

# Avaliação dos sistemas metroviários nas emissões de CO<sub>2</sub>: análise comparativa das emissões por automóveis, ônibus e metrô

*Evaluation of subway systems in CO<sub>2</sub> emissions: Comparative analysis of emissions from cars, buses and subways*

Carlos Eduardo Sanches de Andrade<sup>1\*</sup> , Márcio de Almeida D'Agosto<sup>2</sup> 

## RESUMO

O setor de transportes é responsável por uma parcela das emissões globais de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Os estudos científicos publicados sobre emissões de CO<sub>2</sub> pelos sistemas de transportes de passageiros tratam basicamente de resultados envolvendo apenas as emissões relacionadas ao consumo dos combustíveis dos automóveis e ônibus. Nos metrô, geralmente são consideradas as emissões relacionadas à geração da energia elétrica necessária para prover a força de tração dos trens. Não foram identificadas publicações específicas ou padronizadas sobre outras abordagens de cálculos das emissões pelos metrô. Com isso, este estudo visa fornecer uma contribuição científica no estudo geral das emissões de CO<sub>2</sub> pelos metrô, definindo conceitualmente cinco abordagens de cálculos e realizando uma análise comparativa dos resultados das emissões de CO<sub>2</sub> por automóveis, ônibus e metrô. O resultado desta pesquisa permitiu quantificar a real contribuição dos metrô quanto à redução das emissões totais do setor de transportes. Na abordagem da energia de tração dos trens, concluiu-se que os Metrô de São Paulo e Rio de Janeiro emitem 63,5 vezes menos do que os automóveis e 8 vezes menos do que os ônibus.

**Palavras-chave:** emissões; CO<sub>2</sub>; automóveis; ônibus; metrô.

## ABSTRACT

The transportation sector is responsible for a portion of the global emissions of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>). Scientific studies published on CO<sub>2</sub> emissions by passenger transport systems treat basically results involving only the emissions related to fuel consumption of cars and buses. As for subways, usually emissions related to the generation of electrical energy needed to provide the traction force of the trains are considered. No specific or standardized publications on other approaches to calculate emissions for subways were identified. Thus, this study aims to provide a scientific contribution to the general study of CO<sub>2</sub> emissions by subways, conceptually defining five approaches of calculations and conducting a comparative analysis of CO<sub>2</sub> emissions by cars, buses and subways. The result of this research allowed to quantify the actual contribution of subways on the reduction of total emissions from the transportation sector. In the traction power of trains approach, it was concluded that the subways of São Paulo and Rio de Janeiro emit 63.5 times less than cars and 8 times less than buses.

**Keywords:** emissions; CO<sub>2</sub>; automobiles; bus; subways.

## INTRODUÇÃO

As emissões de gases do efeito estufa (GEE) pelos sistemas metroviários, medidos em dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), podem ser calculadas e analisadas sob diferentes abordagens, dependendo dos aspectos a serem considerados. Assim sendo, o objetivo deste trabalho é analisar a emissão desse dióxido pelos metrô, definindo conceitualmente cinco abordagens de emissões e apresentando resultados de aplicações de todas elas, comparando seus resultados com as emissões de CO<sub>2</sub> dos principais meios de transporte urbano de passageiros do mundo:

os automóveis e os ônibus. Depois de realizada a análise comparativa das emissões desse dióxido dos automóveis, ônibus e metrô em diversas cidades do mundo, é possível concluir qual meio de transporte avaliado representa a melhor solução sob o ponto de vista de redução das emissões totais de CO<sub>2</sub> do setor de transportes de passageiros. Os GEE estão associados a alterações climáticas, incluindo o aumento médio na temperatura global e suas consequências prejudiciais para a humanidade. O principal GEE é o CO<sub>2</sub>. Gabriele *et al.* (2013) relatam que, ao mesmo tempo em que gera inúmeros benefícios para a sociedade,

<sup>1</sup>Universidade Federal de Goiás – Aparecida de Goiânia (GO), Brasil.

<sup>2</sup>Universidade Federal do Rio de Janeiro – Rio de Janeiro (RJ), Brasil.

\*Autor correspondente: carlos.sanches@ufg.br

Recebido: 26/08/2014 – Aceito: 02/01/2019 – Reg. ABES: 139710

o setor de transportes também é responsável por grandes impactos ambientais. A emissão de GEE no setor de transportes responde por cerca de 25% do total de emissões globais, sendo o transporte privado responsável pela maior parte dessas emissões, com a estimativa de que, até 2050, a energia utilizada nos sistemas de transporte dobre, tendo como base o ano de 2008, o que aumentaria ainda mais a emissão desses gases caso ações de mitigação dessas emissões não sejam implantadas (IEA, 2009).

A consciência ambiental vem crescendo em todo o mundo e os governos vêm criando políticas de estímulo à redução da emissão de GEE. Algumas cidades definiram quantitativamente objetivos de redução, como Londres, que instituiu programa de redução de emissões de carbono no setor de transportes, estabelecendo o corte de 60% das emissões até 2025, tendo como base o ano de 1999 (LU, 2009). O transporte público de Nova York estabeleceu a meta de redução global de 80% na emissão de GEE até 2050, tendo como base o ano de 2008 (MTA, 2009). No estado do Rio de Janeiro, foram estabelecidos, pelo Decreto nº 43.216, de 30 de setembro de 2011 (RIO DE JANEIRO, 2011), objetivos de redução, até 2030, de 30% nas emissões de GEE pelos transportes, em relação ao ano de 2010. Nesse contexto, os sistemas metroviários aparecem como parte da solução para um transporte sustentável.

Para uma avaliação mais precisa da emissão de CO<sub>2</sub> pelos sistemas metroviários, é necessário considerar outros aspectos além das emissões durante a operação do sistema. A avaliação de outras abordagens de emissões de CO<sub>2</sub> pelos metrô irá mostrar uma visão mais precisa da real dimensão da emissão causada pelos sistemas metroviários.

Este trabalho analisa a influência dos sistemas de transporte de passageiros por metrô na emissão de CO<sub>2</sub> sob cinco diferentes abordagens:

- emissão total produzida, de acordo com o inventário de emissões;
- emissão operacional, devido à energia elétrica total consumida na operação do sistema;
- emissão da energia elétrica de tração;
- emissão evitada pela própria existência do metrô, que diminui o uso de outros meios de transporte mais poluentes;
- emissão durante o ciclo de vida do sistema, desde a construção até seu fim de vida.

