

Eco-driving: uma ferramenta para aprimorar a sustentabilidade do transporte de resíduos urbanos

Vicente Aprigliano Fernandes¹, Márcio de Almeida D'Agosto², Cíntia Machado de Oliveira³, Fabiana do Couto Assumpção⁴, Ana Carolina Peixoto Deveza⁵

Resumo: Este artigo teve por objetivo apresentar os resultados obtidos por meio de um projeto. Nesse projeto participaram 22 motoristas e 11 veículos pesados que realizam a coleta e transferência de lixo em área urbana na cidade do Rio de Janeiro. Para isso, foi realizada uma revisão bibliográfica a fim de apresentar os principais conceitos e objetivos do tema estudado e em seguida foram apresentados os dados e as informações do projeto realizado. Identificou-se que existe um potencial no uso do Eco-driving, em termos financeiros e ambientais, aplicados a veículos de coleta de resíduos urbanos. No estudo de caso realizado, por meio dessa prática, obteve-se até 7,6% em melhoria da economia de combustível e redução de até 7,1% na emissão de CO₂ (principal gás de efeito estufa) e de poluentes atmosféricos locais.

Palavras-chave: Direção Sustentável, Economia de Combustível, Economia de Energia.

Abstract: This article aims at presenting the results obtained through a project with the participation of 22 drivers and 11 heavy vehicles for the collection and transfer of waste in urban areas in the city of Rio de Janeiro. For this, a literature review was conducted to present the main concepts and objectives of the studied theme and then presented the data and information of the implemented project. It was identified that there is a potential in the use of Eco-driving in financial and environmental terms, applied to municipal waste collection vehicles. In the case study, through that this practice was obtained up to 7.6% in improved fuel economy and reduced to 7.1% in CO₂ emissions (the main greenhouse gas) and local air pollutants.

Keywords: Eco-Driving, Fuel Saving, Energy Saving.

1. INTRODUÇÃO

Considerando a preocupação mundial em conciliar o desenvolvimento socioeconômico e a proteção dos ecossistemas da Terra, observa-se um crescente cuidado, em específico, com questões relativas à concentração de Gases de Efeito Estufa (GEE) na atmosfera e com a emissão de poluentes que tendem a prejudicar a saúde humana. Pode-se citar, por exemplo, a Eco-92, a Rio+20 e a COP20 como eventos que uniram chefes de Estado e organizações do mundo com a finalidade de discutir meios de minimizar os impactos da atividade do homem no meio ambiente e nas condições sociais das populações.

Nesse contexto, o meio científico, os órgãos públicos e as organizações sociais tratam a concentração de GEE na atmosfera como um problema que afeta indiretamente a saúde humana e a própria sustentabilidade do planeta. De forma mais específica, a temática da emissão do GEE é estudada sob a ótica do uso final ou do ciclo de vida de produtos e serviços, se forem considerados os diversos setores da economia. Dentre eles, o setor de transportes que, se comparado às demais atividades econômicas no Brasil e no mundo, é responsável, respectivamente, por 9% (Brasil) e

13% (mundo) da emissão de GEE (MCT, 2009 e IPCC, 2007).

Nesse sentido, práticas mais eficientes e estratégias operacionais que promovam a mitigação dos custos ambientais, sociais e econômicos, tais como o *Eco-driving* que é uma iniciativa sustentável, podem reduzir o consumo de energia, diminuir custos de manutenção dos veículos, melhorar a segurança viária, aprimorar a qualificação profissional dos motoristas e impactar de forma significativa na redução de CO₂ e poluentes atmosféricos locais (Barth e Boriboonsomsin, 2008, Zarkadoula *et al.*, 2007 e Barkenbus, 2010).

A aplicação do *Eco-driving* está alinhada com os princípios da Lei Nº 12.587 (Política Nacional de Mobilidade Urbana), que em seu Art. 5º, § II, preconiza o desenvolvimento sustentável das cidades. O Art. 6º, §§ IV e V, tem como diretrizes a mitigação dos custos ambientais, sociais e econômicos dos deslocamentos de pessoas e cargas nas cidades e o incentivo ao desenvolvimento científico-tecnológico. O Art. 7º, § IV promove o incentivo de uso de energias renováveis e menos poluentes para atingir o objetivo de promover o desenvolvimento sustentável e a mitigação dos custos ambientais e socioeconômicos dos deslocamentos de pessoas e cargas nas cidades.

Com base no interesse em contribuir com o conhecimento das possíveis formas de redução da emissão de GEE e de poluentes atmosféricos locais a partir da prática do *Eco-driving* aplicado a operação de coleta de resíduos em área urbana, este artigo tem por objetivo apresentar os resultados obtidos por meio de um projeto que conta com a participação de 22 motoristas e 11 veículos pesados que realizam a coleta e transferência de lixo em área urbana na cidade do Rio de Janeiro.

A partir desta introdução, este artigo divide-se em cinco Seções. A Seção dois apresenta o conceito e uma seleção de experiências de aplicação da técnica do *Eco-driving*, por meio de uma revisão bibliográfica. A descrição do

¹ Vicente Aprigliano Fernandes, Universidade Federal do Rio de Janeiro Programa de Engenharia de Transportes. (vicente.geo.ufrj@gmail.com)

² Márcio de Almeida D'Agosto, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Engenharia de Transportes. (dagosto@pet.coppe.ufrj.br)

³ Cíntia Machado de Oliveira, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Engenharia de Transportes; Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca Engenharia Industrial Mecânica – Uned/Itaguaí. (cintia.machado.oliveira.1@gmail.com)

⁴ Fabiana do Couto Assumpção, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica. (fabianaassumpcao@poli.ufrj.br)

⁵ Ana Carolina Peixoto Deveza, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica. (anadeveza@poli.ufrj.br)

