



EMISSÃO DE DIÓXIDO DE CARBONO PELOS METRÔS SOB AS ABORDAGENS OPERACIONAL E DO CICLO DE VIDA

Carlos Eduardo Sanches de Andrade

Marcio de Almeida DAgosto

Gabriel Tenenbaum de Oliveira

Carlos David Nassi

Isabela Araujo Bittencourt

Agência Brasileira do ISBN
ISBN 978-85-87893-17-8



9 788587 893178



EMISSÃO DE DIÓXIDO DE CARBONO PELOS METRÔS SOB AS ABORDAGENS OPERACIONAL E DO CICLO DE VIDA

Carlos Eduardo Sanches de Andrade
Márcio de Almeida D'Agosto
Gabriel Tenenbaum de Oliveira
Carlos David Nassi

COPPE / Universidade Federal do Rio de Janeiro
PET – Programa de Engenharia de Transportes

Isabela Araujo Bittencourt
IME / Instituto Militar de Engenharia
Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes

RESUMO

Apesar dos metrô não consumirem combustíveis fósseis, as emissões de dióxido de carbono - CO₂ pelos metrô ocorrem, em menor proporção, em virtude da geração da eletricidade necessária para prover a força de tração dos trens e o funcionamento das estações. A abordagem operacional considera a emissão de toda geração da eletricidade para o sistema. Todavia, em uma abordagem que considere o ciclo de vida, seriam contabilizadas as emissões produzidas pela construção e manutenção do sistema, além das emissões da sua operação. Este trabalho visa pesquisar as emissões de CO₂ pelos metrô sob as abordagens operacional e do ciclo de vida, apresentando e analisando resultados de estudos realizados. Esses resultados mostram que a emissão operacional é fortemente influenciada pela matriz energética de geração de eletricidade, enquanto que a emissão total do ciclo de vida pode atingir valores até 146% maiores que a emissão da fase operacional.

ABSTRACT

Despite the subways do not consume fossil fuels emissions of carbon dioxide - CO₂ by subways occur to a lesser extent, due to the generation of electricity needed to provide the traction force of the operation of trains and stations. The operational approach considers the total electricity generation for the system. However, in a very specific approach which considers the life cycle, the emissions should be accounted for by the construction and maintenance of the system besides its operational emissions. This work aims to research CO₂ emissions produced by subways under the operational approaches and life cycle, presenting and analyzing results which come from studies. These results show that operational emission is strongly influenced by the energy mix of electricity generation and total emissions during life cycle may achieve values up to 146% higher than the operational phase.

1. INTRODUÇÃO

O aumento das emissões de dióxido de carbono - CO₂ pode provocar grandes prejuízos ambientais ao planeta, sendo o setor de transportes responsável por uma parcela significativa dessas emissões globais (IEA, 2009). O sistema metroviário é considerado um meio de transporte de passageiros sustentável, com menor impacto na emissão de CO₂, por não consumir diretamente combustíveis fósseis em sua operação.

Contudo, os metrô utilizam, com grande intensidade, energia elétrica na operação das estações e dos trens, e, conseqüentemente, produzem emissões indiretas de CO₂, por eletricidade (IPCC, 2006). Essas emissões ocorrem na geração da energia elétrica utilizada na operação do sistema, principalmente pela utilização de fontes térmicas.

Outra forma de cálculo de emissões pelos metrô seria com a utilização da abordagem do ciclo de vida, estruturada segundo a norma ISO 14.040 (ISO, 2009). Nessa abordagem seriam contabilizadas as emissões produzidas pela construção, manutenção e fim de vida do sistema, além da emissão de sua operação ao longo de toda a sua vida útil. A construção da

infraestrutura necessária ao funcionamento dos metrô, como os trilhos, as estações, os túneis e os trens, implica na emissão de uma grande quantidade de CO₂.

O objetivo deste trabalho é pesquisar a emissão de CO₂ pelos metrô, sob as abordagens operacional e do ciclo de vida, a fim de identificar quais são os estágios de maior emissão e verificar se esses sistemas, na abordagem do ciclo de vida, continuam a ser um meio de transporte sustentável, com baixa emissão. A pesquisa efetuada identificou estudos realizados em algumas cidades selecionadas e apresenta os principais resultados desses estudos.