Apesar das vantagens ambientais de baixa emissão de CO<sub>2</sub> dos sistemas metroviários, continuam as pesquisas de procedimentos e tecnologias para aumentar a eficiência energética e diminuir o consumo de energia, havendo espaço para reduzir ainda mais a emissão dos metrô. As possíveis ações de mitigação incluem, entre outros, itens como ajuste nos sistemas de ventilação e ar condicionado, calibração dos trilhos, uso de tecnologias como “*regenerative braking*” e “*platform screen doors*”, ajuste dos intervalos entre viagens, controle da condução dos trens e uso de materiais mais leves e de menor emissão.

Este artigo está assim subdividido: na seção Metodologia, são descritas as emissões de CO<sub>2</sub> pelos sistemas metroviários, com apresentação dos conceitos das cinco abordagens de emissões definidas; na seção Resultados, são apresentadas e analisadas aplicações das cinco abordagens utilizadas na determinação das emissões por metrô do mundo, comparando esses resultados obtidos com a emissão dos automóveis e ônibus; na seção Discussão, são tratadas as possibilidades de mitigação das emissões nos sistemas metroviários, apontando caminhos que aumentam os benefícios de redução das emissões. Ao fim, em Conclusões, são apresentadas as inferências.

## METODOLOGIA

Sistemas metroviários, assim como outras empresas, contabilizam suas emissões seguindo o *Greenhouse Gas (GHG) Protocol*, ferramenta utilizada para entender, quantificar e gerenciar emissões de GEE. Ele foi originalmente desenvolvido nos Estados Unidos, em 1998, pelo World Resources Institute (WRI), sendo hoje utilizada mundialmente por empresas e governos para a realização de inventários de GEE (WRI, 2013). Essa metodologia é compatível com as diretrizes do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, na sigla em inglês) (IPCC, 2016) e com a Norma ISO 14.064 — gases de efeito estufa. De acordo com essa metodologia, o inventário de emissões de GEE da empresa será composto de três partes, denominadas “escopos”.

### Emissões totais de CO<sub>2</sub> pelos sistemas metroviários: inventários de emissões de GEE

No escopo 1, são calculadas as emissões diretas, ou seja, as emissões produzidas diretamente por fontes que pertencem ou são controladas pela empresa. No escopo 2, são relacionadas as emissões indiretas pelo consumo da eletricidade. Já o escopo 3, item opcional, cobre outras emissões indiretas, por fontes que não pertencem ou não são controladas pela empresa, podendo ser levantado em diferentes itens (ISO, 2007).

#### *Emissões diretas pelos sistemas metroviários: escopo 1*

Por não utilizar combustíveis fósseis em larga escala, já que o “combustível” dos trens dos metrô é a energia elétrica, que não é gerada localmente, e sim adquirida de terceiros, a emissão direta de CO<sub>2</sub> por esse meio de transporte é usualmente pequena. É provocada pela queima de combustíveis e fuga de gases refrigerantes na utilização de máquinas e equipamentos em suporte às atividades do sistema, como o uso de veículos e equipamentos de suporte, manutenção e segurança.

#### *Emissões indiretas, pela eletricidade, pelos sistemas metroviários: escopo 2*

Os sistemas metroviários estão entre os maiores consumidores individuais de energia elétrica. O Metrô de Londres consome mais de 1 TWh

por ano, valor que corresponde a 2,8% de todo o consumo da cidade, sendo o seu maior consumidor individual. Suas emissões de CO<sub>2</sub> por eletricidade, em 2008, foram de 619.000 tCO<sub>2</sub>e, representando 82% do total de emissões do metrô, sendo 2/3 provenientes dos serviços de trens (LU, 2009).

De acordo com MTA (2008), o Metrô de Nova York consome 3,4 TWh a cada ano. Em 2011, a operação do Metrô de São Paulo consumiu 562.000 MWh, sendo a tração elétrica dos trens responsável por aproximadamente 80% da energia consumida (METRÔ DE SÃO PAULO, 2014). Grandes quantidades de energia elétrica são necessárias para prover a força de tração que movimenta os trens. A energia elétrica também é utilizada nos equipamentos operacionais, nas estações, no sistema de ar condicionado, em prédios administrativos etc.

O valor das emissões depende das fontes energéticas utilizadas pelo sistema gerador dessa energia. Nesse aspecto, o Brasil é favorecido por utilizar predominantemente fontes hidroelétricas, de menor emissão que as térmicas. Em 2011, de acordo com dados do EPE (2012), as usinas hidrelétricas foram responsáveis por 82% da geração de energia elétrica no Brasil.

### **Outras emissões indiretas pelos sistemas metroviários: escopo 3**

Existem outros tipos de atividades necessárias ao funcionamento dos sistemas metroviários, porém não ligadas diretamente à operação do sistema, como o tratamento do lixo e efluentes, uso de papel e água, viagens aéreas de funcionários, decomposição e queima de resíduos, gás de cozinha, veículos locados, serviços de táxi e outras. Todas essas atividades produzem as outras emissões indiretas. Esses resultados podem variar muito em função dos itens cobertos, que não são padronizados, sendo esse escopo contabilizado de forma opcional.

### **As cinco abordagens das emissões de CO<sub>2</sub> pelos sistemas metroviários**

Existem diferentes abordagens para estimar a emissão de CO<sub>2</sub> pelos sistemas metroviários, dependendo dos aspectos a serem considerados. Na sequência, serão definidas cinco abordagens das emissões de CO<sub>2</sub> pelos sistemas metroviários.

#### **Abordagem da emissão total produzida**

É aquela descrita no inventário de emissões de GEE de acordo com a soma dos resultados dos três escopos da Norma ISO 14.064.

#### **Abordagem da emissão operacional**

É a emissão de CO<sub>2</sub> relacionada a toda operação do sistema metroviário, ou seja, a todo o consumo de eletricidade necessário à operação do sistema, seja a energia das estações, das instalações operacionais, de tração dos trens, sejam outras, sendo amplamente utilizada para fins

de comparação de resultados entre os sistemas metroviários (COMET, 2008). A diferença da abordagem da emissão operacional para a abordagem da emissão produzida é que, enquanto esta considera todos os três escopos, a primeira considera somente as emissões do escopo 2, pelo uso da eletricidade, desconsiderando as dos escopos 1 e 3.