Tabela 1. Experiências de Eco-driving no Brasil e no Mundo

Fonte: Elaboração Própria

<i>Literatura</i>	<i>Testes</i>	<i>Economia de Combustível</i>
Silva (2007)	(1) <i>Eco-driving</i> (2) Pneus de baixa resistência ao rolamento (3) Equipamentos de aerodinâmica	11,4%
<i>World Bank</i> (2011a) - Brasil	(1) <i>Eco-driving</i>	1%
GTZ (2005)	(1) <i>Eco-driving</i>	14,2%
<i>Rocky Mountain Institute</i> (2008)	(1) <i>Eco-driving</i> (2) Pneus de baixa resistência ao rolamento (3) Equipamentos de aerodinâmica (4) Redução de peso da estrutura	12,3%
<i>World Bank</i> (2011b) - China	(1) <i>Eco-driving</i> (2) Pneus de baixa resistência ao rolamento (3) Equipamentos de aerodinâmica (4) Redução de peso da estrutura.	23,77%
Zarkadoula <i>et al.</i> (2007)	(1) <i>Eco-driving</i> (2) Manutenção preventiva veículos	10,2%
Boriboonsomsin <i>et al.</i> (2010)	(1) <i>Eco-driving</i>	1% a 6%

projeto é apresentada na Seção três. A metodologia adotada para a aplicação do treinamento de *Eco-driving*, o tratamento estatístico dos dados, a avaliação financeira e a avaliação ambiental são descritos na Seção quarto. A Seção 5 apresenta os resultados e suas análises e por fim, na Seção seis são apresentadas as conclusões.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Eco-driving (direção sustentável) é um termo que está direcionado a união das técnicas de direção econômica, ambiental e segura, com o objetivo de diminuir o consumo de combustível e conseqüentemente, reduzir a emissão de GEE e poluentes atmosféricos locais tais como CO (monóxido de carbono), NMHC (hidrocarbonetos com a exceção de metano), NOx (óxido de nitrogênio) e MP (material particulado), gerando eficiência operacional (Sivak e Schoettle, 2012). Sua aplicação, em veículos de qualquer porte e função, pode levar a obtenção de aumento em até 25% da eficiência no uso de combustível (Sivak e Schoettle, 2012). Para Barkenbus (2010), as vantagens do *Eco-driving*, vão além das reduções da emissão de GEE e poluentes atmosféricos locais. Incluem também redução de custos e benefícios de segurança para a sociedade, tais como a diminuição do número de acidentes e mortes promovidos pelos veículos em circulação.

De acordo Sivak e Schoettle (2012), o *Eco-driving* é caracterizado pela tomada de decisões estratégicas (seleção veicular e manutenção), decisões táticas (seleção de rota e peso do veículo) e decisões operacionais (comportamento do motorista) que aumenta a economia de qualquer tipo de combustível na operação do veículo. Para Barth e Boriboonsomsin (2009), o *Eco-driving* envolve a manutenção preventiva e o comportamento do motorista ao conduzir o veículo. Já para Barkenbus (2010), Ando e Nishihori (2011) e Zarkadoula *et al.* (2007), o *Eco-driving* envolve as práticas de condução do veículo que levam ao consumo reduzido de combustível e, conseqüentemente, há uma redução da emissão de GEE.

Na revisão bibliográfica realizada, identificaram-se alguns trabalhos que realizaram testes com a aplicação de *Eco-driving*. No entanto, somente sete foram considerados nesta revisão bibliográfica, três deles no Brasil (Tabela 1). Essas pesquisas consideram a aplicação do treinamento em

veículos pesados com o objetivo de mudar o comportamento do motorista e aprimorar as condições operacionais do veículo, além de verificar a eficiência energética alcançada. Os testes foram realizados pelo Banco Mundial, a Sociedade Alemã de Cooperação Técnica (GTZ) e o *Rocky Mountain Institute*. Além disso, identificou-se também uma dissertação de mestrado (Silva, 2007) sobre direção econômica que se assemelha a prática do *Eco-driving* e os estudos apresentados por Zarkadoula *et al.* (2007) e Boriboonsomsin *et al.* (2010), realizados na Grécia e nos EUA respectivamente.

Dos testes realizados no Brasil, verificou-se que o trabalho de Silva (2007) apresenta a descrição e os resultados de um treinamento de direção econômica, baseado nas práticas de *Eco-driving*. Participaram desse treinamento 105 motoristas de uma frota de veículos de transporte de carga. Além disso, foram instalados equipamentos para melhorar a aerodinâmica nos caminhões e utilizados pneus de baixa resistência ao rolamento. Neste experimento, Silva (2007) constatou uma melhora na eficiência (com relação à redução no consumo de combustível) de aproximadamente 11,4%.

O Banco Mundial (2011) realizou o mesmo treinamento que Silva (2007), em uma frota de oito veículos (de transporte de carga) para testar a eficiência das práticas separadamente. Considerando a redução no consumo de combustível, encontrou-se no teste de pneus de baixa resistência redução de 1%, com a instalação de equipamentos de aerodinâmica a redução foi de 3%, e o treinamento dos motoristas gerou uma redução 1%.

No âmbito internacional, testes foram realizados na Alemanha, Chile, Argentina, Estados Unidos e China. Na Alemanha e no Chile, os testes foram realizados pela GTZ (2005) e realizou-se apenas o treinamento de *Eco-driving*, com foco na mudança de comportamento. No entanto, não houve apuração dos resultados de economia de combustível. Na Alemanha, foi realizado o teste com 40 vans e após o treinamento alcançou-se uma economia de combustível de 8%. No Chile, foram testados 11 ônibus (transporte público) e a economia de combustível foi de 14,2%. Na Argentina, testaram sete ônibus e o resultado da economia de combustível chegou a 14%. O estudo de Zarkadoula *et al.* (2007) realizado na Grécia com ônibus urbanos, onde se aplicou apenas as técnicas de *Eco-driving*, apurou-se uma

Tabela 2. Características dos veículos – estudo de caso e caso geral
Fonte: COMLURB (2013)