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 apresenta o conceito da emissão de CO₂ pelos metrô, sob a abordagem operacional, analisando os resultados divulgados por alguns metrô em todo o mundo. A seção 3 apresenta o conceito da emissão de CO₂ pelos metrô, sob a abordagem do ciclo de vida, analisando os resultados apresentados nos estudos já realizados sobre metrô. A seção 4 trata das conclusões deste trabalho.

2. EMISSÃO DE CO₂ PELOS METRÔ, SOB A ABORDAGEM OPERACIONAL

Sistemas metroviários, assim como outras empresas, contabilizam suas emissões seguindo um dos padrões estabelecidos no mercado. O *GHG Protocol - Greenhouse gas protocol* é um desses padrões. É uma ferramenta utilizada para entender, quantificar e gerenciar emissões de gases do efeito estufa - GEE. Esta ferramenta foi originalmente desenvolvida nos Estados Unidos, em 1998, pelo *WRI - World Resources Institute*, sendo hoje utilizada mundialmente por muitas empresas e governos para a realização de inventários de GEE (WRI, 2013). Essa metodologia é compatível com as diretrizes do IPCC - Painel intergovernamental sobre mudanças climáticas (IPCC, 2006) e com a Norma ISO 14.064 - gases de efeito estufa (ISO, 2007). O resultado dessa contabilização produz o inventário de emissões de GEE da empresa.

Embora não exista nenhuma legislação que obrigue os metrô a produzirem o inventário de emissões, muitos sistemas pelo mundo já demonstram preocupação com o tema e elaboram esse documento anualmente, como os Metrô de Nova Iorque, Lisboa e Bilbao (Andrade *et al.*, 2013). No Brasil, o Metrô de São Paulo produz o inventário de emissões de GEE desde 2006 (Metrô de São Paulo, 2014), enquanto que o Metrô do Rio de Janeiro iniciou a produção de inventários em 2011 (MetrôRio, 2013). Esses metrô brasileiros utilizam o GHG Protocol para produzir seus inventários de emissões, embora não haja uma recomendação específica para isso e cada empresa possa optar pelo padrão que considerar mais adequado.

2.1 A energia elétrica consumida pelos metrô e as matrizes energéticas

As empresas metroviárias 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 e possibilitar o funcionamento dos equipamentos auxiliares das estações metroviárias, como iluminação, ventilação, escadas rolantes, elevadores, sistemas de bombeamento, subestações de energia e outros. O Metrô de Londres é o maior consumidor individual de energia da cidade e um dos 10 maiores consumidores de energia do Reino Unido (TFL, 2011).

A energia elétrica necessária para prover a força de tração dos trens e o funcionamento das estações metroviárias representa cerca de 99% de todo consumo de eletricidade dos metrô, como ocorre nos Metrô de São Paulo e do Rio de Janeiro (Metrô de São Paulo, 2011;

MetrôRio, 2013). Existem ainda outros tipos de consumos de eletricidade da empresa metroviária, como prédios administrativos, canteiro de obras, imóveis e outras, que representam uma parcela mínima do consumo total de energia elétrica dos metrô.

As emissões de CO₂ devido à geração da energia elétrica consumida pelos metrô apresentam grande variação de resultados entre os sistemas de todo o mundo, em função das diferentes matrizes energéticas utilizadas em cada localidade. O Brasil é favorecido por utilizar predominantemente fontes hidroelétricas, que, em 2012, representaram 77% da oferta interna de energia elétrica nacional, seguido pelo gás natural, com 8% (EPE, 2013).

2.2 A emissão de CO₂ pelos metrô, sob a abordagem operacional

O conceito de emissão de CO₂ pelos metrô, sob a abordagem operacional, considera o resultado do “Escopo 2” do inventário de emissões de GEE (IPCC, 2006), que contabiliza as emissões indiretas de CO₂, por eletricidade. Ou seja, são tratadas como emissões produzidas por terceiros, isso porque, usualmente, essa energia elétrica não é gerada localmente pelo metrô e sim adquirida de terceiros, da empresa fornecedora de energia elétrica.