#### **Abordagem da emissão da energia de tração dos trens do sistema metroviário**

É a emissão de CO<sub>2</sub> relacionada somente ao “combustível” dos trens do metrô, que é a eletricidade que realiza a movimentação dos trens. Ela está diretamente ligada ao consumo de energia de tração dos trens, desprezando outros tipos de consumo de energia elétrica do sistema, como em prédios administrativos, estações, etc. Se trata de um componente das emissões do escopo 2, sendo a mais apropriada para a comparação de resultados com outros meios de transportes, visto que ela analisa somente a emissão provocada pelo combustível.

#### **Abordagem da emissão evitada pela existência do sistema metroviário**

As emissões evitadas pela existência do sistema metroviário em uma grande cidade devem ser calculadas por meio do fator “*mode shift*”, que tem como conceito o fato de que, sem a existência de um sistema metroviário, a cidade teria uma circulação muito maior de outros meios de transportes mais poluentes. Isso produziria, por si só, em geral, maior emissão. A diferença entre a evitada e a produzida fornecerá a emissão evitada líquida. Esse fator “*mode shift*” foi sugerido inicialmente em estudo da American Public Transportation Association (APTA, 2009), envolvendo todo o sistema de transporte público da cidade de Nova Iorque, sendo esse conceito utilizado em estudos específicos para os metrô.

É importante ressaltar a existência e importância do fator “*congestion relief*”, no qual o trânsito, sem a existência ou implantação do sistema metroviário, traria às ruas mais veículos em circulação, aumentando o nível de congestionamento e provocando maior queima de combustíveis fósseis e, conseqüentemente, aumentando as emissões de CO<sub>2</sub> do setor de transporte de uma grande cidade (APTA, 2009).

É possível estabelecer diferentes metodologias para se chegar ao resultado das emissões líquidas evitadas, cujo valor vai depender do que será considerado no cálculo da emissão produzida pelo sistema metroviário. As emissões líquidas evitadas serão determinadas por meio da diferença entre a emissão produzida pelo sistema e a sua emissão evitada. Pode-se concluir, por meio do resultado dessa diferença, se o sistema metroviário possui emissão líquida positiva ou negativa. A positiva significa que o metrô produz mais do que evita. A negativa significa que a existência do metrô compensa as emissões produzidas e ainda evita certa quantidade de emissão de GEE.

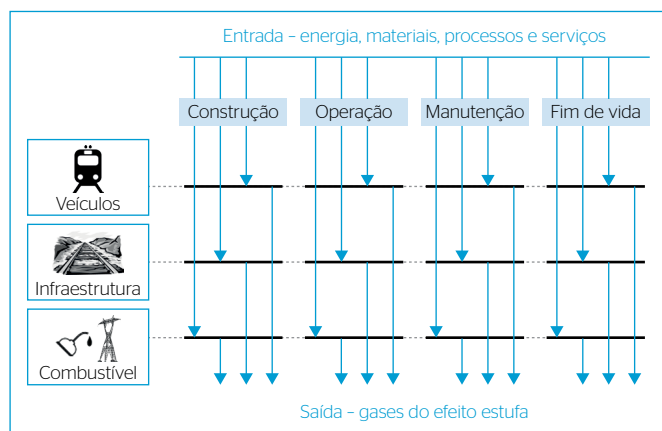
### Abordagem da emissão durante o ciclo de vida do sistema metroviário

É a estimativa da quantidade de CO<sub>2</sub> emitida durante o tempo de vida útil do sistema metroviário, em cada estágio do ciclo de vida, desde a construção do sistema até seu fim de vida, incluindo a operação e a manutenção. A norma ISO 14.040 aborda a emissão de CO<sub>2</sub> sob a avaliação do ciclo de vida, definindo-a como “compilação e avaliação das entradas, das saídas e dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida” (ISO, 2009). A emissão de CO<sub>2</sub> nos sistemas metroviários ocorre nas diversas fases do seu ciclo de vida, como mostrado na Figura 1.

A infraestrutura e os veículos compreendem as etapas de construção, operação, manutenção e fim de vida. Essa última etapa é geralmente desprezada por não haver propriamente um fim de vida completo, no sentido tradicional, que envolve o completo desuso e descarte do sistema metroviário. O combustível, que no metrô é usualmente a eletricidade, tem apenas a etapa de construção (ou seja, a geração da energia elétrica). Portanto, a abordagem do ciclo de vida nos sistemas metroviários pode ser dividida em componentes operacionais (operação dos veículos e operação da infraestrutura) e não operacionais (construção da infraestrutura, construção dos veículos, manutenção da infraestrutura e manutenção dos veículos).

A construção da infraestrutura do metrô inclui etapas como a construção de túneis, elevados e estações; a construção das estruturas que suportam os trilhos e a alimentação energética; e a manufatura dos insumos utilizados nessas construções e nos trilhos. A construção dos veículos inclui a fabricação dos trens e veículos de apoio. A manutenção da infraestrutura e dos veículos inclui a manufatura das peças de manutenção.

As escassas pesquisas publicadas sobre avaliações dos ciclos de vida em metrôs têm diferentes abordagens de escopo, contribuindo para a dificuldade de comparação entre os estudos realizados. A grande



**Figura 1** - Modelo conceitual dos componentes do ciclo de vida dos metrôs.

complexidade desse levantamento tem dificultado as pesquisas nessa área, contudo a utilização apenas da abordagem operacional em detrimento da abordagem do ciclo de vida resulta em uma informação deficiente sobre a real emissão pelos metrôs.

Os processos de fabricação do cimento e do aço, muito utilizados nos sistemas metroviários, consomem grandes quantidades de energia. São liberadas na produção de uma tonelada de cimento de 0,65 a 0,92 tCO<sub>2</sub>, com uma média mundial de 0,83 tCO<sub>2</sub> (IEA, 2007). A produção de uma tonelada de aço libera até 1,9 tCO<sub>2</sub> (WA, 2012). As emissões de CO<sub>2</sub> pela indústria de cimento em todo o mundo são responsáveis por cerca de 5% das emissões globais (WORREL *et al.*, 2001). A construção da infraestrutura de um sistema metroviário é a mais representativa das fases não operacionais quanto à emissão de CO<sub>2</sub> (MORITA *et al.*, 2011).