<i>Casos</i>	<i>Tipo</i>	<i>Quantidade</i>	<i>Descrição</i>	<i>Utilização</i>
Estudo de Caso	P6	7	Caminhão de 2 eixos com compactador de 15m ³	Coleta de lixo domiciliar
	P19	4	Conjunto caminhão trator e semirreboque - 45m ³	Transferência de lixo da estação até o aterro
Caso Geral	P19	43	Conjunto caminhão trator e semirreboque - 45m ³	Transferência de lixo da estação até o aterro
	P7	80	Caminhão de 3 eixos com compactador de 19m ³	Coleta de lixo domiciliar
	P25	18	Caminhão de 3 eixos com compactador de 9m ³	Coleta de lixo domiciliar
	P6	97	Caminhão de 2 eixos com compactador de 15m ³	Coleta de lixo domiciliar
	P5	18	Caminhão de 2 eixos com compactador de 6m ³	Coleta de lixo domiciliar
	P5A	10	Caminhão de 2 eixos com compactador de 10m ³	Coleta de lixo domiciliar

redução de 10,2% no consumo de energia. Na pesquisa de Boriboonsomsin *et al* (2010) nos EUA, aplicou-se apenas as técnicas de *Eco-driving* e foram realizados dois testes, um para circulação urbana e outro para circulação em rodovias, cujo resultado foi, respectivamente, 6% e 1% de redução de consumo de combustível.

No trabalho do *Rocky Mountain Institute* (2008) testou-se um veículo de transporte de carga. Neste estudo, considerou-se além dos elementos do teste de Silva (2007), a redução do peso do veículo, por meio da utilização de materiais mais leves em sua estrutura. Nesse teste, a economia de combustível chegou a 12,3%.

O Banco Mundial realizou, em 2011, um teste na China, sendo testados dois caminhões de carga de grande porte e oito caminhões de carga de médio porte. Foram utilizadas todas as práticas citadas anteriormente, ou seja, realização de treinamento com os motoristas, instalação de equipamentos para aprimorar a aerodinâmica do veículo, uso de pneus de baixa resistência ao rolamento e redução do peso do veículo. A economia de combustível alcançada foi de até 23,7%.

A partir dos estudos apresentados, verifica-se que o aumento da eficiência energética, gerada pela aplicação do treinamento de *Eco-driving*, em uma frota de caminhões, pode variar entre 1% e 14,2%, considerando os casos que se aplicaram apenas o treinamento. Tornando-se assim, a disseminação dessa prática, fundamental para contribuição com a comunidade científica e empresarial. Verificou-se também que as técnicas de *Eco-driving* somadas a outras práticas, tais como pneus de baixa resistência ao rolamento, equipamentos de aerodinâmica, redução de peso da estrutura e manutenção preventiva dos veículos, podem alcançar uma redução de até 23,77% na economia de combustível.

Com base nas pesquisas de Silva (2007), *World Bank* (2011a e 2011b), GTZ (2005), *Rocky Mountain Institute* (2008), *World Bank* (2011b), Zarkadoula (2007) e Boriboonsomsin *et al*. (2010) foi possível identificar como técnicas de *Eco-driving*: Antecipar o fluxo do tráfego, usar corretamente os freios, manter a velocidade constante, evitar ponto morto e usar adequadamente a marcha. Barkenbus (2010) defende ainda que, medidas de manutenção veicular, também podem ser consideradas como técnicas de *Eco-driving*.

3. CARACTERIZAÇÃO DO PROJETO

Neste item, apresentam-se os veículos testados no estudo de caso e no caso geral. O estudo de caso envolve os veículos que participaram dos treinamentos do projeto piloto, caminhões equipados com compactadores de lixo (P6) e caminhões trator e semirreboques de transferência de lixo (P19). Esses veículos foram selecionados com base na eficiência energética e, neste caso, optou-se por selecionar, considerando uma base de dados já existente, os equipamentos com menor desempenho, tendo em vista um maior potencial de melhora. Essa escolha também teve como base a distância percorrida pelos veículos da frota, considerando os que eram utilizados em médias e longas distâncias e na quantidade dos veículos de cada tipo.

Para o caso geral, considerou-se toda a frota de caminhões da COMLURB e para obtenção de seus resultados, realizou-se a extrapolação dos dados obtidos por meio do estudo caso, considerando-se toda essa frota. (Tabela 2)

O treinamento do *Eco-driving* foi aplicado a 22 motoristas, os quais quatorze operavam os equipamentos do tipo P6 e oito do tipo P19. A Tabela 2 apresenta a quantidade de veículos que participaram do estudo de caso e os que foram considerados no caso geral e suas respectivas características.

Quanto ao tipo de operação realizada por cada tipo de veículo, foi observado que as operações de caminhões com compactadores e de conjuntos de caminhão trator e semirreboques são impactados por fatores incontrolláveis da cidade, ou seja, há influência do tráfego urbano, das condições viárias e do desenho urbano.

Tais fatores tornaram a operação dos caminhões com compactadores (P6) menos favorável à aplicação do *Eco-driving* uma vez que se trata de uma operação de coleta domiciliar, que obriga os motoristas a coletar o lixo a cada 50 metros (operação anda-para) e há necessidade de uso do equipamento de compactação, que gera um gasto adicional e inevitável de combustível devido à necessidade de aceleração do veículo para operar o equipamento.

Diferente dos caminhões com compactadores, os conjuntos de caminhão trator e semirreboques (P19) se mostram mais favoráveis à aplicação do *Eco-driving*. Os

P19 têm a função de levar os resíduos das Estações de Transferência de Resíduos (ETR) para os Centros de Tratamento de Resíduos (CTR), ou seja, é um veículo que opera com o objetivo de levar a carga de um ponto inicial ao final sem paradas intermediárias. Este tipo de operação impõe menor dificuldade à aplicação das técnicas do *Eco-driving*, pois há menor exigência de mudança de regime de operação do veículo. Adicionalmente, verificou-se que este tipo de veículo apresenta operação similar aos veículos testados nas experiências encontradas de *Eco-driving* aplicadas no Brasil e no mundo.