O sistema de energia elétrica do Brasil é interligado por meio do SIN - Sistema Interligado Nacional, não sendo possível identificar a origem da fonte energética utilizada na geração da energia fornecida para cada consumidor. Com isso, para realizar qualquer cálculo de emissões de CO₂ por eletricidade no Brasil, são utilizados os fatores médios nacionais de emissão do setor elétrico, divulgados pelo Governo Brasileiro (MCTI, 2014).

Os valores das emissões totais de CO₂ sob a abordagem operacional do Metrô de São Paulo, em 2010, são apresentados na tabela 1. Esses resultados variam entre os metrô, já que dependem, entre outros fatores, da tecnologia e idade do sistema, do desenho dos túneis e estações, da carga de passageiros, da existência ou não de sistema de ar condicionado, de como ocorre sua utilização e outros.

Tabela 1: Emissão de CO₂ por cada tipo de eletricidade consumida pelo Metrô de São Paulo e total da emissão sob a abordagem operacional, no ano de 2010 (Metrô de São Paulo, 2011)

TIPOS DE ENERGIAS ELÉTRICAS CONSUMIDAS	EMISSIONES DE CO ₂	%
Energia Elétrica da operação dos trens e das estações metroviárias	28.279,60 tCO ₂	99,2%
Energia Elétrica de prédios administrativos e outros imóveis	184,90 tCO ₂	0,7%
Energia Elétrica de canteiros de obras	32,10 tCO ₂	0,1%
Emissão total por eletricidade (= Emissão sob a abordagem operacional)	28.496,60 tCO ₂	

No Metrô de São Paulo, entre 2009 e 2010, as emissões totais por eletricidade sofreram um grande aumento, de 13,1 mil tCO₂, em 2009, para 28,5 mil tCO₂, em 2010. A maior utilização de termoelétricas para geração de energia elétrica pelo SIN durante o ano de 2010, comparativamente a 2009, contribuiu para esse aumento de 117%, de um ano para o outro (Metrô de São Paulo, 2011).

A medida “gramas por passageiro-km” - gCO₂ por pass-km é mais representativa do que os valores das emissões totais, em tCO₂, sendo a mais utilizada para fins de comparação de resultados de emissões entre os metrô e outros meios de transportes. Ela é obtida da seguinte forma: multiplicam-se os totais correspondentes de passageiros transportados no ano pela extensão média das viagens, baseada em pesquisas de origem-destino dessas viagens.

Devido à grande importância do consumo da energia elétrica para os metrô, o grupo CoMet/Nova, que é um grupo de metrô que compartilham informações de melhorias entre si, conduziu projetos analisando e sugerindo ações para minimizar a quantidade de energia utilizada, e conseqüentemente, minimizar as emissões de CO₂. A figura 1 mostra os resultados das emissões de CO₂ de 30 metrô componentes do grupo CoMet/Nova, sob a abordagem operacional, no ano de 2012, separados pelos continentes. Observa-se grande variação de resultados, de 6 a 118 gCO₂ por pass-km, em função das diferentes matrizes energéticas de cada localidade. Um acordo de confidencialidade entre os componentes do grupo estabelece que as informações fornecidas não identifiquem o sistema, apenas o continente onde ele está situado. Assim AM representa a América (Norte e Sul), AS a Ásia/Oceania e EU a Europa.