## RESULTADOS

A emissão de CO<sub>2</sub> pelos meios de transporte, quando analisada apenas pelos valores absolutos, pode não fornecer uma indicação precisa do desempenho desses sistemas quanto à emissão. Sistemas maiores tendem a emitir mais, embora possam ser mais eficientes do que os de menor emissão, por transportarem mais passageiros. A medição que melhor permite fazer comparações e tirar conclusões é a emissão por *pass-km*. Para obter resultados nessa medida deve-se dividir a emissão total pela quantidade de *pass-km*, que, por sua vez, é obtida multiplicando-se os totais correspondentes de passageiros transportados no período pela extensão média das viagens, com base em pesquisas de origem-destino dessas viagens.

### Aplicação da abordagem da emissão total produzida

Essa abordagem só pode ser realizada nos sistemas metroviários que realizam o inventário de emissões de GEE. Alguns desses sistemas estão relacionados na Figura 2, que mostra um quadro comparativo entre as emissões por *pass-km* dos metrôs analisados e dos automóveis e ônibus. As emissões dos sistemas metroviários estão contabilizadas em sua totalidade, abrangendo todos os escopos do Protocolo GHG, enquanto as emissões dos ônibus e automóveis se referem somente à queima do combustível.

Mas, ainda assim, a despeito da forma desvantajosa de comparação, observa-se que os sistemas metroviários têm emissão bem menor que os automóveis (de 2,7 a 42,3 vezes) e ônibus (de 1,3 a 5,3 vezes) nos sistemas analisados, com os melhores desempenhos dos Metrôs de São Paulo e do Rio de Janeiro.

### Aplicação da abordagem da emissão operacional

Para aplicação dessa abordagem, é necessário o levantamento de toda a eletricidade consumida pela empresa metroviária, ou seja, o resultado do escopo 2 do inventário de emissões de GEE.

O CoMet/Nova é um grupo internacional composto de sistemas metroviários que constituíram uma comunidade com o intuito de, em parceria, criarem projetos em busca das melhores práticas de operação e gerenciamento. Em 2011, as emissões desse grupo, pela abordagem operacional, apresentaram resultados que variaram de 2 a 130 gCO<sub>2</sub> por *pass-km*. No Metrô do Rio de Janeiro, em 2011, foi de 2,9 gCO<sub>2</sub> por *pass-km* (ANDRADE; D'AGOSTO; LEAL JÚNIOR, 2013). No de São Paulo, em 2011, a emissão sob essa mesma abordagem foi de 2,5 gCO<sub>2</sub> por *pass-km* (METRÔ DE SÃO PAULO, 2014).

Portanto, considerando os resultados das emissões dos automóveis e ônibus do Brasil, respectivamente 127 e 16 gCO<sub>2</sub> por *pass-km* (IPEA, 2011), conclui-se que as emissões sob a abordagem operacional dos Metrôs do Rio de Janeiro e de São Paulo são menores, respectivamente, 43,8 e 50,8 vezes, comparadas às emissões dos automóveis, e 5,5 e 6,4 vezes comparadas às emissões dos ônibus.

A Figura 3 apresenta resultados das emissões, sob a abordagem operacional, em três metrôs da Europa, comparando os seus resultados com as emissões dos automóveis e ônibus. Embora essa comparação não seja adequada, porque a emissão mostrada de automóveis e ônibus refere-se apenas ao consumo de combustível, enquanto a dos metrôs inclui o consumo de eletricidade de toda a empresa metroviária, continua a haver uma vantagem dos metrôs na emissão, que, nos três exemplos dos metrôs da Europa, varia de 1,1 a 4,8 vezes menores que a dos ônibus e de 2,4 a 7,4 vezes menores que a dos automóveis.

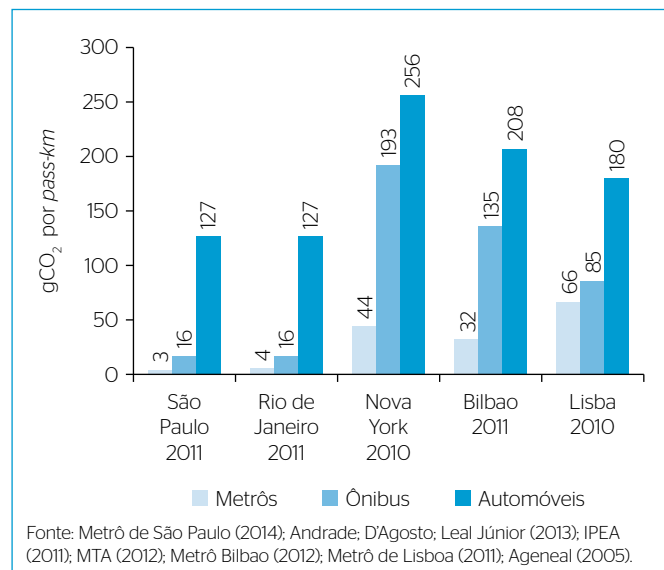
O bom desempenho quanto à menor emissão de CO<sub>2</sub> pelos metrôs brasileiros ocorre em virtude das diferentes matrizes energéticas usadas na geração de energia, do consumo de eletricidade e da carga de *pass-km*. O Brasil é favorecido por utilizar predominantemente fontes hidrelétricas, com menor impacto na emissão de CO<sub>2</sub> do que as fontes

térmicas, enquanto na maioria dos países da Europa, Ásia e Oceania existe a predominância de fontes térmicas, com um *mix* de carvão, óleo e gás (COMET, 2008).