4. METODOLOGIA

A metodologia utilizada neste trabalho divide-se sinteticamente nos quatro métodos apresentados neste item: treinamento de *Eco-driving*, tratamento estatístico dos dados, avaliação financeira e avaliação ambiental aos resultados encontrados.

4.1. Método de treinamento dos motoristas

Realizaram-se dois treinamentos para o grupo de motoristas relativo ao estudo de caso, nas datas de 07/04/2013 e 05/05/2013. Os treinamentos foram divididos em aulas teóricas e práticas com base nas técnicas do *Eco-driving* identificadas na revisão bibliográfica.

As aulas teóricas se deram por meio de uma reunião com os motoristas durante um dia de treinamento, cujas técnicas de *Eco-driving* foram explicadas. As aulas práticas se deram por meio de um treinamento feito em campo, dentro do veículo em que os motoristas eram acompanhados por um instrutor, que os ensinavam a aplicar as práticas e depois verificaram como elas eram executadas. As aulas práticas também tiveram a duração de um dia.

Tanto as aulas teóricas como as práticas, tiveram como conteúdo as técnicas de *Eco-driving* apresentadas no item 2 deste trabalho, isto é, antecipar o fluxo do tráfego, usar corretamente os freios, manter a velocidade constante, evitar ponto morto e usar adequadamente a marcha. Cada uma destas técnicas foi apresentada teoricamente aos motoristas (aula teórica), quando o conceito e vários exemplos foram discutidos. Posteriormente, na aula prática, o instrutor, mostrava ao motorista como fazer e depois verificada se o mesmo era capaz de reproduzir o que foi ensinado.

Os resultados basearam-se em dados coletados pós-treinamento (07/04/2013 até 30/06/2013), e dados coletados pré-treinamento (01/03/2013 até 06/04/2013) como linha de base. Para tal, consideraram-se os seguintes dados: volume abastecido [l] e a quilometragem percorrida [km] entre os abastecimentos para avaliar a medida de rendimento km/l. Esses dados são relevantes para a avaliação do rendimento energético, uma vez que consideram a distância percorrida por unidade de combustível consumido. O volume abastecido era medido por meio de uma bomba de abastecimento, no local onde os veículos eram recolhidos, após a operação. Os operadores foram treinados para abastecer os veículos até o desarme automático da bomba de abastecimento para minimizar a imprecisão.

4.2. Método de tratamento estatístico dos dados

Para a obtenção de resultados nos quais eventuais discrepâncias pudessem ser evitadas, foi realizado tratamento estatístico dos dados para minimizar sua dispersão (Stevenson, 1981). O conjunto de equações (Equação 1a a 1c) foi utilizada para balizar a exclusão dos valores que apresentam o rendimento energético (X_i) acima ou abaixo do intervalo de 3 desvios padrão (*DESVPAD*) a partir da média aritmética (*MED*) (intervalo de aceitação). Este processo foi repetido até que todos os dados (X_i) utilizados para o cálculo de *MED* estivessem dentro do intervalo de aceitação.

$$MED = \sum_{i=1}^n X_i \quad (1a)$$

$$DESVPAD = \sqrt{\frac{(\sum_{i=1}^n (X_i - MED)^2)}{n - 1}} \quad (1b)$$

$$MED - 3 * DESVPAD \leq X_i \leq MED + 3 * DESVPAD \quad (1c)$$

Em que:

MED: representa a média aritmética da amostra [km/l];

DESVPAD: desvio padrão da amostra;

n: tamanho da amostra em cada iteração;

X_i : valores do rendimento energético [km/l].

4.3. Método de avaliação financeira

A avaliação financeira se baseou no custo mensal uniforme (CMU). O custo adicional do treinamento de *Eco-driving* (VPLT) será distribuído mensalmente por igual, representando um custo de capital (CC) (Equação 2), utilizando o fator de recuperação de capital (FR) (Equação 3). O custo fixo, determinado a partir do custo de capital menos o crédito de carbono (CrC) (Equação 4), será considerado para cada tipo de veículo (tipo de veículo *j*). Estes custos podem ser recuperados de acordo com a economia monetária (EM) (Equação 5) alcançada pelo aumento do rendimento energético como a aplicação do *Eco-driving* (Novaes, 2004).

$$CC = (VPLT) * FR \quad (2)$$

Em que:

CC: Custo de Capital [R\$/mês]

VPLT: valor presente líquido de todos os custos para a realização do treinamento de *Eco-driving* [R\$]

FR: Fator de recuperação de capital [adimensional]

$$FR = TCR * \left\{ \frac{(1 + TCR)^n}{[(1 + TCR)^n - 1]} \right\} \quad (3)$$

Em que:

n: Prazo do projeto [meses]

TCR: Taxa de recuperação de capital

$$CrC_j = PCa * FEC * FS_j \quad (4)$$

Em que:

CrC_{*j*}: Crédito de carbono para o tipo de veículo *j* [R\$/mês]

PCa: Preço do carbono (CO₂) [R\$/kgCO₂]

FEC: Fator de emissão de CO₂ [kgCO₂/lcombustível]

FS_{*j*}: Economia mensal de combustível por tipo de veículo *j* [lcombustível/mês]

$$EM_j = PC * FS_j \quad (5)$$

Em que:

Tabela 3. Fatores de emissão de poluentes atmosféricos.

Fonte: Adaptado de "Greenhouse Gas Inventory and Emissions Scenario of Rio de Janeiro City - Brazil Technical Summary" (2011).

