

Avaliação do ganho na redução de CO₂ devido a disponibilidade de um sistema metroviário: Aplicação no metrô do Rio de Janeiro

Carlos Eduardo Sanches de Andrade¹, Marcio de Almeida D'Agosto² e Ilton Curty Leal Junior³

Resumo: A emissão de CO₂ pelos sistemas metroviários é geralmente muito pequena. Haveria maior emissão, caso seus passageiros não dispusessem do sistema e tivessem que utilizar outros modos de transporte. Adicionalmente, aumentariam os congestionamentos, crescendo o consumo de combustível e produzindo maior emissão. A existência do sistema metroviário evita a emissão que seria produzida por mais veículos em circulação e os consequentes congestionamentos, favorecendo, também, o aumento da densidade populacional em seu entorno, o que contribui para mais viagens a pé ou por bicicleta. Este trabalho visa analisar a influência dos sistemas metroviários na emissão de CO₂, sob uma abordagem que considere tanto a emissão produzida quanto a emissão evitada, evidenciando os benefícios de menor emissão de carbono de todo o sistema de trânsito, proporcionados pelo sistema metroviário. Uma metodologia é apresentada e aplicada no Metrô do Rio de Janeiro, quantificando a emissão líquida evitada pelo sistema.

[DOI:10.4237/transportes.v21i2.653](https://doi.org/10.4237/transportes.v21i2.653).

Palavras-chave: Emissão CO₂, sistema metroviário, metrô.

Abstract: The emission of CO₂ by subway systems is usually very small. There would be greater emission if the passengers did not use the system and had to use other modes of transport. Additionally congestion, fuel consumption and pollutant emission would increase. The existence of the subway system avoids the emission that would be produced by most vehicles on the road and the resulting congestion, favoring also the increase in population density in its surroundings, which contributes to more trips on foot or by bicycle. This study aims to analyze the influence of the subway systems in CO₂ emissions, under an approach that considers both the produced emission and the avoided one showing the benefits of lower carbon emissions of the entire transit system, provided by the subway system. A methodology is presented and applied in Metrô do Rio de Janeiro, quantifying the net avoided emission by the system.

Keywords: Emission of CO₂, system subway, subway.

1. INTRODUÇÃO

A emissão de dióxido de carbono (CO₂) em sistemas de transportes responde por cerca de 25% do total de emissões globais, sendo o transporte privado responsável pela maior parte dessas emissões. É estimado que até 2050 a energia utilizada nos sistemas de transporte dobre, o que aumentaria ainda mais a emissão desses gases, caso ações de mitigação dessas emissões não sejam implantadas (IEA, 2009). No Brasil, a quantidade de gases do efeito estufa emitidos em 2011 pelo setor de transportes chegou a 192 milhões de toneladas, medidas em CO₂ equivalente (CO₂e), correspondendo a 48,5% do total de emissões associadas à matriz energética brasileira (EPE, 2012).

A consciência ambiental vem crescendo em todo mundo e os governos vêm criando políticas de estímulo à redução da emissão de gases do efeito estufa. Algumas cidades definiram quantitativamente objetivos de redução, como, por

exemplo, Londres, que estabeleceu programa de redução de emissões de carbono no setor de transportes, propondo o corte de 60% das emissões até 2025, tendo como base o ano de 1999 (London Underground, 2009).

Ainda que objetivos explícitos de redução não sejam compromissados por governos ou entidades privadas, há um crescente interesse em criar sistemas sustentáveis, não poluentes. No setor de transportes, a melhoria e maior utilização dos sistemas de transporte público podem contribuir para a solução do problema, por meio da diminuição do uso de transporte privado. Os sistemas metroviários, na condição de transporte de massa, ocupam lugar de destaque na solução de transporte das grandes cidades e contribuem significativamente na redução da emissão de CO₂ porque, além de terem uma baixa emissão, evitam a emissão que seria produzida caso seus passageiros, por não terem a opção do metrô, tivessem que usar modos de transporte mais poluentes, como, por exemplo, automóveis.

O objetivo deste trabalho é o de analisar o comportamento dos sistemas metroviários dentro do sistema de transporte da região, no que tange à emissão de CO₂ produzida e evitada, aplicando essa análise no MetrôRio - Metrô do Rio de Janeiro. A abordagem adotada utiliza, parcialmente, a metodologia da APTA – *American Public Transportation Association*, que contempla os impactos na emissão de carbono causados pelos usuários de transporte público que, na ausência desse sistema, passariam a utilizar o automóvel. O sistema de transporte público analisado pela APTA inclui o sistema metroviário, ferroviário e de ônibus. Adaptações na metodologia da APTA foram necessárias para contemplar cenários que considerem a ausência apenas do sistema me-

¹ Carlos Eduardo Sanches de Andrade, Programa de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. (e-mail: carlos.andrade@pet.coppe.ufrj.br)

² Marcio de Almeida D'Agosto, Programa de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. (e-mail: dagosto@pet.coppe.ufrj.br)

³ Ilton Curty Leal Junior, Departamento de Administração e Administração Pública, Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, RJ, Brasil. (e-mail: iltoncurty@gmail.com)

troviário e em que uma parcela dos usuários do metrô passe a utilizar automóveis e também outros modos de transporte público.

A seção 1 constitui-se como uma introdução, onde houve uma breve contextualização do estudo em questão e foi definido o objetivo. A seção 2 analisa a emissão de CO₂ produzida pelos sistemas metroviários, apresentando os diferentes tipos de emissão bem como dados de emissão de sistemas selecionados. A seção 3 analisa a emissão de CO₂ evitada pelos sistemas metroviários, apresentando o modelo da APTA e sua aplicação no sistema de transporte público de Nova Iorque. A seção 4 trata da aplicação do modelo da APTA adaptado, analisando as emissões de CO₂ no Metrô do Rio de Janeiro e as emissões evitadas pela sua existência. A seção 5 trata das conclusões deste trabalho.