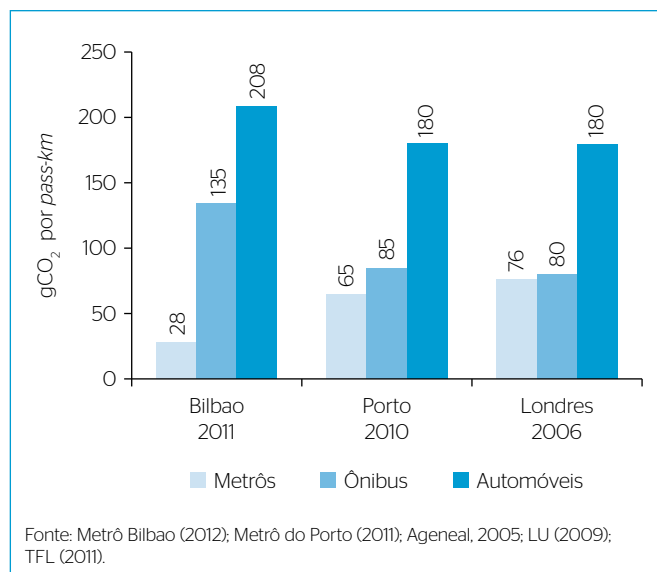
### Aplicação da abordagem da emissão da energia de tração dos trens dos metrôs

A Tabela 1 apresenta os resultados comparativos das emissões dos automóveis e ônibus com as da energia de tração dos trens dos metrôs em quatro cidades. Observa-se que os Metrôs do Rio de Janeiro e de São Paulo apresentaram os melhores resultados, em gCO<sub>2</sub> por *pass-km*, estando bem distanciados dos de Londres e de Lisboa e também das emissões do grupo CoMet/Nova (até 120 gCO<sub>2</sub>). Observa-se que todos os metrôs têm emissão menor que carros e ônibus.

Conclui-se que as emissões pela energia de tração dos trens, por *pass-km*, nos Metrôs do Rio de Janeiro e de São Paulo são menores, respectivamente, 63,5 vezes que as dos automóveis e 8 vezes que as dos ônibus. Constatou-se que, entre todos os metrôs das cidades americanas, apenas o de Baltimore apresentou valor de emissão, por *pass-km*, superior às dos ônibus, em virtude da baixa taxa de ocupação, com apenas 17% na média (FTA, 2010).



**Figura 2** - Emissões produzidas, em gCO<sub>2</sub> por *pass-km*, dos metrôs, ônibus e automóveis.



**Figura 3** - Emissões operacionais, em gCO<sub>2</sub> por *pass-km*, dos metrôs, ônibus e automóveis.

**Tabela 1** - Emissões, em gCO<sub>2</sub> por *pass-km*, de automóveis, ônibus e metrôs.

Países	Cidades	Automóveis	Ônibus	Metrôs
Brasil	São Paulo	127	16	2
Brasil	Rio de Janeiro	127	16	2
Inglaterra	Londres	170	80	58
Portugal	Lisboa	180	85	33

Fonte: Andrade e Bittencout (2013).

## Aplicação da abordagem da emissão evitada pela existência do metrô

Alguns sistemas metroviários publicaram dados sobre a emissão evitada pela existência de seus sistemas, como os de Lisboa e de São Paulo. Andrade, D'Agosto e Leal Júnior (2013) realizaram esse estudo para o Metrô do Rio de Janeiro. A Tabela 2 apresenta um resumo dos resultados encontrados e das metodologias adotadas nos cálculos das emissões evitadas para essas cidades. Os resultados obtidos indicam que, em todas as cidades analisadas, as emissões evitadas pela existência do metrô foram muito maiores do que as produzidas.

A cidade de Lisboa teve o resultado menos significativo em função da matriz energética local, já que Portugal importa 90% da energia primária que utiliza, sendo que grande parte dessa energia é de origem térmica (LISBOA E-NOVA, 2010), uma das fontes de energia mais emissoras do mundo. No Brasil, existe a predominância da fonte hidroelétrica na geração da energia elétrica, uma fonte energética com menor impacto na emissão de GEE. Há menor utilização de fontes térmicas na geração da energia elétrica do Brasil do que comparado a Portugal (IPEA, 2011).

## Aplicação da abordagem de todo ciclo de vida do sistema metroviário

Chester (2008) e Chester e Hovarth (2009b) avaliaram alguns metrô dos Estados Unidos com o objetivo de construir um inventário de ciclo de vida. Determinaram o impacto das fases não operacionais,

**Tabela 2** – Emissões líquidas evitadas dos Metrô de São Paulo, Rio de Janeiro e Lisboa.

	São Paulo	Rio de Janeiro	Lisboa
Ano base das emissões	2013	2011	2010
Emissões produzidas	Energia de tração dos trens	Resultado do inventário de GEE	Diretas + energia elétrica da empresa
	42.000 tCO <sub>2</sub> e	7.945 tCO <sub>2</sub> e	56.851 tCO <sub>2</sub> e
Emissões evitadas	"mode shift" + "congestion relief"	"mode shift"	"mode shift"
	862.000 tCO <sub>2</sub> e	41.039 tCO <sub>2</sub> e	130.275 tCO <sub>2</sub> e
Resultado = emissões líquidas evitadas	- 820.000 tCO <sub>2</sub> e	- 33.094 tCO <sub>2</sub> e	- 73.424 tCO <sub>2</sub> e
N. toneladas evitadas/ 1 tonelada produzida	20,5	5,2	2,3
Fontes	Metrô de São Paulo (2014)	Andrade; D'Agosto; Leal Júnior (2013)	Metrô de Lisboa (2011)

quantificando o crescimento das emissões em relação às operacionais, considerando o ciclo de vida. Os resultados desses estudos, divulgados em percentuais de emissões superiores das fases não operacionais comparadas às das fases não operacionais, foram de 75% no Metrô de Chicago; 94% no de Nova York; 119% na Linha BART do de São Francisco; e 146% na Linha MUNI do de São Francisco.

Chester e Hovarth (2009a) afirmam que o consumo de energia e as emissões de CO<sub>2</sub> nos sistemas metroviários são mais fortemente influenciados pelos componentes não operacionais do que nos sistemas de transporte rodoviários ou aéreos.

Chang e Kendall (2011) analisaram o projeto de construção da infraestrutura de uma ferrovia ligando São Francisco a Anaheim, concluindo que esse sistema evitaria, por ano, a emissão de 1,15 milhões de tCO<sub>2</sub> e pela migração de usuários de transportes mais poluentes, resultando em cerca de 2 anos para a recuperação dos efeitos da emissão de CO<sub>2</sub>. Morita *et al.* (2011) realizaram abrangente estudo do ciclo de vida de ferrovias e o aplicaram em uma ferrovia na cidade de Tóquio, no Japão. Encontraram valores em que, a partir do 22º ano após a inauguração, a emissão operacional já seria maior que a da construção da infraestrutura.

