilizados em países com matriz elétrica limpa, como o caso do Brasil e da Colômbia, os ônibus elétricos tendem a emitir muito poucos gases do efeito estufa por passageiro transportado.

Embora tenham um custo de aquisição maior, variando entre 70 a 150% para híbridos e elétricos em relação aos ônibus convencionais diesel, os testes demonstraram que somente a redução do custo operacional em função da economia de combustível seria suficiente para financiar o custo extra dos veículos se avaliados em todo seu ciclo de vida (10 anos). Em cada uma das cidades, um diferente contexto político e econômico gera incentivos maiores ou menores para cada tecnologia, conforme discutiremos no final do presente artigo. Em todos os casos, os testes mostraram significativa redução de poluentes locais, e também no consumo de combustível, e assim, de GEE.

RESULTADO DAS EMISSOES DE POLUENTES

Os resultados foram divididos em emissões de poluentes e de consumo de combustível ou eletricidade equivalente (eficiência energética). Em geral, os resultados variaram de cidade para cidade, bem como sua viabilidade econômica também sofreu variação em função dos modelos de ônibus diesel equivalentes normalmente utilizados naquela cidade (a regra geral é quanto melhores os ônibus diesel em uso naquela cidade, maiores eram seus custos de aquisição, e por isso, uma diferença menor a se pagar pelo ônibus mais limpo).

Em relação a emissão de poluentes, em todas as cidades testadas, o desempenho dos ônibus híbridos em paralelo foi bem melhor do que as emissões dos ônibus a diesel. Na média, houve redução de cerca de 26% na emissão de CO₂ (resultado direto da economia de combustível), uma redução média de 62% na emissão de óxidos nitrosos (NO_x), de cerca de 72% no material particulado fino (MP, ou PM1.5 em inglês) e também de 73% nos hidrocarbonetos totais (HC, ou THC em inglês), além de uma redução média de 80% para o monóxido de carbono (CO). Os ônibus elétricos não apresentam quaisquer emissões de poluentes.

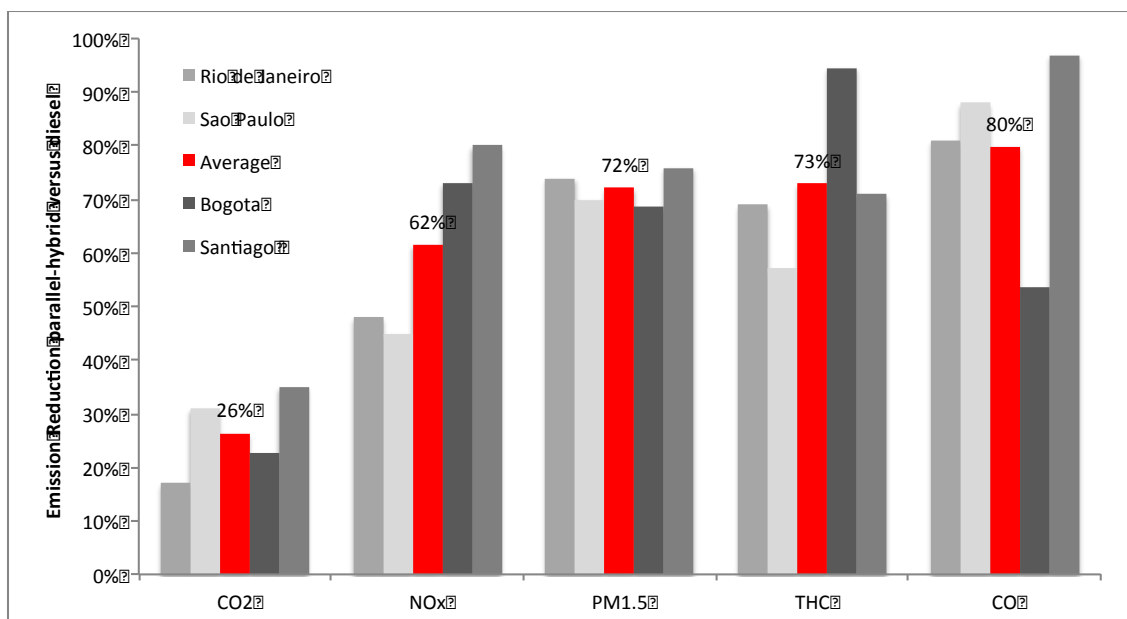


Figura 1: Redução nas emissões de CO₂ e principais poluentes mensurados.