2. EMISSÃO DE CO₂ PRODUZIDA PELOS SISTEMAS METROVIÁRIOS

Os sistemas metroviários contabilizam suas emissões seguindo as diretrizes do IPCC – Painel intergovernamental sobre mudanças climáticas e a Norma ISO 14.064 – Gases de efeito estufa. De acordo com essas normas, no escopo 1 são calculadas as emissões diretas, agrupadas em fontes estacionárias, como geradores e equipamentos e em fontes móveis, como veículos de manutenção, auxiliares ou integrantes do sistema. No escopo 2, são relacionadas as emissões indiretas pelo uso da eletricidade. O escopo 3, item opcional, cobre outras emissões indiretas, podendo ser levantado em diferentes itens, sendo os mais comuns: viagens de funcionários e o tratamento de resíduos (IPCC, 2006; ISO, 2007).

No Brasil, o Metrô de São Paulo levantou e publicou o inventário de gases do efeito estufa em 2011, referente ao ano de 2010, e o Metrô do Rio de Janeiro concluiu o seu inventário referente ao ano de 2011.

2.1. O grupo CoMET/NOVA

Sistemas metroviários, de diferentes regiões do mundo, constituíram uma comunidade com o intuito de, em parceria, criarem projetos cobrindo diversas áreas de interesse comum, em busca das melhores práticas de operação e gerenciamento. O grupo CoMET reúne sistemas metroviários de grande porte, que, em 2012, são representados pelos sistemas metroviários de Londres, Paris, Hong Kong, Berlim, Pequim, Moscou, México, Madri, Nova Iorque, Shanghai, Santiago e São Paulo. O grupo NOVA reúne sistemas metroviários de médio porte, que, em 2012, são representados pelos sistemas metroviários de Buenos Aires, Barcelona, Bangkok, Nova Délhi, Glasgow, Lisboa, Milão, Montreal, Newcastle Nexus, Nápoles, Rio de Janeiro, Singapura, Sidney, Taipei e Toronto.

Entre as áreas de interesse desses grupos está a emissão de CO₂. Projetos que buscam analisar e sugerir medidas de minimização dessas emissões foram conduzidos nos últimos anos, estando alguns em andamento.

2.2. A emissão direta de CO₂ na operação de sistemas metroviários

A emissão direta de carbono em sistemas metroviários é usualmente muito pequena, sendo provocada pela queima de combustíveis e fuga de gases refrigerantes na utilização de máquinas e equipamentos em suporte às atividades do metrô, como aquecimento de escritórios e depósitos, uso de veículos de suporte, de manutenção e de segurança (viaturas operacionais), gases utilizados em manutenção, soldagem e ar condicionado.

Como exemplos da pouca relevância das emissões diretas no total das emissões, os dados do Metrô de São Paulo, em 2010, apontam que elas representaram 2,7% do total de suas emissões (Metrô de São Paulo, 2011) e no Metrô de Londres representaram, em 2008, 1,8% do total de suas emissões (London Underground, 2009).

Eventualmente, o sistema metroviário pode utilizar linhas de ônibus exclusivas para cobrir parte da rede. Essas emissões produzidas pelos ônibus são contabilizadas nas emissões diretas, o que poderá acarretar uma maior representatividade da emissão direta no percentual total de emissões de CO₂ e do sistema metroviário.

2.3. A emissão indireta de CO₂, pelo uso da eletricidade, na operação de sistemas metroviários

Os sistemas metroviários estão entre os maiores consumidores individuais de energia elétrica. Grandes quantidades de energia elétrica são necessárias para prover a força de tração que movimenta os trens. O consumo de eletricidade do Metrô de Londres representa 2,8% de todo o consumo da cidade, sendo o maior consumidor individual dos fornecedores locais de energia elétrica (London Underground, 2009). Usualmente, essa energia elétrica não é gerada localmente e sim adquirida de terceiros, e as emissões correspondente de gases, de acordo com a metodologia do IPCC, são contabilizadas no escopo 2, ou seja, como emissões indiretas, de terceiros, porque ocorrem na geração da energia elétrica. A Tabela 1 mostra o consumo de eletricidade e a correspondente emissão de CO₂ e para alguns sistemas metroviários.

O valor das emissões depende das fontes energéticas utilizadas pelo sistema gerador dessa energia. Nesse aspecto, o Brasil é favorecido por utilizar predominantemente fontes hídricas, de menor emissão que as térmicas. Em 2011, de acordo com dados do EPE (2012), as usinas hidrelétricas foram responsáveis por 81,7% da geração de energia elétrica. A parcela das usinas nucleares correspondeu a 2,7%; carvão, petróleo e gás a 9,5%; biomassa a 6,5% e eólica a 0,5%. Como o sistema elétrico no Brasil é interligado através do SIN – Sistema Interligado Nacional, nos inventários de emissão são utilizados os fatores médios nacionais de emissão do setor elétrico, divulgados pelo governo brasileiro.

A medida passageiro-km é a forma mais simples de realizar comparações de resultados, sendo utilizada em diferentes sistemas de transportes. Para obter esse resultado,

Tabela 1. Consumo de eletricidade e emissão de carbono em metrôs

Metrô	Ano	Consumo Energético (TWh)	Emissão (tCO ₂ e)	% ¹	Fonte
Nova Iorque	2008	3,4	-	-	MTA (2008)
Londres	2008	1,0	619.000	82	London Underground (2009)
São Paulo	2010	0,5	28.496	68	Metrô de São Paulo (2011)
Rio de Janeiro	2011	0,2	5.690	72	MetrôRio (2012)

¹Porcentagem da emissão em relação à emissão total

devem-se multiplicar os totais correspondentes de passageiros transportados no ano pela extensão média das viagens, baseada em pesquisas de origem-destino dessas viagens. Dados de 2011 (MetrôRio, 2012) revelam grande variação de resultados nas emissões de carbono, em gramas por passageiro-km, pelo uso da eletricidade, de metrôs componentes do grupo CoMET/NOVA. Constatou-se resultados que variam de 2 a 130 gCO₂ por passageiro-km, decorrentes das variadas matrizes energéticas usadas na geração de energia, do consumo de eletricidade e da carga de passageiro-km.