## DISCUSSÃO

Embora os sistemas metroviários tenham emissão de CO<sub>2</sub> geralmente menor que outros meios de transporte, há uma contínua busca por maneiras de minimizar ainda mais essas emissões, seja por novas tecnologias, seja por novos procedimentos. O grupo CoMet/Nova vem conduzindo projetos nesse sentido, nos quais as melhores práticas são disponibilizadas aos componentes do grupo. Individualmente, várias empresas que administram metrô também desenvolvem projetos para diminuir suas emissões. As ações de mitigação ocorrem tanto na operação do sistema quanto na manutenção, construção e expansão dos sistemas.

### Mitigação das emissões de CO<sub>2</sub> na operação dos metrô

Na operação do sistema metroviário, o principal fator que deve ser objeto de atenção no intuito de redução das emissões é a eficiência energética. Quanto menor a quantidade de energia elétrica utilizada por *pass-km*, menor será a emissão. Alguns fatores que contribuem para a eficiência energética são:

- Melhor sistema de ventilação nos túneis e estações, diminuindo a energia gasta no sistema de ar condicionado. Dentre os metrô do grupo CoMet/Nova, o de São Paulo é uma referência nesse item. Seu projeto contempla facilidades de ventilação, como túneis largos, sem comprimento excessivo, estações desenhadas privilegiando a ventilação e equipamentos de ventilação eficientes e bem

localizados, permitindo uma perfeita comunicação com o ambiente externo (COMET, 2012);

- Controle rigoroso da temperatura no interior dos trens, nas estações e nos túneis, possibilitando ajustes na ventilação e no ar-condicionado;
- Uso de “*regenerative braking*”, sistema que, na frenagem, reconduz a energia de volta ao sistema, ao invés de dissipá-la sob forma de calor;
- Uso de lâmpadas *light emitting diode* (LED) na iluminação dos trens e das estações;
- Uso de “*platform screen doors*”, sistema no qual o passageiro, ao entrar na estação, encontra uma porta fechada, a qual só se abre quando o trem chega. Dessa maneira, minimiza-se a entrada do ar quente externo no interior do trem, melhorando o desempenho do sistema de ar condicionado;
- Carga balanceada de passageiros por viagem, para evitar viagens com poucos passageiros. O ajuste dos intervalos entre as viagens deve propiciar melhor resultado na carga de passageiros por viagem, melhorando a relação energia consumida por *pass-km*;
- Uso de energia própria renovável. Projetos para geração particular de energia baseada em fontes renováveis dão pequenas contribuições, mas que, para metrô pequenos, podem alcançar 10% da energia total consumida (COMET, 2008).

A MTA, que administra o sistema metroviário de Nova York, planeja obter 80% de sua energia a partir de fontes renováveis até 2050. Para atingir essa meta, vai se juntar a um consórcio de entidades públicas em um projeto de geração de energia eólica. Também pretende reduzir o uso de energia operacional em 25% até 2019, tendo como base o ano de 2008, por meio de modernização de seus sistemas de energia, redução de peso e tecnologia de “*regenerative braking*”. Adotará o padrão *Leadership in Energy and Environment Design* (LEED) *Silver* para todos os projetos de construções novas ou de reformas. Para itens não cobertos por esse padrão, serão desenvolvidas internamente diretrizes de desenho “verde” baseadas nele (MTA, 2009).

### Mitigação das emissões de CO<sub>2</sub> na manutenção, construção e expansão dos metrô

A mitigação dos impactos ambientais é mais facilmente alcançada quando o projeto de construção do metrô também contempla esse objetivo. Um projeto orientado para causar o menor impacto ambiental possível deve utilizar uma tecnologia menos poluente, com maior eficiência energética, com o uso de materiais de menor emissão, com a escolha, entre as alternativas, daquela que represente a menor agressão ao meio ambiente. Para isso, é necessário planejar e levantar quantitativamente o impacto que o projeto causará à região. Diretrizes governamentais

influem decisivamente quando estabelecem metas de redução da emissão e apoio a projetos específicos nesse sentido.

## CONCLUSÕES

A emissão de CO<sub>2</sub> pelos sistemas metroviários pode ser analisada sob diferentes abordagens, sendo definidas cinco diferentes neste trabalho, ainda não abordadas anteriormente em literaturas publicadas. Foi realizada uma análise comparativa dos resultados das emissões de CO<sub>2</sub> pelos metrô, sob as cinco abordagens, com as emissões de outros meios de transporte de passageiros (automóveis e ônibus), sendo possível concluir que os metrô levam vantagem em relação ao menor impacto na emissão de CO<sub>2</sub> do que os automóveis e ônibus. Somente nos sistemas metroviários com uso extensivo de fontes térmicas ou baixa carga de utilização é que eventualmente os ônibus poderiam ter uma emissão menor, dependendo de sua carga. Na pesquisa realizada, somente o Metrô de Baltimore, nos Estados Unidos, foi identificado nessa situação.

Este estudo permitiu quantificar que os metrô brasileiros levam grande vantagem em relação à maioria dos do resto do mundo, em virtude de disporem de uma matriz energética baseada em hidrelétricas, com pouco uso de fontes térmicas. Em estimativas conservadoras, considerando os resultados da abordagem da emissão produzida, os Metrô do Rio de Janeiro e de São Paulo apresentam emissões médias menores do que os outros meios de transportes de passageiros: até 42,3 vezes menor que os automóveis e até 5,3 vezes menor que os ônibus.

As abordagens das emissões operacional e produzida não alteram muito esses resultados porque, geralmente, a emissão da energia de tração dos trens é o maior componente da emissão total, tipicamente uma fração maior que 2/3 da total. A abordagem mais usual e adequada para fins de comparação de resultados de emissões com outros meios de transportes é a da emissão da energia de tração dos trens. Ainda que a utilização das demais abordagens não seja adequada a uma comparação com os automóveis e os ônibus, porque nestes a emissão é usualmente medida apenas pela combustão dos motores, continua a haver uma vantagem dos metrô na maioria dos casos. Nos metrô analisados, a abordagem da emissão produzida teve valores de 2,7 a 42,3 vezes menores que a dos automóveis e de 1,3 a 5,3 vezes menores que a dos ônibus. A abordagem da emissão operacional apresentou valores de 43,8 a 50,8 vezes menores comparados às dos automóveis e de 5,5 a 6,4 vezes menores que as dos ônibus.