Fonte: C40/ISSRC: Low carbon technologies can transform Latin America's bus fleets. Lessons from the C40 – CCI Hybrid & Electrical Bus Test Program.

Com a entrada da Fase 7 do PROCONVE (Programa de Controle de Emissões Veiculares) no Brasil, que obriga o uso da tecnologia Euro 5 nos ônibus novos vendidos desde 2012 em todo o território nacional, as emissões dos novos ônibus diesel devem ser menores, uma vez que os padrões de emissão dessa nova fase requerem redução de cerca de 28,63% de CO em relação a fase 5 (Euro 3) em vigor anteriormente, ou ainda de 30,31% para Hidrocarbonetos totais (HC), de 60% nos NOx e de cerca de 84,73% do material particulado (em função do uso de catalizadores). Mesmo assim, na prática, as emissões reais em operação dos veículos tendem a ser muito maiores do que as permitidas pela legislação, conforme sinalizado por alguns estudos acadêmicos nesse sentido. Essa fato decorre do fato de que a calibração dos motores é feita para as especificações da homologação do motor, que na prática, são muito diversos das operações urbanas comerciais que implicam em menores velocidades operacionais, cargas maiores de passageiros e, em muitos casos, combustíveis de menor qualidade do que o especificado.

RESULTADO DAS MEDICOES DE EFICIENCIA ENERGETICA

Os testes mensuraram o consumo de combustível dos ônibus diesel e dos híbridos, e de consumo de energia elétrica (convertido em litros equivalentes de diesel). A fim de evitar distorções em função das flutuações dos preços de eletricidade nos mercados locais, o consumo equivalente de combustível foi estimado pela conversão em kWh e litros de kcal de energia. Já na análise sobre o ciclo de vida de cada tecnologia em função dos custos de aquisição do veículo, e de operação de cada tecnologia, os dados locais de energia em cada cidade foram levados em consideração.

Os ônibus diesel convencionais foram chamados de RDB (*Regular Diesel Bus*) e foram usados como padrão de referência. Os ônibus híbridos foram divididos nas duas tecnologias: m paralelo (PHB – *Parallel Hybrid Bus*) e em serie (*Series Hybrid Bus*). Na media, os ônibus híbridos se mostraram 31% mais eficientes que os ônibus diesel convencionais na comparação por veículo equivalente, enquanto que os trólebus (testados em São Paulo) foram 56% mais eficientes que os ônibus diesel.

Os ônibus elétricos movidos à baterias variaram seu desempenho em função da tecnologia da bateria utilizada. A tecnologia com bateria de íons de lítio convencional reduziu 73% (testes em Santiago), enquanto que o ônibus elétrico movido à bateria de fosfato de ferro-lítio (testes em Bogotá), reduziu em 81% o consumo energético em comparação ao ônibus diesel.