Referência	Economia de Combustível					
	(km/l)	CO ₂ (kg/l)	CO (g/l)	NMHC (g/l)	NO _x (g/l)	MP (g/l)
a – P6	1,21	2,71	3,66	0,64	7,30	0,073
b – P6	1,22					
a – P19	1,70					
b – P19	1,83					

Tabela 4. Economia de combustível – P6 e P19.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Períodos	Resultados [km/l]	
	P6 – MEDa	P19 - MEDb
a	1,21	1,70
b	1,22	1,83

EM_j: Economia monetária para o tipo de veículo j [R\$/mês]

PC: Preço do combustível [R\$/l_{combustível}]

FS_j: Economia mensal de combustível por tipo de veículo j [l_{combustível}/mês]

4.4. Método de avaliação ambiental

A estimativa das emissões de poluentes atmosféricos selecionados foi obtida aplicando a Equação 6 e considerando que a distância mensal percorrida pelo P6 e P19 é, respectivamente, 5.200 e 10.000 km (COMLURB, 2013) e os fatores de emissão de poluentes atmosféricos são os apresentados na Tabela 3. Foi utilizada a letra "a" para situar o período pré-treinamento e a letra "b" o período pós-treinamento (Oliveira *et al.*, 2014).

$$ET_i = (FE_i) \times (D_j / EC_j) \quad (6)$$

Em que:

ET_i: Emissão total do tipo de poluente atmosférico i [kg ou g]

FE_i: Fator de emissão do poluente i [kg/l ou g/l]

D: Distância média percorrida do tipo de veículo j [km]

EC_j: Economia de combustível [km/l]

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base na comparação dos dados coletados antes (período a) e depois (período b) dos dois treinamentos realizados com os motoristas dos veículos do tipo P6 e P19, obteve-se uma melhora de, respectivamente, 0,8% e 7,6% na economia de combustível (Tabela 4).

Observa-se que os resultados alcançados pelos veículos P6, dedicados a operação de coleta de lixo com incidência de muitas paradas e influência do tráfego urbano, foram quase 10 vezes menor que aquele obtido pelos veículos P19, que trafegam em fluxo de tráfego livre na maior parte do tempo. Este resultado ajuda a explicar as limitações da técnica do *Eco-driving* quando aplicada a regimes de operação onde o motorista tem dificuldade de impor as formas de condução que reduzem o consumo de combustível em função das influências externas. Tal resultado é semelhante apenas ao apresentado no estudo de Boriboonsomsin *et al.*

(2010) onde apurou-se uma redução no consumo de combustível de 1% para os veículos de circulação urbana e de 6% para os veículo de circulação em rodovias.

As demais pesquisas apresentadas também apontam redução no consumo de combustível, que pode chegar a 23,77%. Porém, não podem ser considerados semelhantes ao projeto apresentado neste artigo. Tal diferença pode ser explicada pelo fato das pesquisas realizarem outros testes além do *Eco-driving* ou apresentarem características de operação diferentes da testada neste estudo.

A avaliação financeira do estudo de caso envolve um valor de investimento para realizar dois treinamentos de *Eco-driving* por ano, durante cinco anos, parcelado por 60 vezes (n), considerando a taxa SELIC de 0,09/ano (TCR). Todos esses parâmetros foram obtidos a partir de consulta às práticas gerenciais da empresa em que o estudo foi realizado (COMLURB 2013). Desta forma o valor mensal para realizar os dois treinamentos por ano ficou R\$ 427,24 (CC) para apenas uma turma.

Observa-se na Figura 1 que, no caso do P6, mesmo considerando o crédito de carbono (CrC), o retorno financeiro se inicia, aproximadamente, aos 4.500 km por mês, um pouco abaixo da distância média percorrida mensalmente pelo P6 que é de 5.200 km por mês. Ao longo de todo o mês, para o caso do P6, deixou-se de gastar R\$ 455,41 com consumo de combustível, superando o investimento mensal de R\$ 427,24.

Para o caso do P19, o estudo de caso se mostrou mais favorável (Figura 1), uma vez que a quilometragem média mensal do P19 é de 10.000 km e a compensação de custos sem a inclusão dos créditos de carbono ocorre a partir de, aproximadamente, 2.500 km. Com a inclusão do crédito de carbono a compensação ocorre aproximadamente a partir de 2.000 km. Ao longo de todo o mês, para o caso do P19, deixou-se de gastar R\$ 1.711,79 com consumo de combustível, superando o investimento mensal de R\$ 427,24.

Aplicando a mesma análise no caso geral, gerou-se a Tabela 5, que apresenta um resumo da avaliação financeira da implantação do treinamento de *Eco-driving* na frota de caminhões com compactadores e de veículos do tipo P19 da COMLURB (caso geral), supondo que todos alcançariam uma melhora de desempenho similar ao do estudo de caso na economia de combustível.

No caso dos caminhões com compactadores, são 223 veículos, ou seja, 446 motoristas. Para atender a todos os motoristas, seria necessário formar 15 turmas com 30 alunos cada. Desta forma, o valor de investimento total para

Tabela 5. Resultados da Avaliação Financeira do Caso Geral

Fonte: Elaborado pelo autor.

<i>Caso Geral</i>	<i>Distância média mensal percorrida [km]</i>	<i>Distância média mensal para obter a compensação [km]</i>	<i>Economia total sem CrC</i>	<i>Economia total com CrC</i>
Caminhões com compactadores	5.200	2.250	R\$ 8.100,00	R\$ 9.061,00
Veículos do Tipo P19	10.000	500	R\$ 34.161,00	R\$ 35.389,00