Segundo o inventário de emissões do Metrô de São Paulo a sua emissão, em 2010, pelo uso da eletricidade, foi de 4 gCO₂e por passageiro-km, o que representa 27,5 vezes menos gases de efeito estufa que os automóveis e 12,5 vezes menos que os ônibus (Metrô de São Paulo, 2011).

2.4. A emissão total produzida pelos sistemas metroviários

Outros tipos de atividades necessárias ao funcionamento do metrô, porém não ligadas diretamente à operação do sistema, como o tratamento do lixo e efluentes, uso de papel e água, viagens de funcionários, etc. produzem emissões, que, de acordo com a norma do IPCC, devem ser contabilizadas no escopo 3. Os valores podem variar muito em função dos itens cobertos, que são opcionais. No Metrô de Londres, em 2008, constituiu 16% do total (London Underground, 2009) e no Metrô de São Paulo, em 2010, constituiu 30% do total (Metrô de São Paulo, 2011). Em ambos, essas emissões foram maiores que as emissões diretas e menores que as emissões pelo uso da eletricidade.

A apresentação da emissão total rateada por passageiro-km é mais adequada para a comparação com outros meios de transporte. Conforme dados da MTA – *Metropolitan Transport Authority*, a autoridade de transportes de Nova Iorque, o metrô da cidade de Nova Iorque emitiu, entre emissões diretas e indiretas, em 2011, aproximadamente 42 gCO₂e por passageiro-km, um resultado seis vezes menor que a emissão de carros com um único ocupante (MTA, 2012).

A autoridade de transporte de Londres realizou um estudo que relata a emissão por passageiro-km de diferentes meios de transporte da cidade: metrô, trem, ônibus, carros, taxis e outros (carga, aviação). O resultado desse estudo comprova a superioridade dos sistemas metroviários em relação aos outros meios de transporte quanto à menor emissão de carbono, com a emissão de 50 gCO₂e / passageiro-km, mostrando melhor desempenho que os carros particulares e taxis, com emissão de 110 gCO₂e / passageiro-km (TFL, 2006).

3. EMISSÃO DE CO₂ EVITADA POR MEIO DA IMPLANTAÇÃO DE SISTEMAS METROVIÁRIOS

Um sistema metroviário transporta uma grande quantidade de passageiros-km por dia. Caso o sistema não existisse, parte dessas viagens seria feita em veículos com maior emissão de carbono por passageiro-km. Pode-se então afirmar que o usuário, ao realizar uma viagem no sistema metroviário, evita a emissão de certa quantidade de dióxido de carbono, que haveria caso o sistema não estivesse disponível, e a viagem fosse realizada por automóvel, ou outro modo de transporte de maior emissão que o metrô.

Os primeiros estudos realizados nos Estados Unidos sob esse enfoque tiveram uma abrangência maior, simulando a indisponibilidade de todo o sistema de transporte público e não apenas o metroviário. O objetivo era levantar a carga adicional de viagens de automóveis que seria inserida no tráfego e o conseqüente impacto na emissão de carbono. Foi analisado como seria o sistema de transporte na região se o sistema de transporte público (incluindo o sistema metroviário) não tivesse sido implantado. Os usuários teriam então as opções de: a) Utilizar automóveis ou veículos motorizados similares; b) utilizar bicicletas ou realizar a viagem a pé; e c) não realizar a viagem. Uma parte significativa dos usuários utilizaria automóveis e similares, acarretando um grande aumento na emissão de CO₂. Pode-se dizer que o uso do sistema de transporte público resulta em uma menor emissão total de CO₂, evitando a emissão adicional que haveria com mais viagens de automóveis. O objetivo daquela abordagem era mostrar que o sistema de transporte público causava um menor impacto ambiental em relação à emissão de CO₂ do que um sistema de transporte baseado em automóveis e similares (APTA, 2009).

3.1. O modelo da APTA

A abordagem de considerar a emissão evitada pelo sistema de transporte público foi recomendada pela APTA, que apresentou a metodologia mostrada na Figura 1, adaptada para simular a ausência apenas do sistema metroviário, ao invés de simular a ausência de todo o sistema de transporte público, conforme definido na abordagem original.

A lógica da nova abordagem adaptada é considerar que a implementação do sistema de transporte público, baseada no sistema metroviário, altera o perfil do trânsito na região, favorecendo o uso deste sistema e diminuindo o uso de veículos, como automóveis, taxis, ônibus, motos e vans. Menos veículos circulando no trânsito significa menor emissão de CO₂, além de acarretar em um melhor desempenho dos veículos que trafegam devido ao menor congestionamento do trânsito. O sistema metroviário favorece o crescimento da densidade populacional na região por ele atendida e pode encorajar os usuários a complementarem seu itinerário com bicicleta ou pequenas caminhadas, o que contribui para um menor uso de veículos. Ao contrário, a falta de um sistema metroviário tende a acarretar o espalhamento da região, com comunidades se distanciando fisicamente, favorecendo a construção de casas e edifícios maiores e incentivando um maior uso de veículos nos longos deslocamentos. Os *layouts* das cidades seriam então totalmente diferentes, com implicações na economia, no transporte, etc. A dificuldade na aplicação desse modelo consiste na quantificação de cada um de seus elementos: na ausência do sistema metroviário qual seria a escolha do usuário, transporte público ou privado? Que trajetos seriam percorridos? Como ficaria o trânsito na região?