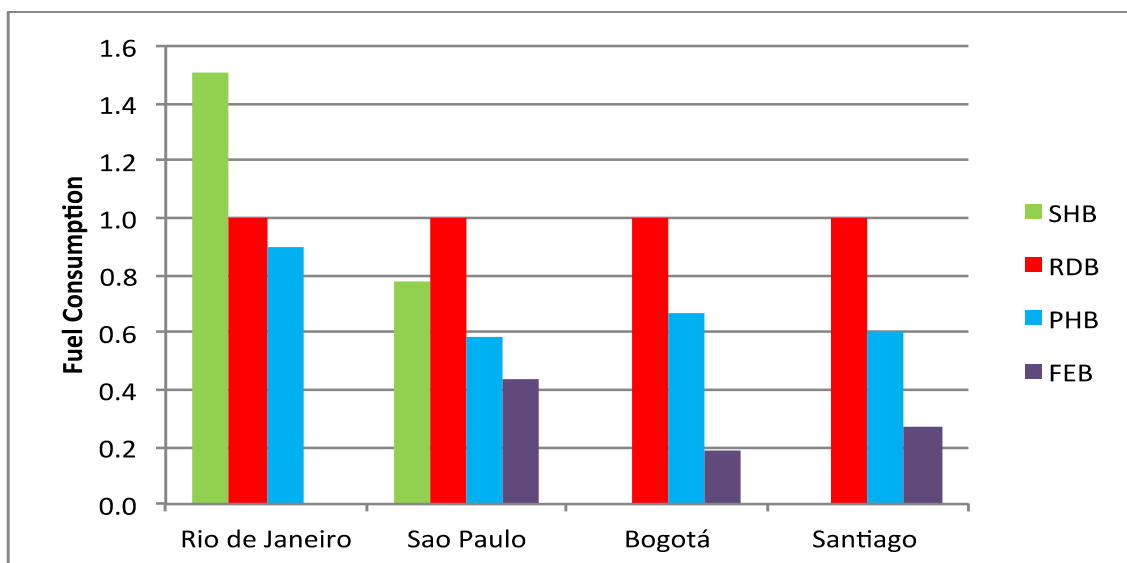


Figura 2: Resultados de eficiência energética (consumo de combustível e energia)³. Fonte: C40/ISSRC: Low carbon technologies can transform Latin America's bus fleets. Lessons from the C40 – CCI Hybrid & Electrical Bus Test Program.

RESULTADOS DO CICLO DE VIDA ECONÔMICO DAS TECNOLOGIAS.

Para comparação do ciclo de vida total das diferentes tecnologias, fez-se necessário comparar os custos de aquisição inicial dos veículos, seu consumo de energia e gastos com manutenção ao longo da vida útil do veículo (10 anos), em cada contexto regulatórios da cidade escolhida.

No caso da cidade de São Paulo, por exemplo, a idade média da frota deve ser de 5 anos, sendo que o ônibus mais velho em operação não podem ultrapassar os 10 anos (híbridos podem operar até 12 anos e elétricos até 20 anos). Mesmo com essa vantagem dos ônibus elétricos tenham em poder operar por mais de 10 anos, para efeito dessa avaliação de ciclo de vida, será utilizado a mesma idade máxima de 10 anos para a avaliação (prazo que o fornecedor garante que a bateria de fosfato de ferro teria ainda um mínimo de capacidade residual de 65%).

Entretanto, os ônibus elétricos (trólebus e movidos a baterias) não precisam ser renovados nos 10 anos de contrato, enquanto que os ônibus diesel precisam renovar 20% da frota a partir do sexto ano de operação (a fim de manter a média de 5 anos). Dessa maneira, até o ano 10, um operador que prefira operar somente com ônibus diesel terá que comprar outros 10 ônibus novos para garantir a idade média dentro da legislação no período total de 10 anos, já se forem operados por híbridos, o mesmo teria que comprar outros 7 veículos enquanto os elétricos, nenhum a mais.

Além disso, é notório que operadores renovam sua frota antes do período máximo, em função dos lucros que podem ser obtidos com a revenda desses veículos para o mercado secundário enquanto ainda estão novos. Entretanto, os lucros com a revenda dos ônibus vem caindo drasticamente nos últimos anos, e não deve se manter como uma fonte extra de recursos aos operadores no longo prazo, o que deve mudar essa prática. Atualmente, os operadores de São Paulo ganham um rendimento bruto líquido de 12% sobre o capital investido, por isso, existe maior incentivo para renovação de frota do que em outras cidades Brasileiras.

TOTAL DE GASTOS PARA OPERAR 10 ONIBUS DURANTE 10 ANOS.⁴

Custo Mensal Total Ano 1 a 5 por ônibus	Ônibus Diesel	Ônibus Híbrido	Ônibus Elétrico	Baterias
Valor do ônibus	R\$ 450.000,00	R\$ 650.000,00	R\$ 450.000,00	R\$ 800.000,00
Quantidade comprada	10 unidades	10 unidades	10 unidades	
Período (meses) ⁵	60	60	60	120
Pagamento Mensal	R\$ 8.700,00	R\$ 11,680,00	R\$ 8.882,00	R\$ 8.882,00
Custos Combustível ou Energia Elétrica	R\$ 10.490,00	R\$ 7.343,00	R\$ 1.874,00	
Manutenção e Peças	R\$ 3.600,00	R\$ 5.850,00	R\$ 2.700,00	
Custo Mensal por ônibus	R\$ 22.789,00	R\$ 24.872,00	R\$ 22.156,00	

³ Ônibus híbrido em série (SHB); Ônibus diesel de referência (RDB); Ônibus híbrido em paralelo (PHB); Ônibus elétrico puro (FEB).