A abordagem da emissão evitada pela existência do sistema metroviário, por si só, já é uma evidência da superioridade do metrô em relação ao menor impacto na emissão. A existência da emissão evitada líquida revela que o metrô analisado possibilitou um menor uso de outros meios de transporte mais poluentes, contribuindo para a redução da emissão. Alguns metrô contabilizam e divulgam essas

emissões, embora não seja ainda uma prática comum. Foram encontrados resultados de estudos indicando que, para cada tonelada de GEE emitida pelos metrô, cerca de 2,3 a 20,5 toneladas são evitadas. O melhor resultado encontrado para essa abordagem foi para o Metrô de São Paulo, que considerou na metodologia adotada, além do fator “*mode shift*”, também o fator “*gestion relief*”.

A abordagem do ciclo de vida é ainda incipiente para metrô, devido à sua complexidade, mas algumas pesquisas indicam que as fases não operacionais aumentam significativamente a emissão total, podendo chegar a um aumento de até 146% em relação às emissões das fases operacionais.

A mitigação da emissão de CO<sub>2</sub> na operação dos metrô recai em ações para aumentar a eficiência energética, diminuir o consumo de energia e

manter uma boa taxa de ocupação. Na fase de projeto e construção, as ações recaem sobre a escolha de tecnologias e opções de menor emissão, como “*regenerative braking*”, “*platform screen doors*”, entre outros.

As limitações para um estudo abrangente das emissões de CO<sub>2</sub> dos metrô e outros meios de transporte de passageiros decorrem da falta de uma base de dados construída por meio de medições, obrigando os pesquisadores a realizarem estimativas de menor precisão.

A proposta para trabalhos futuros consiste no levantamento das emissões na fase de construção de metrô brasileiros, a fim de realizar uma aplicação prática da abordagem da emissão do ciclo de vida dos metrô. Os metrô a serem analisados podem ser projetos de expansão, como a Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro, ou de construção, como o Metrô de Curitiba.

## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA MUNICIPAL DE ENERGIA DE ALMADA (AGENEAL). (2005) *Estratégia local para as alterações climáticas*. AGENEAL. Disponível em: <[https://mycovenant.eumayors.eu/docs/seap/359\\_307\\_1302554853.pdf](https://mycovenant.eumayors.eu/docs/seap/359_307_1302554853.pdf)>. Acesso em: 7 jul. 2013.
- AMERICAN PUBLIC TRANSPORTATION ASSOCIATION (APTA). (2009) *Recommended practices for quantifying greenhouse gas emissions from transit*. American Public Transportation Association. Disponível em: <<https://www.apta.com/wp-content/uploads/Resources/resources/hottopics/sustainability/Documents/Quantifying-Greenhouse-Gas-Emissions-APTA-Recommended-Practices.pdf>>. Acesso em: 15 ago. 2012.
- ANDRADE, C.E.S.; BITTENCOURT, I.A. (2013) Emissões de CO<sub>2</sub> em sistemas metroviários: Abordagem da energia de tração dos trens. In: CONGRESSO NACIONAL DA ANPET, 27., 2013, Belém. *Anais...*
- ANDRADE, C.E.S.; D'AGOSTO, M.A.; LEAL JÚNIOR, I.C. (2013) Avaliação do ganho na redução de CO<sub>2</sub> devido à disponibilidade de um sistema metroviário: Aplicação no metrô do Rio de Janeiro. *Transportes*, v. 21, n. 2, p. 5-12. <http://doi.org/10.4237/transportes.v21i2.653>
- CHANG, B.; KENDALL, A. (2011) Life cycle greenhouse gas assessment of infrastructure construction for California's high-speed rail system. *Transportation Research Part D*, v. 16, n. 6, p. 429-434. <http://doi.org/10.1016/j.trd.2011.04.004>
- CHESTER, M. (2008) *Life-cycle environmental inventory of passenger transportation in the United States*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade da Califórnia, Berkeley. Disponível em: <<http://escholarship.org/uc/item/7n29n303>>. Acesso em: 3 ago. 2012.
- CHESTER, M.; HORVATH, A. (2009a) Environmental assessment of passenger transportation should include infrastructure and supply chains. *Environmental Research Letters*, v. 4, n. 2. <http://doi.org/10.1088/1748-9326/4/2/O24008>
- CHESTER, M.; HORVATH, A. (2009b) Life-cycle energy and emissions inventory for motorcycles, diesel, automobiles, school buses and metropolitan rails. Universidade da Califórnia, Berkeley. Disponível em: <<http://escholarship.org/uc/item/6z37f2jr.pdf>>. Acesso em: 10 ago. 2012.
- COMMUNITY OF METROS (COMET). (2008) *Energy Costs, Renewables and CO<sub>2</sub> Emissions Nova Phase 10 Case Study*. CoMet.
- COMMUNITY OF METROS (COMET). (2012) *Temperature and air quality - Final Report*. CoMet.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). (2012) *Balanco energético nacional*. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>>. Acesso em: 2 ago. 2012.
- FEDERAL TRANSIT ADMINISTRATION (FTA) (2010) *Public Transportation's Role in Responding to Climate Change*. Federal Transit Administration. Disponível em: <<https://www.transit.dot.gov/sites/fta.dot.gov/files/docs/PublicTransportationsRoleInRespondingToClimateChange2010.pdf>>. Acesso em: 5 jun. 2013.
- GABRIELE, P.D.; BRANDÃO, L.C.; TREINTA, F.T.; MELLO, J.C.C.B.S.; CARVALHAL, R. (2013) Comparação internacional da eficiência ambiental dos modos de transporte rodoviário e ferroviário. *Journal of Transport Literature*, v. 7, n. 1, p. 212-229. <http://dx.doi.org/10.1590/S2238-10312013000100006>
- INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (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](http://desafios2.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/TDs/td_1606.pdf)>. Acesso em: 1º jun. 2014.



- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). (2006) *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Disponível em: <<https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>>. Acesso em: 19 jun. 2014.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). (2007) *Tracking Industrial Energy Efficiency and CO<sub>2</sub> Emissions*. International Energy Agency. Disponível em: <[http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/tracking\\_emissions.pdf](http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/tracking_emissions.pdf)>. Acesso em: 30 jul. 2012.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). (2009) *Transport, energy and CO<sub>2</sub>*. International Energy Agency. Disponível em: <<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/transport2009.pdf>>. Acesso em: 1º ago. 2012.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). (2007) *ISO 14064:2007 - Gases de efeito estufa*. International Organization for Standardization.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). (2009) *ISO 14040:2009 - Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura*. International Organization for Standardization.
- LISBOA E-NOVA. (2010) *Estratégia energético-ambiental para Lisboa*. Agência Municipal de Energia-Ambiente de Lisboa. Disponível em: <[https://www.lisboaenova.org/images/stories/EstrategiaEnergeticoAmbienta/Brochura\\_Lisboa\\_e\\_nova\\_240809\\_.pdf](https://www.lisboaenova.org/images/stories/EstrategiaEnergeticoAmbienta/Brochura_Lisboa_e_nova_240809_.pdf)>. Acesso em: 29 jun. 2013.
- LONDON UNDERGROUND. (LU). (2009) *London underground carbon footprint*. London Underground. Disponível em: <<http://content.tfl.gov.uk/london-underground-carbon-footprint-2008.pdf>>. Acesso em: 21 maio 2013.
- METRÔ BILBAO. (2012) *Informe de Gases Efecto Invernadero 2011*. Metrô Bilbao. Disponível em: <[http://www.metrobilbao.net/assets/system/attachments/510698fafc7a7b6532000002/original/Informe%20GEIS%202011\\_verificado.pdf?2013-01-28T15:27:54+00:00](http://www.metrobilbao.net/assets/system/attachments/510698fafc7a7b6532000002/original/Informe%20GEIS%202011_verificado.pdf?2013-01-28T15:27:54+00:00)>. Acesso em: 7 jul. 2013.
- METRÔ DE LISBOA. (2011) *Relatório de Sustentabilidade de 2010*. Metrô de Lisboa. Disponível em: <[https://www.metrolisboa.pt/institucional/wp-content/uploads/sites/2/2018/01/MetropolitanodeLisboa\\_RelatoriodeSustentabilidade2010.pdf](https://www.metrolisboa.pt/institucional/wp-content/uploads/sites/2/2018/01/MetropolitanodeLisboa_RelatoriodeSustentabilidade2010.pdf)>. Acesso em: 28 jun. 2013.
- METRÔ DE SÃO PAULO. (2014) *Relatório de Sustentabilidade de 2013*. Metrô de São Paulo. Disponível em: <<http://www.metro.sp.gov.br/relatoriosdesustentabilidade-2013>>. Acesso em: 19 jun. 2014.
- METRÔ DO PORTO (2011) *Relatório de Sustentabilidade de 2010*. Metrô do Porto. Disponível em: <[https://www.metroporto.pt/uploads/document/file/47/Relat\\_rio\\_de\\_Sustentabilidade\\_2010.pdf](https://www.metroporto.pt/uploads/document/file/47/Relat_rio_de_Sustentabilidade_2010.pdf)>. Acesso em: 7 jul. 2013.
- METROPOLITAN TRANSPORT AUTHORITY (MTA). (2008) *Subway FAQ: Facts and Figures*. Disponível em: <[https://www.nycsubway.org/wiki/Subway\\_FAQ:\\_Facts\\_and\\_Figures#Power](https://www.nycsubway.org/wiki/Subway_FAQ:_Facts_and_Figures#Power)>. Acesso em: 30 jul. 2012.
- METROPOLITAN TRANSPORT AUTHORITY (MTA). (2009) *The Interim Report of the Blue Ribbon Commission on Sustainability and the MTA*. METROPOLITAN TRANSPORT AUTHORITY. Disponível em <<https://sallan.org/pdf-docs/Interimforweb.pdf>>. Acesso em: 20 jul. 2012.
- METROPOLITAN TRANSPORT AUTHORITY (MTA). (2012) *Sustainability report*. Metropolitan Transport Authority. Disponível em: <<https://new.mta.info/document/10426>>. Acesso em: 20 jul. 2012.
- MORITA, Y.; YAMASAKI, T.; SHIMIZU, K.; KATO, H.; SHIBAHARA, N. (2011) A Study on Greenhouse Gas Emission of Urban Railway Projects in Tokyo Metropolitan Area. In: EASTERN ASIA SOCIETY FOR TRANSPORTATION STUDIES, 2011. *Anais...* v. 8.
- RIO DE JANEIRO (2011). *Decreto nº 43.216, de 30 de setembro de 2011*. Regulamenta a Lei nº 5.690, de 14 de abril de 2010, que dispõe sobre a Política Estadual sobre Mudança Global do Clima e Desenvolvimento Sustentável.
- TRANSPORT FOR LONDON (TFL). (2011) *Environment Report 2010*. Transport for London. Disponível em: <<http://www.tfl.gov.uk/assets/downloads/environment-report-2010.pdf>>. Acesso em: 10 ago. 2012.
- WORLD RESOURCES INSTITUTE (WRI). (2013) *GHG Protocol*. World Resources Institute. Disponível em: <<http://www.ghgprotocol.org/>>. Acesso em: 5 mar. 2013.
- WORLDSTEEL ASSOCIATION (WA). (2012) *Steel's contribution to a low carbon future*. Worldsteel Association. Disponível em: <[https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:66fed386-fd0b-485e-aa23-b8a5e7533435/Position\\_paper\\_climate\\_2018.pdf](https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:66fed386-fd0b-485e-aa23-b8a5e7533435/Position_paper_climate_2018.pdf)>. Acesso em: 16 ago. 2013.
- WORREL, E.; PRICE, L.; MARTIN, N.; HENDRIKS, C.; MEIDA, L.O. (2001) Carbon dioxide emissions from the global cement industry. *Annual Review of Energy and the Environment*, v. 26, p. 303-329. <http://doi.org/10.1146/annurev.energy.26.1.303>