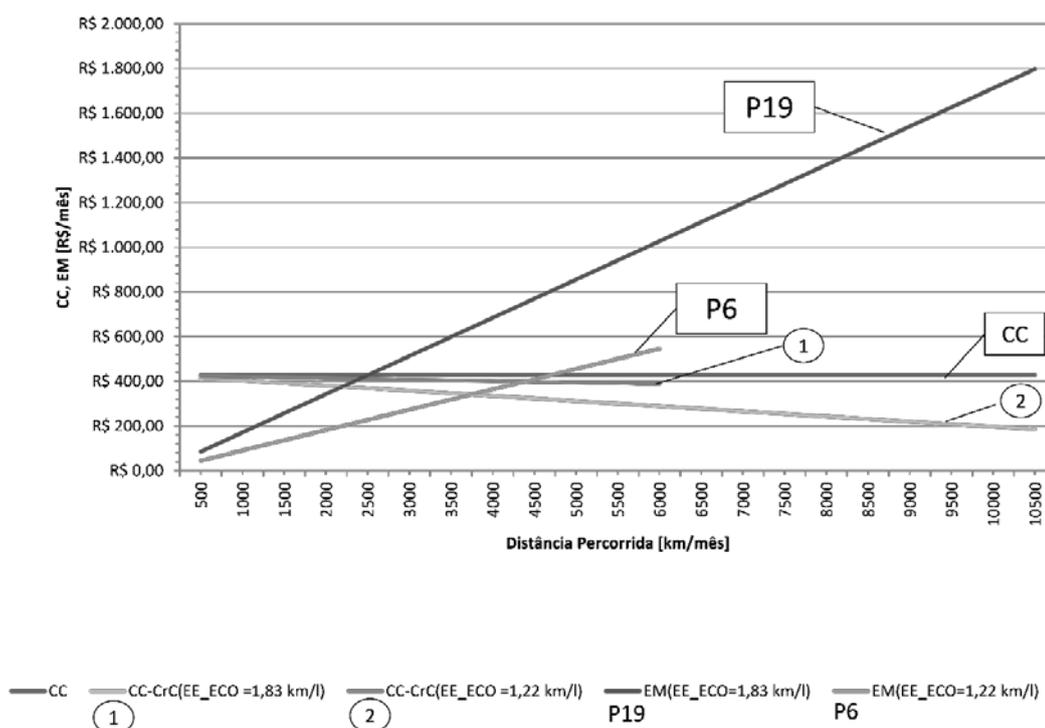


Figura 1. Análise de Viabilidade Financeira do Treinamento de *Eco-driving* para o Estudo de Caso

realização de dois treinamentos por ano, durante cinco anos, seria de, aproximadamente, R\$ 311.273,00, o que acarretariam um gasto mensal de, aproximadamente, R\$ 6.408,00.

Diferente do estudo de caso, em que a compensação de custos passa a ocorrer a partir 4.500 km, o caso geral se mostra mais favorável, pois este retorno passaria a acontecer a partir de, aproximadamente, 2.250 km, em função do ganho de escala. Considerando que a média mensal de quilometragem percorrida por todos os caminhões com compactadores varia entre, aproximadamente, 4.000 km e 5.000 km (COMLURB 2013), a aplicação do *Eco-driving* proporcionaria resultados financeiros positivos para este caso. Assim como no estudo de caso, a consideração dos créditos de carbono proporcionou redução pouco significativa, cerca de 200 km, da quilometragem necessária para a compensação dos custos. Nesta situação, ao longo de todo o mês deixaria-se de gastar R\$ 14.508,16 com combustível, superando o investimento mensal de R\$ 6.408,00, resultando em economias totais apresentadas na Tabela 5.

Para os veículos do tipo P19, o caso geral considera o treinamento de *Eco-driving* aplicado hipoteticamente em uma frota de 43 veículos e 86 motoristas, que corresponde à frota total da COMLURB. Esta situação requisitaria a montagem de três turmas com 30 alunos cada, que receberiam dois treinamentos de *Eco-driving* por ano, durante 5

anos. Isto implicaria no investimento total de cerca de R\$ 62.250,00 com desembolso mensal de R\$ 1.280,00.

A compensação dos custos com treinamento dos motoristas da frota de veículo do tipo P19 ocorreria a partir de quilometragens médias mensais de 500 km, muito abaixo dos 10.000 km observados. A introdução dos créditos de carbono tornaria esta compensação possível a partir de qualquer quilometragem média mensal que os veículos tipo P19 operem. Nesta situação, ao longo de todo o mês deixaria-se de gastar R\$ 35.441,69 com combustível, superando de forma significativa o investimento inicial de R\$ 1.280,00.

Tais benefícios financeiros também foram apontados nos trabalhos apresentados na revisão bibliográfica apresentada neste estudo. O estudo de Zarkadoula *et al.* (2007), embora não tenha apontado o prazo médio para o retorno do capital investido, verifica-se uma redução de até 4,35% dos custos com combustível.

Quanto à avaliação ambiental, as emissões CO₂ (dióxido de carbono) e de poluentes atmosféricos locais foram calculadas para o caso específico antes e depois da aplicação dos dois treinamentos de *Eco-driving*. Os poluentes atmosféricos locais avaliados nesta pesquisa foram o CO (monóxido de carbono), NMHC (hidrocarbonetos não me-

Tabela 6. Emissão de CO₂ e de Poluente Atmosféricos Locais pelos veículos tipo P6 – Estudo de Caso – 7 Veículos
Fonte: Elaborado pelo autor.

<i>Emissão de CO₂ e de poluentes atmosféricos locais – P6</i>							
<i>Referência</i>	<i>Economia de combustível (km/l)</i>	<i>l/mês</i>	<i>CO₂(kg)</i>	<i>CO (g)</i>	<i>NMHC (g)</i>	<i>NO_x (g)</i>	<i>PM (g)</i>
a	1,21	30.082,64	81.523,96	110.313,1	19.523,63	219.693,5	2.195,97
b	1,22	29.836,03	80.855,74	109.408,9	19.363,61	217.892,8	2.177,98
Redução	#	246,61	668,22	904,19	160,02	1.800,75	17,99
Redução (%)	#	0,82%	0,82%	0,82%	0,82%	0,82%	0,82%

Tabela 7. Emissão de CO₂ e de Poluente Atmosféricos Locais pelos veículos tipo P19 – Estudo de Caso – 4 Veículos
Fonte: Elaborado pelo autor.

<i>Emissão de Poluentes - P19</i>							
<i>Referência</i>	<i>Economia de combustível (km/l)</i>	<i>l/mês</i>	<i>CO₂(kg)</i>	<i>CO (g)</i>	<i>NMHC (g)</i>	<i>NO_x (g)</i>	<i>PM (g)</i>
A	1,70	23.529,4	63.764,68	86.282,32	15.270,56	171.835,3	1.717,6
B	1,83	21.857,92	59.234,96	80153	14.185,76	159.628,4	1.595,6
Redução	#	1.671,48	4.529,72	6.129,32	1.084,8	12.206,88	122,0
Redução (%)	#	7,10%	7,10%	7,10%	7,10%	7,10%	7,11%

tano), NO_x (óxido de nitrogênio) e MP (material particulado). Para avaliação ambiental considerou-se as médias mensais de 5.200 km (P6) e 10.000 km (P19).