⁴ Dados: Custo do diesel em R\$2,10/litro. Preço da eletricidade em R\$ 0,25/Kwh. Cada ônibus roda 300kms/dia, 30 dias por mês. Híbrido tem desempenho 30% mais eficiente que ônibus diesel. Elétrico tem desempenho 81% melhor que diesel. Custo de manutenção para elétrico em R\$ 0,30/km contra R\$ 0,40/km do diesel e R\$ 0,65/km para híbridos.

⁵ Taxas de Juros utilizadas de 6% para os ônibus diesel e elétricos (ainda não são produzidos no Brasil, por isso, sem acesso às taxas preferencial do FINAME). Os ônibus híbridos já são produzidos no Brasil, por isso, tem acesso a financiamento preferencial de 3% de taxas de juros ao ano.

Custo Anual por ônibus	R\$ 273.471,00	R\$ 298.467,59	R\$ 265.867,81	
Custo Mensal ônibus Anos 6 a 10	Ônibus Diesel	Ônibus Híbrido	Ônibus Elétrico	Baterias
Valor do ônibus	R\$ 450.000,00	R\$ 650.000,00	0 unidades compradas	
Quantidade comprada	10 unidades	7 unidades		
Período (meses) ⁶	60	60		
Pagamento Mensal	R\$ 8.700,00	R\$ 11,680,00	R\$ 1.874	R\$ 8.882,00
Custos Combustível ou Energia Elétrica	R\$ 10.490,00	R\$ 7.343,00		
Manutenção e Peças	R\$ 3.600,00	R\$ 5.850,00	R\$ 2.700	
Custo Mensal	R\$ 22.789,00	R\$ 24.872,00	R\$ 13.456,00	
Custo Anual por ônibus	R\$ 273.471,00	R\$ 298.467,59	R\$ 161,471	
TOTAL PAGO EM 10 ANOS	R\$ 2.734.711,00	R\$ 2.564.208,51	R\$ 2.136.692,00	
Redução custo de vida total	Linha Base	- 7%	- 22%	

A avaliação do ciclo de vida total das diferentes tecnologias de ônibus demonstra uma redução de cerca de 22% no custo de vida total dos elétricos em comparação aos ônibus diesel equivalentes, gerando economias de cerca de R\$ 600 mil para frota de 10 ônibus operando em São Paulo. Já os híbridos apresentam uma economia no custo em seu ciclo de vida completo de cerca de 7%.

CONCLUSÕES

O presente artigo utilizou-se dos resultados dos teste com ônibus híbridos e elétricos realizados pela Rede C40 e patrocínio do Banco Interamericano (BID), para demonstrar a viabilidade técnica e econômica do uso de ônibus mais limpos.

Embora essas novas tecnologias sejam mais caras para aquisição inicial, o estudo demonstrou que elas podem ser mais econômicas se analisadas em todo seu ciclo de vida em função das legislações existentes. O estudo comprovou, portanto, que os custos de operação e manutenção afetam mais os ciclos econômicos mais que custos de capital inicial para a aquisição dos veículos.

Existe grande economia energética com o uso da eletricidade nos sistemas de transporte coletivo. Os híbridos operando nas planícies podem atingir reduções médias de 31% e os elétricos puros podem reduzir 56% para os trólebus e 77% na média para as diferente tecnologias de elétricos, sendo que o melhor desempenho de todos os 17 ônibus testados atinge uma redução de 81% no consumo energético.

Considerando uma frota de 10 ônibus operando determinada linha na cidade de São Paulo, os ônibus híbridos poderiam reduzir cerca de 7% do custo total operacional em relação aos ônibus diesel atualmente em operação na cidade, assim como os ônibus elétricos poderiam reduzir em até 22% o custos total dessa operação.

BIBLIOGRAFIA (ORDEM ALFABÉTICA).

- ANTP. Sistema de Informações da Mobilidade Urbana. Relatório Geral. Associação Nacional de Transporte Público, 2011.
- C40/ISSRC: Low carbon technologies can transform Latin America's bus fleets. Lessons from the C40 – CCI Hybrid & Eletrical Bus Test Program.
- IPEA. Poluição veicular atmosférica. Comunicados do IPEA. Nº 133. Secretaria de Assuntos Estratégicos da Presidência da República, 2011.
- THE WORLD BANK. Cities and Climate Change: An urgent Agenda. Washington. 2010.
- OCDE. TRANSPORT OUTLOOK 2011: Meeting the Needs of 9 Billion People in International Transport Forum. OCDE, 2011.