A metodologia considera os seguintes elementos:

- (a) **Débito**: a emissão gerada pelo sistema;
- (b) **Crédito**: a emissão evitada pelo sistema, dividida em “*mode shift*”, que representa os ganhos obtidos pelo fato de usuários de carros passarem a usar o sistema, conduzindo a uma menor quantidade de viagens de carros; “*congestion relief*”, que representa os ganhos obtidos pelo menor congestionamento do trânsito causado pelo menor número de carros nas ruas e conduzindo a um melhor desempenho no

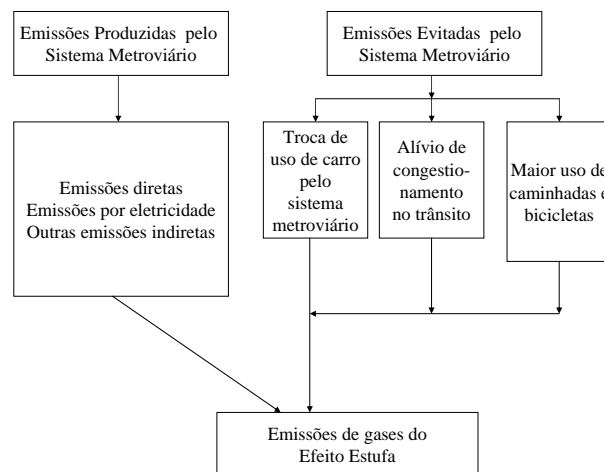


Figura 1. Tipologia dos impactos de um sistema metroviário sobre a emissão de gases. Adaptada de APTA (2009)

uso de combustível dos veículos que transitam; e “*land use*”, que representa os ganhos obtidos pela maior densidade populacional, que conduz a viagens mais curtas e maior uso de caminhadas e bicicleta.

A quantificação desse resultado é realizada por meio da diferença entre o débito e o crédito. Pode-se concluir, pela diferença débito-crédito, se o sistema metroviário tem emissão líquida positiva ou negativa. A emissão líquida positiva significa que o sistema produz emissão de CO₂, enquanto que a emissão líquida negativa significa que o sistema evita a emissão de CO₂ no sistema de trânsito da região por ele coberta.

3.1.1. Deslocamento do modo de transporte – fator “*mode shift*”

Caso o sistema de transporte público não existisse qual seria a escolha dos seus usuários? No estudo da APTA (2009) as opções eram usar autos, desistir da viagem, ou fazê-la a pé ou de bicicleta. O fator “*mode shift*” representava, portanto, o percentual dos usuários de transporte público que passariam a utilizar automóveis. Assim o valor 0,47 significa que 47% dos usuários utilizariam automóveis e 53% não fariam viagens, ou as fariam a pé ou de bicicleta.

Segundo FDT (2008), são quatro as maneiras mais usuais de se fazer a estimativa do fator “*mode shift*”:

(a) Simular a ausência do sistema de transporte público em modelos de demanda de viagens. Requer uma grande quantidade de dados e complexos algoritmos que levem em conta vários fatores como níveis de utilidade para os usuários das escolhas dos modos de transporte, condições socioeconômicas dos usuários, etc. Um estudo preliminar foi utilizado pela MTA (2009), coletando e comparando dados de viagens em Nova Iorque nos anos de 2000 a 2006. Comparando o acréscimo de 2006 relativamente a 2000, encontrou-se um fator “*mode shift*” de 0,29 na região central de Nova Iorque, que pode ser explicado pela maior densidade populacional, favorecendo caminhadas e o uso de bicicletas e menor propriedade de automóveis. Já em *Long Island*, o fator “*mode shift*” atingiu 0,92, refletindo a menor densidade populacional e a maior propriedade de automóveis.

(b) Examinar o comportamento das viagens durante longas interrupções do sistema público, como em greves. Foi utilizado nas greves de transporte público em Nova Iorque, em 2005 e Los Angeles, em 2003.

(c) Realizar pesquisa com os usuários sobre suas preferências de viagens. É recomendado perguntar ao usuário que

opção ele escolheria na ausência do sistema de transporte público, oferecendo as opções: dirigir sozinho, usar um carro com motorista, usar transporte solidário em carros compartilhados, usar taxi, caminhar, usar bicicleta e não realizar a viagem.

(d) Utilizar um conjunto de padrões baseado no tamanho da população. Esta última alternativa é utilizada quando as demais não são viáveis. Segundo APTA (2009) os usuários que migrariam para o automóvel teriam uma relação direta com a população atendida pelo sistema.

3.1.2. Análise do congestionamento – fator “*congestion relief*”

Na ausência do sistema de transporte público, muitos usuários utilizariam veículos próprios, aumentando a quantidade de veículos em circulação nas vias compartilhadas. O efeito produzido seria um aumento no congestionamento das vias, diminuindo a velocidade dos veículos, consumindo mais combustível e aumentando a emissão de CO₂. O conceito de congestionamento implica na determinação de um ponto limite que, ultrapassado, define a existência do congestionamento. Esse ponto limite é um valor definido para a relação volume/capacidade. Os trechos de vias que superarem esse valor são considerados congestionados. O objetivo, então, é estimar a quantidade adicional de combustível queimada e que foi consequência do aumento do congestionamento provocado pela quantidade adicional de veículos em circulação. Para atingir esse objetivo, é necessário ter uma grande base de dados das principais vias, com dados de velocidades coletados, por faixas horárias, cobrindo as 24 horas. Nos Estados Unidos, a TTI – *Texas Transportation Institute* produz anualmente o relatório *Urban Mobility Report* com dados detalhados de várias regiões do país. A determinação do fator “*congestion relief*” é feita através de (APTA, 2009):

(a) Aplicação de modelos regionais de demanda de viagens: retira-se o sistema do modelo e recalculam-se as horas-veículos de atrasos e/ou o combustível consumido no congestionamento.

(b) Extrapolação a partir dos dados do *Urban Mobility Report*, dividido nas seguintes etapas:

Etapa 1: Estabelecer uma correlação entre densidade de tráfego e consumo de combustível.

A teoria sugere que a relação entre volume de tráfego e níveis de congestionamento é exponencial (MTA, 2009). Uma determinada via tem uma capacidade de tráfego que

permite o fluxo livre de veículos. Ultrapassada essa capacidade, começa a haver um congestionamento, que cresce exponencialmente, fazendo com que ocorram mudanças nos modos de operação dos motores, aumentando o consumo de combustíveis e, conseqüentemente, a emissão de CO₂. Portanto, há uma correlação entre a densidade de tráfego e o consumo adicional de combustível. A densidade de tráfego pode ser expressa pela quantidade veículo-milha por milha de pista. A construção da curva exponencial que expressa a relação entre a densidade do tráfego e o consumo adicional de combustível permite encontrar o valor desse consumo adicional de combustível para um valor conhecido de densidade de tráfego.