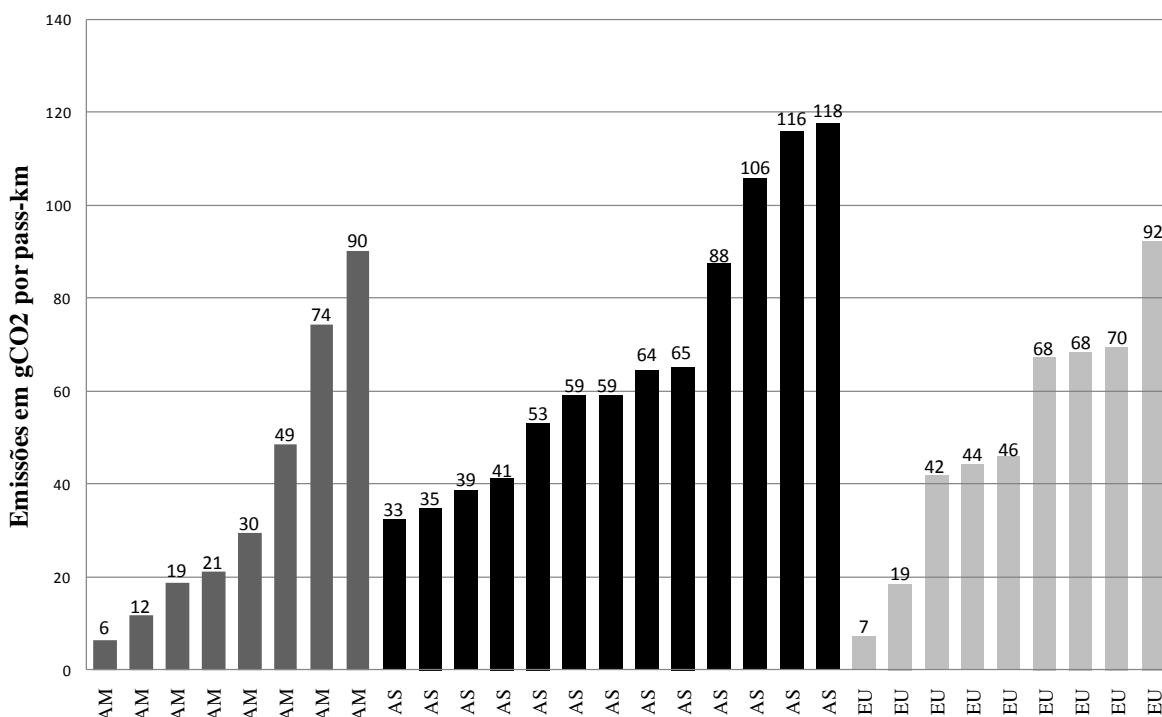


Figura 1: Emissão de CO₂, sob a abordagem operacional, em 30 metrô do grupo CoMet/Nova, no ano de 2012 (Fonte: CoMet, 2013)

Conclui-se que, em 2012, a média de emissões dos metrô componentes do grupo CoMet/Nova foi de 54 gCO₂ por pass-km, sob a abordagem operacional. Entre os continentes, a maior média de emissão foi do continente Ásia/Oceania, com 67 gCO₂ por pass-km. A Europa apresentou a média de 51 gCO₂ por pass-km. A América foi o continente com menor emissão entre os 30 metrô, com 38 gCO₂ por pass-km.

No Metrô do Rio de Janeiro, a emissão total de CO₂, sob a abordagem operacional, do ano de 2012, foi de aproximadamente 13,2 mil tCO₂, acarretando a emissão de 6,4 gCO₂ por pass-km (MetrôRio, 2013). No Metrô de São Paulo, também em 2012, a emissão, sob a abordagem operacional, foi de 5 gCO₂ por pass-km (Metrô de São Paulo, 2013).

Comparando os resultados das emissões dos Metrô de São Paulo e do Rio de Janeiro com as emissões de outros metrô do grupo CoMet/Nova, pode-se afirmar que os metrô brasileiros estão entre aqueles que menos emitem no mundo, em virtude principalmente da matriz

energética brasileira, que é uma matriz menos poluente, composta basicamente por fontes hidroelétricas.

Outro fator que contribuiu para esse bom resultado é a adequada carga de passageiros dos Metrô de São Paulo e do Rio de Janeiro, que diminui o resultado final da emissão em gCO₂ por pass-km. No Metrô do Rio de Janeiro, a carga de passageiros foi de 50% da ocupação de toda a oferta do sistema durante o ano de 2012 (MetrôRio, 2014). O Metrô de Nova Iorque, apesar de apresentar uma taxa de ocupação superior a do Metrô do Rio de Janeiro, com 59% da ocupação, emitiu 42 gCO₂ por pass-km no ano de 2008 (FTA, 2010), um valor 6 vezes maior do que a emissão do Metrô do Rio de Janeiro, comprovando a importância da predominância da fonte hidroelétrica na matriz energética brasileira.