A Tabela 6 apresenta os resultados alcançados pelo grupo de veículos do tipo P6. Observa-se inicialmente que houve uma redução geral das emissões em 0,8%, ou seja, reduzindo, aproximadamente, 246 kg de CO₂ emitidos mensalmente. A emissão de poluentes atmosféricos locais alcançou redução que variou entre, aproximadamente, 18 g e 1.800 g.

No caso dos veículos tipo P19, na Tabela 7, observa-se que houve uma redução geral da emissão de poluentes atmosféricos de 7,1%. Para o CO₂, deixou-se de emitir, aproximadamente, 4.500 kg por mês. Para os poluentes locais houve variação de redução entre 122 g e 12.206 g.

Quando se extrapolam os resultados da avaliação ambiental do estudo de caso para o caso geral, observar que, em função do comportamento linear com a distância percorrida e com a economia de combustível (Equação 6), o percentual de redução da emissão de CO₂ e poluentes atmosféricos locais tanto para os caminhões com compactadores, como para os veículos tipo P19 se manteria em 0,8% e 7,1%. No caso dos caminhões com compactador, esta situação resultaria na redução mensal de emissão de 21.287 kg de CO₂ e entre 573 g (MP) e 57.366 g (NO_x). Para os veículos tipo P19, a redução de emissão mensal corresponderia a 48.694 kg de CO₂ e sua variação seria entre 11.300 g (MP) e 131.224 g (NO_x).

Nos trabalhos utilizados para revisão bibliográfica deste estudo, também foi possível identificar a redução de poluentes atmosféricos locais e da emissão de CO₂. Tais estudos consideram apenas a redução dos aspectos ambientais como sendo equivalente a redução do consumo de combustível. Portanto, não foi possível comprar as reduções em g/km para os poluentes atmosféricos locais e em kg/km para os GEE (CO₂). Dessa forma, os resultados do trabalho de Boriboonsomsin *et al.* (2010) também são os que mais se assemelham aos resultados do projeto apresentado.

Por fim, as pesquisas apontadas na revisão bibliográfica deste estudo sinalizaram o potencial do treinamento de *Eco-driving* para a redução de impactos ambientais e de custos na operação da atividade de transporte. No trabalho de Barkenbus (2010), aspectos sociais também foram citados. No entanto, o presente estudo, não apenas cita tais impactos, mas também quantifica a redução de combustível, as emissões de poluentes atmosféricos locais, a redução da emissão dos GEE e realiza uma avaliação financeira para

implementação do treinamento, apurando o custo e o retorno do capital investido, demonstrando assim, o caráter científico desse trabalho.

6. CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi apresentar os resultados obtidos por meio de um projeto realizado com 22 motoristas e 11 veículos pesados que realizam a coleta e transferência de lixo em área urbana na cidade do Rio de Janeiro.

As técnicas de *Eco-driving* identificadas podem ser consideradas de fácil aplicação, exequíveis e confiáveis para a avaliação de seus resultados. Isso potencializa a aplicação da técnica de *Eco-driving* como uma opção a ser consideradas pelos tomadores de decisão de empresas públicas ou privadas.

O *Eco-driving* se mostrou uma ferramenta que pode aprimorar a sustentabilidade no transporte de resíduos urbanos, pois, além de proporcionar o retorno financeiro em função da quilometragem percorrida por conta de seus efeitos sobre a economia de combustível, também reduz a emissão de CO₂, um dos principais GEE e também de poluentes atmosféricos locais.

Numa visão ampla, a técnica de *Eco-driving* contribui com o tripé da sustentabilidade, considerando aspectos econômicos e ambientais. Quanto ao aspecto econômico observa-se que a opção de aplicar o treinamento de *Eco-driving* em uma frota de veículos de carga pode ser avaliada financeiramente, de forma, que seja possível identificar se é uma solução viável, considerando o investimento realizado e o retorno de capital.

Por meio da análise dos resultados, foi possível identificar que os benefícios financeiros podem ser representados pela economia mensal estimada para a frota dos caminhões com compactadores e dos veículos do tipo P19 (caso geral), que foi, respectivamente, de R\$ 8.100,00 e R\$ 34.161,00. Considerando que o investimento com o treinamento já está quitado, ao longo dos 5 anos haveria uma economia de cerca de R\$ 485.000,00 para a frota de caminhões compactadores e de cerca de R\$ 2 milhões para a frota de veículos tipo P19. Isto sem considerar os créditos de carbono.

Quanto ao aspecto ambiental, pode-se estimar a quantidade de poluentes atmosféricos emitidos antes e após a realização do treinamento de *Eco-driving*. Desta forma, pode-se apresentar a contribuição para o aspecto ambiental,

por meio da redução de emissão de poluentes atmosféricos e GEE.

Os benefícios ambientais estimados para estes mesmos dois casos são representados respectivamente por uma redução de 0,8% e 7,1% nas emissões de CO₂, principal gás de efeito estufa, e dos poluentes atmosféricos locais regulamentados no Brasil. Agregando os resultados para o caso geral, deixariam de ser emitidos, aproximadamente, 4 mil toneladas CO₂, no período de 5 anos (aproximadamente, 214 mil reais em créditos de carbono).

Verificou-se que o aprimoramento dos conhecimentos de boas práticas promoveu um maior bem estar aos motoristas, agregando valor ao capital humano. Além disso, as técnicas de *Eco-driving* colaboram para uma melhor atitude perante o tráfego e que pode minimizar a ocorrência de acidentes, na medida em que promove um trânsito mais seguro. Portanto, esta prática pode trazer resultados positivos também em relação ao aspecto social. Sendo assim, recomenda-se para estudo de futuros trabalhos, a questão de agregação de valor ao capital humano e a promoção de um trânsito mais seguro.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a C40 Cities Climate Leadership Group pelo suporte financeiro, à Confederação Nacional do Transporte (CNT), pelo apoio no treinamento dos motoristas e a COMLURB pela intermediação com a empresa operadora de coleta de resíduos urbanos na cidade do Rio de Janeiro e pelo fornecimento dos dados necessários para elaboração do projeto.