Etapa 2: Usar o fator “*mode shift*” para calcular a quantidade adicional de veículos-milha incorporada ao tráfego.

Etapa 3: Estimar o consumo adicional de combustível produzido pelo congestionamento usando a curva densidade de tráfego \times excesso de combustível.

Etapa 4: Calcular a emissão de CO₂ produzida por esse consumo adicional. Valores regionais, se disponíveis, devem ser utilizados.

3.1.3 Uso do solo – fator “*land use*”

Nas regiões com grande densidade populacional, com diversidade no uso do solo e com um eficiente sistema de transporte público, integrado com o sistema metroviário, as pessoas têm uma menor necessidade de usar automóveis do que nas regiões com baixa densidade populacional. Aumentar a densidade populacional e ao mesmo tempo implantar um bom sistema de transporte público é, portanto, uma maneira eficiente de minimizar as emissões de carbono.

A metodologia sugere dois métodos para a avaliação do impacto do fator “*land use*”:

- Um método que se baseia na análise geoespacial de proximidade ao transporte público; e
- Um método que usa uma série de comparações entre o uso do solo e os veículos-km (quantidade de veículos multiplicada pelo total de quilômetros percorridos) em regiões com diferentes usos do solo.

3.2. Aplicação da metodologia original da APTA no sistema de transporte público de Nova Iorque

A MTA aplicou essa metodologia ao sistema de transporte público de Nova Iorque, em 2009, utilizando um modelo de demanda de viagens na região, simulando a retirada do seu sistema e avaliando o fator “*mode shift*”. Estimou o excesso de combustível consumido no congestionamento por meio das seguintes etapas: a) Utilização de dados de veículo-milha por pista e excesso de combustível devido a viagens em condições de congestionamento, dados esses relativos à região atendida pelo MTA e extraídos do *Urban Mobility Study*, produzido pelo TTI; b) análise de regressão para determinar a relação entre incrementos nos veículos-milha e o excesso de combustível produzido, construindo a curva exponencial dessa relação; c) cálculo dos acréscimos de veículos-milha produzidos para cenários simulados; d) utilização da curva construída para se encontrar o excesso de combustível associado; e e) determinação da emissão de CO₂ do excesso de combustível utilizando dados da TCR – *The Climate Registry*, organização americana que estuda e registra dados sobre emissão de gases do efeito estufa. Posteriormente, essa emissão devida ao congestionamento foi

somada à emissão causada pelo fator “*mode shift*” para obter o impacto desses dois fatores (MTA, 2009).

Com a utilização de modelos matemáticos e uma grande base de dados, a MTA (2009) procurou avaliar o fator “*land use*”. O primeiro método, que se baseia na análise geoespacial de proximidade ao transporte público, foi abandonado ao constatar-se que não tinha a precisão esperada. O segundo método, que usa uma série de comparações entre o uso do solo e os veículos-km em regiões com diferentes usos do solo, foi adotado. Considerando a ausência do sistema da MTA, foi simulado o padrão de trânsito nas áreas mais densas da região, em três cenários: a) Seria igual ao padrão das áreas de subúrbio de Nova Iorque e New Jersey; b) seria igual ao padrão médio das cidades do país; e c) seria igual ao padrão de uma cidade emergente, Dallas.

O resultado final da aplicação da metodologia original da APTA no sistema de transporte público de Nova Iorque chegou à conclusão que cada um dos três fatores contribuiria para a emissão evitada na seguinte proporção: “*mode shift*” = 28,03%, “*congestion relief*” = 8,86% e “*land use*” = 63,11% (MTA, 2009).

Atualizando os dados para o ano de 2010, o sistema de transporte público de Nova Iorque emitiu cerca de 2 milhões de toneladas de CO₂e, porém evitou, numa estimativa conservadora, a emissão de 17 milhões de toneladas de CO₂e. Esse estudo concluiu que a existência do transporte público de Nova Iorque representa uma emissão líquida evitada de 15 milhões de toneladas de CO₂e, equivalente a 4.717 gramas de CO₂e evitados a cada viagem média realizada por um passageiro (MTA, 2012).

4. APLICAÇÃO DO MODELO DA APTA NO METRÔ DO RIO DE JANEIRO: EMISSÃO DE CO₂ PRODUZIDA E EVITADA – DÉBITOS E CRÉDITOS

A rede atual do Metrô do Rio de Janeiro tem 46 km de extensão e 35 estações, com uma média diária de 670 mil passageiros. O MetrôRio também disponibiliza uma extensão, em ônibus exclusivo, no serviço chamado de “Metrô na Superfície”, em que ônibus fazem trajetos que não são atendidos pelo sistema metroviário.

A seguir, serão analisadas e estimadas as emissões produzidas e evitadas pelo sistema do Metrô do Rio de Janeiro, sendo aplicado parcialmente o modelo da APTA. Das emissões evitadas, somente será abordada a emissão pelo fator “*mode shift*”. Não será abordada a emissão evitada pelos fatores “*congestion relief*” e “*land use*”, devido à inexistência dos dados necessários, no Rio de Janeiro, a esses tipos de análises.

4.1. Emissões de CO₂ e produzidas pelo Metrô do Rio de Janeiro

O Metrô do Rio de Janeiro concluiu seu primeiro inventário de gases, relativo ao ano de 2011. Com base em dados fornecidos pelo MetrôRio (2012), o valor total das emissões em 2011 foi de 7.945,41 tCO₂e, composto de emissões diretas (Escopo 1) com 2.029,47 tCO₂e (25,54% do total das emissões), emissões indiretas pelo uso da eletricidade (Escopo 2) com 5.690,27 tCO₂e (71,62% do total das emissões), e outras emissões indiretas, por viagens de funcionários e manuseio de resíduos sólidos (Escopo 3) com 225,67 tCO₂e (2,84% do total das emissões). A maior parte das

emissões diretas (91,63%) foi devida à frota locada dos 32 ônibus que realizaram o serviço do “Metrô na Superfície”.