3. EMISSÃO DE CO₂ PELOS METRÔS, SOB A ABORDAGEM DO CICLO DE VIDA

A avaliação das emissões de CO₂ pelos metrô, sob a abordagem do ciclo de vida, é um tema pouco aprofundado, com apenas alguns estudos concluídos e identificados (Chester, 2008; Chester e Hovarth, 2009a; Chester e Hovarth, 2009b). Não foram identificados estudos de ciclo de vida em metrô da América Latina. Estudos de emissões sob a abordagem do ciclo de vida em ferrovias de passageiros e de cargas são encontrados em maior número (Stripple e Uppenber, 2010; Svensson e Eklund, 2007; Network Rail, 2009; Chang e Kendall, 2011; Akerman, 2011; Westin e Kageson, 2012; Morita *et al.*, 2011; Milford e Allwood, 2010).

O longo tempo de vida útil da infraestrutura pode fazer com que a emissão total, rateada anualmente, seja menor que a emissão que ocorreria caso o sistema não tivesse sido implantado e os deslocamentos dos usuários continuassem a ser feitos com o uso de automóveis e ônibus convencionais. As condições para que a implantação de um metrô seja justificada em termos de emissão de CO₂ são: a carga de passageiros acima de um determinado valor, o projeto, a tecnologia, a matriz de energia utilizada na operação e os materiais empregados. O conjunto desses fatores vai determinar numa situação específica a emissão por passageiro-km ao longo da vida útil do sistema.

3.1 O conceito e os modelos da avaliação do ciclo de vida nos metrô

A emissão de CO₂ pelos metrô, sob a abordagem do ciclo de vida, considera todas as emissões da implantação de um sistema metroviário, desde a sua construção até o fim de vida. A metodologia mais comumente utilizada nessa abordagem é denominada ACV - Avaliação do Ciclo de Vida. A ACV tem como finalidade avaliar o impacto ambiental causado por um produto ou serviço ao longo de sua vida. A ISO 14.040 define o ciclo de vida como sendo “estágios sucessivos e encadeados de um sistema de produto, desde a aquisição da matéria prima ou geração de recursos naturais à disposição final” e define a ACV como sendo: “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 ACV consiste de 4 estágios principais (ISO, 2009):

- 1) definição do objetivo e escopo do estudo e determinação de seus limites;
- 2) análise de inventário, que envolve coleta de dados e cálculo dos impactos ambientais;
- 3) avaliação dos impactos;
- 4) interpretação dos resultados.

É sempre esperado certo grau de incerteza nos resultados de um estudo de ACV, uma vez que os dados de entrada costumam ser em grandes quantidades, tendo certa variabilidade e por vezes são obtidos por meio de estimativas. Por isso, a ACV é usualmente enriquecida com análises sensitivas e de incerteza. A análise sensitiva mostra quão sensitivos são os resultados para o método adotado. A análise de incerteza quantifica a incerteza dos resultados.

A ACV de um produto ou serviço realizada num determinado local reflete as características desse local, sendo difícil a determinação de valores que possam ser utilizados em qualquer situação. Um mesmo produto ou serviço produzido em locais diferentes poderá ter ACV diferentes, em função das diferenças locais. Duas ACV realizadas no mesmo local para o mesmo produto/serviço poderão ser diferentes, em função de diferenças no escopo, qualidade dos dados, premissas e métodos de avaliação dos impactos.

Em virtude da grande quantidade de dados necessários para realizar um estudo de ACV, o mesmo pode ser realizado com a utilização de softwares específicos para isso, como o SIMAPRO, que é um dos softwares de ACV mais abrangentes e utilizados em todo o mundo. Ele contém bancos de dados de inventário de ciclo de vida (inventários internacionais, incluindo o setor de transportes) e permite a simulação de Monte Carlo, para a análise de incertezas. Esta simulação é um método estatístico para diminuir a incerteza, utilizando um algoritmo que atribui valores aleatórios às variáveis um grande número de vezes, tipicamente milhares de vezes. O resultado obtido vai convergir para um valor com uma probabilidade conhecida. O SIMAPRO contém 17 diferentes métodos de avaliação de impacto ambiental. No setor de transportes, inclui dados sobre transporte ferroviário movido a diesel e eletricidade, construção da infraestrutura e a manufatura de locomotivas.