REFERÊNCIAS

Ando, R. e Nishihori, Y (2011): How does driving behavior change when following an eco-driving car? *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, v.20, p. 577–587. doi:10.1016/j.sbspro.2011.08.064

Barkenbus, J. N. (2010): Eco-driving: An overlooked climate change initiative. *Energy Policy*, v. 38 n.2, p. 762–769. doi:10.1016/j.enpol.2009.10.021

Barth, M. e Boriboonsomsin, K (2009): Energy and emissions impacts of a freeway-based dynamic eco-driving system. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v.14, n.6, p. 400–410. doi:10.1016/j.trd.2009.01.004

Barth, M. e Boriboonsomsin, K (2008): “Real-World CO₂ Impacts of Traffic Congestion”. *Transportation Research Registro* 2058, 163-171.DOI: 10.3141/2058-20

Boriboonsomsin, K., VU, A. e Barth, M. (2010): *Eco-Driving: Pilot Evaluation of Driving Behavior Changes Among U.S. Drivers*. University of California Transportation Center.

COMLURB (2013). *Banco de dados da Companhia Municipal de Limpeza Urbana do Município do Rio de Janeiro* (COMLURB), Rio de Janeiro, RJ.

Fernandes, V.A.; Deveza, A. C. P.; Dagosto, M. A. (2013): *Eco-driving: uma solução dentro da Logística Verde – aplicado a veículos de coleta de resíduos urbanos*. XXVII Congresso de Ensino e Pesquisa em Transportes (ANPET)

IPCC (2007). *Climate Change 2007: Synthesis Report*. Disponível em: www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr.pdf

IPEA (2012). *A Nova Lei de Diretrizes da Política Nacional de Mobilidade Urbana*. Comunicados do IPEA. 06 de janeiro de 2012. Disponível em: <http://www.ipea.gov.br>

CNT/SEST/SENAT (2012) – CNT (2012) *Caminhoneiro amigo do meio ambiente*. Brasília, DF: CNT. Disponível em: http://www.cnt.org.br/riomais20/resources/cartilhas/Caminhoneiro_o_B.pdf.

COPPE e Rio Prefeitura (2011). *Greenhouse Gas Inventory and Emissions Scenario of Rio de Janeiro, Brazil: Technical Summary*. Disponível em: <http://www.rio.rj.gov.br/web/smac/exibeconteudo?article-id=2351770>

GTZ (2005). *Sustainable Transport: A Sourcebook for policy-makers in developing cities*. Module 4f, Ecodriving. Federal Ministry for Economic Cooperation and development, Germany.

MCT (2004). Ministério da Ciência e Tecnologia (Ministry of Science and Technology), 2004. *Primeiro Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa*. Relatórios de referência para emissões e remoções de dióxido de carbono por conversão de florestas e abandono de terras cultivadas, Brasília.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA) (2011). *Primeiro inventário de emissões atmosféricas por veículos automotores rodoviários – relatório final*. Jan. 2011. Disponível em: http://www.mma.gov.br/estruturas/163/_publicacao/163_publicacao27072011055200.pdf.

MME (2012). *Estudo associado ao plano decenal de energia – PDE 2021: consolidação de bases de dados do setor de transporte: 1970-2010*. Nota técnica SDB-Abast No 1/2012. Empresa de Pesquisa Energética – Ministério de Minas e Energia – Brasil.

Novaes, A. G., *Logística e gerenciamento da cadeia de distribuição*, 2ª Ed, Rio de Janeiro, Elsevier, 2004.

Ogburn, M. L.; Ramroth, A. B. (2008). *Transformational trucks: Determining the energy efficiency limits of a class-8 tractor trailer*. Snowmass, CO: Rocky Mountain Institute. Publ.T08-08.

Oliveira, L. A., Dagosto, M. A., Fernandes, V. A e Oliveira, C. M. (2014). A financial and environmental evaluation for the introduction of diesel-hydraulic hybrid-drive system in urban waste collection. *Transportation Research Part D*, v. 3, pp. 100–109. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2014.05.021>

Silva, W. B (2007). *Aprendizagem: um estudo da contribuição da capacitação de motoristas de caminhão para a redução dos custos operacionais da frota*. Dissertação (Mestrado) Pontifícia Universidade Católica de São Paulo.

Stevenson W. J. (1981) *Estatística Aplicada à Administração*. São Paulo: Editora Harbra Ltda.

Sivak, M; Schoettle, B (2012): Eco-driving: Strategic, tactical, and operational decisions of the driver that influence vehicle fuel economy. *Transport Policy*, v. 22, p. 96–99.

TRANSPORT RESEARCH BOARD (2010). *Committee to Assess Fuel Economy Technologies for Medium-, and Heavy-Duty Vehicles*. Technologies and Approaches to Reducing the

Fuel Consumption of Medium-and Heavy-duty Vehicles.
National Academy Press.

UNITED NATIONS (1998). *Kyoto Protocol*, Kyoto. Nations
framework convention on climate change.

WORLD BANK (2011a). *Brazil Green Freight Transport
Report: World Bank NLTA: "Mainstreaming Green Trucks in
Brazil"*.

WORLD BANK (2011b). *Guangzhou Green Trucks Pilot
Project: Technology Pilot Report for the World Bank "Truck
GHG Emission Reduction Pilot Project"*.

Zarkadoula, M; Zoidis, G; Tritopoulou, E (2007): Training urban
bus drivers to promote smart driving: A note on a Greek eco-
driving pilot program. *Transportation Research Part D:
Transport and Environment*, v.12, n.6, p. 449–451.
doi:10.1016/j.trd.2007.05.002