Assim, em termos anuais, pode-se debitar ao sistema a emissão de 7.945,41 tCO₂e. Utilizando uma medida mais apropriada para comparações, como passageiro-km, o valor chega a 4,08 gCO₂e por passageiro-km, que é um valor extremamente pequeno, quando comparado a outros modos de transporte, como, por exemplo, os carros nos grandes centros urbanos brasileiros, que atingem 126,8 gCO₂e por passageiro-km (IPEA, 2011). Quando analisada somente a emissão indireta, pelo uso da eletricidade, o valor da emissão é de apenas 2,92 gCO₂e por passageiro-km.

4.2. Emissões de CO₂ evitadas pelo MetrôRio através do fator “mode shift”

A metodologia adotada para a determinação da emissão de CO₂ evitada pelo Metrô do Rio de Janeiro por meio do fator “mode shift” consiste das seguintes etapas:

Etapa 1: Determinação das escolhas dos usuários por outros modos de transporte a serem utilizados em caso da ausência do Metrô do Rio de Janeiro.

Etapa 2: Determinação da quantidade de passageiros-km de cada modo de transporte escolhido.

Etapa 3: Determinação da quantidade adicional de veículos-km correspondentes a cada modo de transporte e a cada tipo de combustível utilizado, com as correspondentes quantidades de cada tipo de combustível.

Etapa 4: Determinação da emissão adicional produzida por cada modo de transporte e combustível.

Na falta de dados de perfil de frotas e uso de combustíveis na cidade do Rio de Janeiro serão utilizados dados referentes ao Estado do Rio de Janeiro.

Desenvolvimento da Etapa 1: O Metrô do Rio de Janeiro realiza obrigatoriamente pesquisas diretas com seus usuários duas vezes por ano, com o objetivo de conhecer o perfil dos usuários e avaliar o nível de serviço prestado do sistema. Uma das perguntas feitas é: “Para realizar essa mesma viagem, que outro meio de transporte usaria se não tivesse o MetrôRio?” A Tabela 2 mostra o resultado da pesquisa realizada em setembro de 2012, pelo IBOPE – Instituto Brasileiro de Opinião Pública e Estatística. Os valores mostrados referem-se a pesquisas realizadas durante as viagens em todos os horários da Operação Comercial, e também considerando somente as viagens nos horários de picos.

Os trens, por usarem energia elétrica, tal como os metrô, não terão impacto sensível na emissão de CO₂ e não serão considerados neste estudo. Será usada a pesquisa e a quantidade de passageiros-km de todos os horários da Operação Comercial para os autos, motos e taxis, uma vez que cada passageiro viajará em um veículo, independente do horário, gerando sempre uma demanda adicional. Será usada a pesquisa e a quantidade de passageiros-km dos horários de picos para os ônibus e vans, uma vez que nesses horários não há capacidade ociosa nos veículos em circulação, gerando uma demanda adicional.

Desenvolvimento da Etapa 2: Conforme dados fornecidos pelo MetrôRio (2012), referente ao total de passageiros-km transportados, em 2011, e com base nos percentuais da Tabela 2, foi calculado o trabalho de transporte para cada modo, conforme Tabela 3.

Desenvolvimento da Etapa 3: Com base nos dados levantados, determinou-se a quantidade adicional de veículos-km

correspondentes a cada modo de transporte e a cada tipo de combustível utilizado, com as correspondentes quantidades em litros ou metros cúbicos, conforme Tabela 4.

Tabela 2. Escolha de modo de transporte no caso da ausência do MetrôRio (MetrôRio, 2012)

<i>Escolha do Meio de Transporte</i>	<i>Todos os horários da operação comercial (%)</i>	<i>Somente nos horários de pico (%)</i>
Ônibus	69	72
Trem	10	10
Carro particular ou moto	9	8
Taxi	5	5
Van	4	4
A pé	2	1
Bicicleta	1	0

Desenvolvimento da Etapa 4: De acordo com a COPPETEC (2011), os fatores de emissão são: 1,20 kgCO₂/l para o etanol anidro; 1,15 kgCO₂/l para o etanol hidratado; 2,25 kgCO₂/l para a gasolina A; 2,71 kgCO₂/l para o diesel e 2,06 kgCO₂/m³ para o GNV. A tabela 5 apresenta as emissões evitadas pelo Metrô do Rio de Janeiro, em toneladas de CO₂e, através do fator “mode shift”.

Tabela 3. Passageiros-quilômetro de cada modo escolhido

<i>Escolha do Meio de Transporte</i>	<i>Todos os horários da operação comercial</i>	<i>Somente nos horários de pico</i>
Ônibus	1.343.249.513	677.418.250
Trem	194.673.842	94.085.868
Carro particular ⁽¹⁾	145.421.360	79.032.129
Moto ⁽²⁾	29.785.098	5.645.152
Taxi	97.336.921	47.042.934
Van	77.869.537	37.634.347
A pé	38.934.768	9.408.587
Bicicleta	19.467.384	-
Total	1.946.738.424	940.858.680

Notas: (1) e (2) para a separação de autos e motos, foi considerada a mesma relação existente entre eles na frota do Rio de Janeiro, que é: 83% de autos e 17% de motos (COPPETEC, 2011), que transformará o resultado de 9% da pesquisa em: 7,47% para autos e 1,53% para motos.

Em relação às emissões de CO₂e, verifica-se um valor total de 51.308 tCO₂e, das quais 10.269 tCO₂e correspondem ao etanol, cujas emissões são consideradas neutras, uma vez que já foram ou serão absorvidas no plantio da cana de açúcar ou de outra fonte vegetal. Portanto, desconsiderando essas emissões neutras, restam 41.039 tCO₂e, que devem ser creditadas ao sistema metroviário por conta do fator “mode shift”.