3.2 A emissão de CO₂ pelos metrô, sob a abordagem do ciclo de vida

A emissão de CO₂ pelos metrô ocorre nas diversas fases do seu ciclo de vida, como mostrado na figura 2. Aplicado a um sistema metroviário a ACV seria composta de:

Infraestrutura – Veículos (Trens) – Energia Elétrica (Combustível = Eletricidade)

A infraestrutura e os veículos podem ser divididos nas etapas de construção, operação, manutenção e fim de vida. Esta última etapa pode ser desprezada por não haver propriamente um fim de vida completo da infraestrutura, no sentido tradicional, que envolve o completo desuso e descarte. Para os veículos, a imensa variedade de destinos do descarte também inviabiliza o levantamento do fim de vida. O combustível, que no metrô é a eletricidade, tem apenas a etapa de suprimento, equivalente a construção, ou seja, a geração da energia elétrica.

Portanto, a abordagem do ciclo de vida nos metrô pode ser dividida em duas fases:

- 1) Fase operacional = Operação dos veículos e operação da infraestrutura;
- 2) Fase não operacional = Construção da infraestrutura, construção dos trens, manutenção da infraestrutura e manutenção dos veículos.

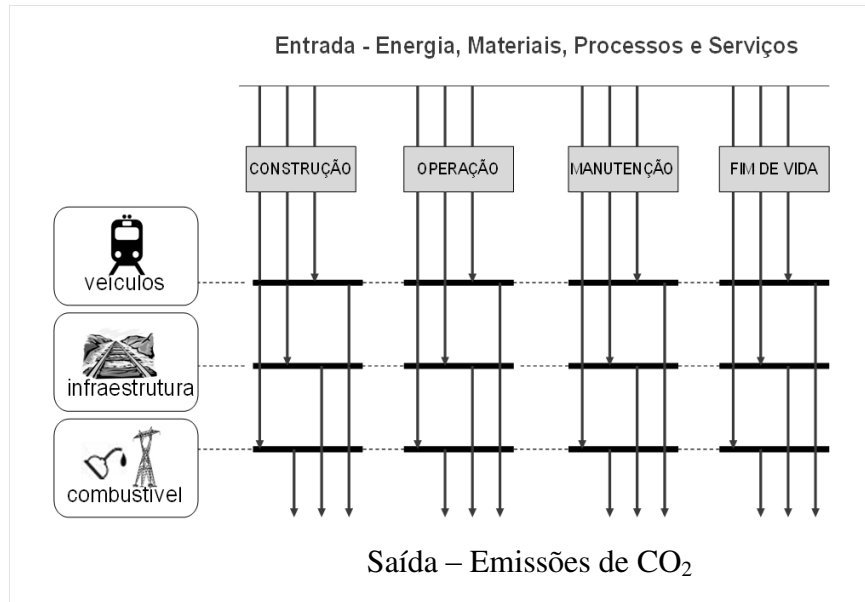


Figura 2: Modelo conceitual dos componentes do ciclo de vida dos sistemas metroviários

Chester e Hovarth (2009a) afirmam que o consumo de energia e as emissões de CO₂ nos sistemas metroviários são mais fortemente influenciados pelos componentes não operacionais do que nos sistemas de transporte rodoviários ou aéreos. A construção de túneis e pontes, necessária em alguns metrô, aumenta consideravelmente as emissões, pelo uso extensivo de aço e cimento. Isso ocorre porque os processos de fabricação do cimento e do aço, largamente utilizados na fase de construção do metrô, consomem grandes quantidades de energia. A produção de 1 tonelada de cimento emite, em média, cerca de 0,8 tCO₂ (IEA, 2007). A produção de 1 tonelada de aço emite até 1,9 tCO₂ (Worldsteel Association, 2012).

Em sistemas metroviários a construção da infraestrutura do sistema inclui etapas como a construção de túneis, elevados, estações; 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. Não há um padrão definido e aceito para a identificação dos processos que constituem cada etapa. Também os objetivos, escopo e fronteiras costumam ser diferentes entre os estudos realizados. Tudo isso contribui para dificuldades de comparação entre esses estudos.