4.3. Consolidação débitos-créditos de emissão

A relação entre a emissão produzida (7.945 tCO₂e) e a evitada (41.039 tCO₂e) indica que, para cada tonelada de CO₂e produzida pelo Metrô do Rio de Janeiro, cerca de 5 toneladas são evitadas. A emissão líquida evitada será de 33.094 tCO₂e, resultando em uma emissão evitada por passageiro-km de 17 gramas de CO₂e. Esse valor é bem conservador e referente apenas ao fator “mode shift”. Como foram utilizados fatores médios de emissão, que não são os mais adequados aos horários de pico, o valor real da emissão líquida evitada seria, na verdade, maior. A contabilização dos fatores “congestion relief” e “land use” tornaria a emissão líquida evitada ainda maior.

Tabela 4. Consumo de combustível de cada modo escolhido

Modo	Variável ⁽²⁾	Auto ⁽³⁾	Motos ⁽³⁾	Taxis ⁽³⁾	Ônibus ^(4,5)	Vans ^(4,5)	Total ⁽¹⁾ Combustível
Gasolina	% da frota	52,57%	97,56%	4,34%	-	-	5.679.986
	veículo-km	76.448.009	29.058.341	4.224.422	-	-	
	litros de combustível	4.857.634	553.925	268.427	-	-	
Etanol	% da frota	28,81%	2,44%	19,66%	-	-	8.854.006
	veículo-km	41.895.894	726.756	19.136.439	-	-	
	litros de combustível	6.356.489	201.604	2.295.913	-	-	
GNV	% da frota	18,62%	-	76,00%	-	-	8.421.127
	veículo-km	27.077.457	-	73.976.060	-	-	
	m ³ de combustível	2.256.455	-	6.164.672	-	-	
Diesel	% da frota	-	-	-	100%	100%	4.026.637
	veículo-km	-	-	-	8.467.728	3.136.196	
	litros de combustível	-	-	-	3.681.621	345.016	

Notas: (1) Rendimentos dos veículos: Automóveis e Taxis 12km/l para gasolina, 8,65 km/l para etanol e 12 km/m³ para GNV. Motos: 40 km/l para gasolina e 25 km/l para etanol. Ônibus: 2,3 km/l. Vans: 9,09 km/l. (2) Já está sendo computada nos litros de combustível os valores referentes a frota flex (indicando, na situação mais conservadora, que 11,14% dos veículos flex usarão gasolina) e a parcela média do etanol anidro na gasolina ao longo de 2011, de 23,75%. (3) Considerou-se que cada passageiro viajará em 1 veículo (4) Lotação de 80 passageiros por ônibus e de 12 passageiros por Van. (5) Considerou-se os passageiros-km do horário de pico e admitiu-se que nos demais horários pode-se, conservadoramente, admitir que a demanda será absorvida pela capacidade ociosa, não gerando necessidade de veículos-km adicionais.

Fontes: COPPETEC (2011), MA (2012), SMTR (2012)

Tabela 5. Emissões evitadas pelo MetrôRio, em tCO₂e, através do fator “mode shift”

Tipo de veículo	ETANOL	GASOLINA	GNV	Diesel
Autos	7.385	10.930	4.648	-
Motos	240	1.246	-	-
Taxis	2.644	604	12.699	-
Ônibus	-	-	-	9.977
Vans	-	-	-	935
TOTAL	10.269	12.780	17.347	10.912

5. CONCLUSÕES

A emissão direta de carbono pelos sistemas metroviários normalmente representa uma parcela pequena do total das emissões, atingindo percentuais inferiores a 3% nos sistemas pesquisados, com exceção de sistemas que possuem linhas de ônibus exclusivas para cobrir parte da rede, como o Metrô do Rio de Janeiro, cuja emissão direta representa 25,54% do total das emissões, sendo as linhas de ônibus responsáveis por 91,63% do total dessas emissões diretas.

O resultado da emissão indireta, pelo uso da eletricidade, é dependente da matriz energética utilizada na geração da energia. No Brasil, a predominância de hidrelétricas nessa matriz acarreta um baixo valor para essa emissão, quando comparada a outros metrô do mundo. Enquanto os metrô do grupo CoMET/NOVA produziram, em 2011, emissões que alcançaram até 130 gCO₂e por passageiro-km, o Metrô do Rio de Janeiro produziu no mesmo ano 2,92 gCO₂e por passageiro-km.

As outras emissões indiretas, por serem opcionais, são objeto de tratamento parcial, permitindo que os metrô selecionem os itens a serem cobertos, de forma não padronizada. Dependendo dos itens considerados em cada sistema metroviário, esse resultado pode apresentar resultados variados, conforme constatado nos dados pesquisados: 30% no Metrô de São Paulo; 16% no Metrô de Londres; e 2,84% no Metrô do Rio de Janeiro.

A proposta do estudo consistiu em avaliar a emissão de carbono pelos sistemas metroviários, com intuito de verificar os resultados que pudessem considerar outros aspectos,

além da própria emissão produzida durante a operação dos sistemas. Foi apresentada uma metodologia que considera os efeitos benéficos que a disponibilidade do sistema metroviário traz ao setor de transportes de uma região, quantificando o ganho de redução de CO₂ em função da redução da utilização de outros modos de transportes mais poluentes no deslocamento dos habitantes.

O objetivo do estudo foi atingido por meio de estimativa das emissões produzidas e evitadas em virtude da existência de um sistema metroviário em uma região. A metodologia da APTA foi adaptada para aplicação no Metrô do Rio de Janeiro, sendo desenvolvido apenas o fator “mode shift”, de uma maneira conservadora, obtendo-se um resultado líquido de emissões evitadas, em 2011, de 33.094 tCO₂e, equivalente a 17 gramas de CO₂e por passageiro-km.

Conclui-se que existe um ganho na redução da emissão de CO₂ em uma região devido a existência de um sistema metroviário com demanda adequada. Caso esse sistema não existisse, os habitantes realizariam os seus deslocamentos em outros modos de transportes mais poluentes, aumentando a emissão de CO₂ nessa região. Com isso, foi possível mostrar uma visão da real dimensão da emissão de carbono causada e evitada pelos sistemas metroviários, por meio da aplicação dessa metodologia no Metrô do Rio de Janeiro.

Um estudo mais abrangente da metodologia da APTA, contemplando também os fatores “congestion relief” e “land use”, certamente resultaria em resultados maiores para as emissões líquidas evitadas. A grande base de dados coletados em muitas vias americanas e apresentados no relatório *Urban Mobility Report*, da TTI, facilitou a aplicação

completa dessa metodologia em sistemas de transporte público americanos, como em Nova Iorque. A escassez de dados confiáveis e a inexistência de dados públicos nas vias da cidade do Rio de Janeiro inviabilizaram a aplicação completa da metodologia para o Metrô do Rio de Janeiro.

Outro fator limitador ao estudo desenvolvido foi a utilização de fatores médios nos cálculos das emissões, sendo desprezadas as diferenças de fatores de emissões nos horários de baixo e alto movimento. Os fatores médios não representam as situações reais do tráfego, principalmente nos horários de picos, fornecendo resultados de emissões menores que os reais. Contudo, dados sobre modos de operação do motor em situações de congestionamento são escassos no Brasil.

A proposta de novos estudos se baseia no aprofundamento das limitações desse trabalho, como a análise dos fatores “congestion relief” e “land use”. Propõe-se avaliar o congestionamento das principais vias da cidade do Rio de Janeiro, determinando a capacidade de fluxo nas vias em diferentes faixas horárias e elaborar um inventário sobre os modos de operação do motor em situações de congestionamento, determinando os fatores médios de emissões veiculares de acordo com o nível de congestionamento das vias. Outro estudo sugerido seria realizar uma avaliação do ciclo de vida de um sistema metroviário, de acordo com a norma ISO 14040, com o objetivo de estimar a quantidade de CO₂ emitida durante o tempo de vida útil desse sistema, desde a sua construção até a sua operação durante um tempo de vida estimado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- APTA (2009) *Recommended practices for quantifying greenhouse gas emissions from transit*. American Public Transportation Association. Disponível em: <<http://www.apta.com/resources/hottopics/sustainability/Documents/Quantifying-Greenhouse-Gas-Emissions-APTA-Recommended-Practices.pdf>> (Acesso em 15/8/12).
- COPPETEC (2011) *Inventário de emissões atmosféricas por veículos automotores do Estado do Rio de Janeiro*. Fundação Coordenação de Projetos, Pesquisas e Estudos Tecnológicos. Disponível em: <http://download.rj.gov.br/documentos/10112/975111/DLFE-51272.pdf/Inventario_2011.pdf> (Acesso em 20/11/12).
- EPE (2012) *Balanco energético nacional*. Empresa de Pesquisa Energética. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Resultados_Pre_BEN_2012.pdf> (Acesso em 02/08/12).
- FDT (2008) *Conserve by transit: Analysis of the energy consumption and climate change benefits of transit*. Florida Department of Transportation. Disponível em: <<http://planfortransit.com/wp-content/ConservebyTransitFinalReport.pdf>> (Acesso em 6/11/12).
- IEA (2009) *Transport, energy and CO₂*. International Energy Agency. Disponível em <<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/transport2009.pdf>> (Acesso em 1/8/12).
- IPCC (2006) *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Intergovernmental panel on climate change. Disponível em <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol1.html>> (Acesso em 3/5/13).
- IPEA (2011) *Emissões Relativas de Poluentes do Transporte Motorizado de Passageiros nos Grandes Centros Urbanos Brasileiros*. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Disponível em <http://desafios2.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/TDs/td_1606.pdf> (Acesso em 03/05/13).
- ISO (2007) *ISO 14.064:2007 Gases de efeito estufa*. International Organization for Standardization.
- London Underground (2009) *London Underground carbon footprint*. Disponível em: <<http://www.tfl.gov.uk/assets/downloads/corporate/london-underground-carbon-footprint-2008.pdf>> (Acesso em 13/8/12).
- MA (2012) *Mistura carburante automotiva (Etanol anidro/Gasolina) – Cronologia*. Ministério da Agricultura. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/arq_editor/file/Desenvolvimento_Sustentavel/Agroenergia/Orientacoes_Tecnicas/01-Mistura%20etanol%20anidro-gasolina-CRONOLOGIA%28Atualiz_02_09_2011%29.pdf> (Acesso em 28/11/12).
- MetrôRio (2012) *Informações fornecidas por funcionários do Metrô do Rio de Janeiro*: Anderson Correa, Gerente de Saúde e Meio Ambiente; Rejane Micaelo, Gerente de Inteligência de Mercado; Daniel Habib, Gerente de Operação e Márcia Baptista, Coordenadora de Gestão da Informação e Energia.
- Metrô de São Paulo (2011) *Inventário de emissões de gases do efeito estufa Metrô 2010*. Disponível em <<http://www.metro.sp.gov.br/metro/sustentabilidade/pdf/inventario-emissoes-gases.pdf>> (Acesso em 10/7/12).
- MTA (2008) *Renewable energy task report*. Metropolitan Transport Authority. Disponível em <<http://www.mta.info/sustainability/pdf/MTA%20Renewable%20Energy%20Report%2010%2029%2008.pdf>> (Acesso em 30/7/12).
- MTA (2009) *Impact of public transportation on GHG in the MTA area*. Metropolitan Transport Authority. Disponível em <<http://www.mta.info/sustainability/pdf/MTA%20Carbon%20Model%20Report%20&%20Presentation.pdf>> (Acesso em 15/7/12).
- MTA (2012) *Sustainability report*. Metropolitan Transport Authority. Disponível em: <<http://www.mta.info/sustainability/pdf/2012Report.pdf>> (Acesso em 20/7/12).
- SMTR (2012) *Serviço de transporte de taxis no Rio de Janeiro*. Secretaria Municipal de Trânsito do Rio de Janeiro. Disponível em <<http://www.taxi-library.org/rio/deoliveira.pdf>> (Acesso em 25/11/12).
- TFL (2006) *Surface Advisory Panel*. Transport for London. Disponível em <<http://www.tfl.gov.uk/assets/downloads/Agenda-and-Papers-SAP-31-05-06.pdf>> (Acesso em 10/08/12).