A grande complexidade desse levantamento tem dificultado o aprofundamento das pesquisas nessa área. Contudo, a utilização somente da abordagem operacional em detrimento da abordagem da avaliação do ciclo de vida resulta em uma informação deficiente sobre a emissão de CO₂ dos sistemas metroviários.

As pesquisas publicadas sobre ACV no setor de transportes geralmente abrangem automóveis, ônibus, ferrovias e metrô, algumas delas cobrindo apenas parcialmente alguns elementos do ciclo de vida. Foram identificados estudos de ACV em 4 metrô, das cidades de São Francisco (sistemas BART e MUNI), Nova Iorque e Chicago. Chester (2008) avaliou as emissões de CO₂ por alguns sistemas de transportes dos Estados Unidos, sob a abordagem do ciclo de vida. Os sistemas da cidade de São Francisco, BART e MUNI, que possuem características de metrô, tiveram os resultados das emissões de CO₂ por passageiro-km da

fase não operacional superiores aos resultados das emissões da fase operacional. Nesse estudo, foram considerados valores médios de lotação e as emissões não operacionais foram normalizadas no tempo de vida útil dos trens (26 e 27 anos) (Chester, 2008). Em levantamento realizado posteriormente nos Metrô de Nova Iorque e de Chicago, a fase não operacional apresentou valores menores que a fase operacional (Chester e Hovarth, 2009a), quando normalizadas no tempo de vida útil dos trens (30 anos). A figura 3 mostra a relação percentual entre as emissões das fases não operacional e operacional desses quatro metrô.

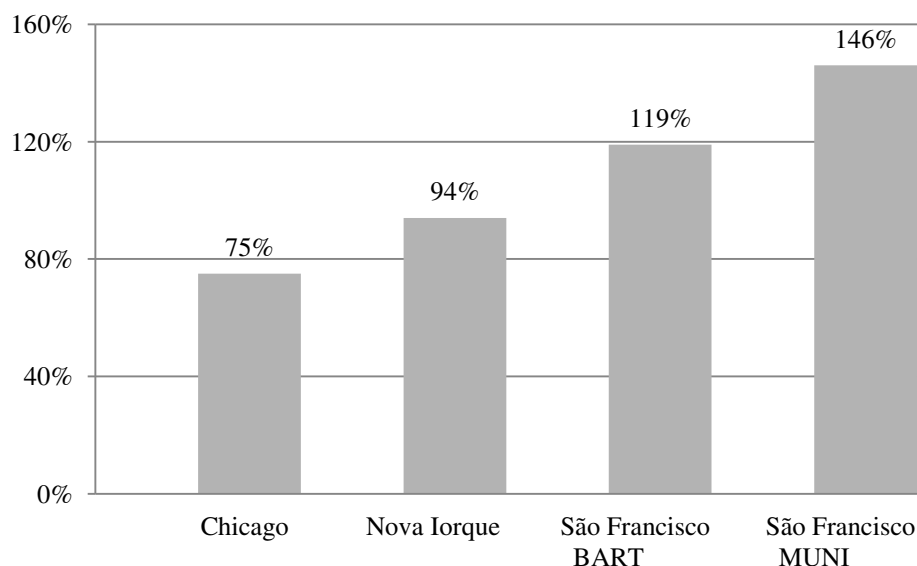


Figura 3: Relação percentual entre as emissões, em gCO₂ por pass-km, das fases não operacional e operacional (Fontes: Chester, 2008; Chester e Hovarth, 2009a)

Os resultados significam que, para o metrô de Chicago, na abordagem do ciclo de vida, a emissão total passou a ter um valor 1,75 vezes maior do que a emissão na fase operacional. Para os metrô de Nova Iorque, São Francisco BART e MUNI as emissões totais no ciclo de vida são, respectivamente, 1,94; 2,19 e 2,46 vezes maiores do que as emissões na fase operacional. Foram apuradas também as emissões nos ciclos de vidas de automóveis a gasolina e de ônibus urbano a diesel (em valores médios de lotação), o que permite uma comparação de resultados com o ciclo de vida dos metrô. Em média, foi constatado que as emissões dos metrô, por passageiro-km, foram menores que as dos automóveis e ônibus. A emissão dos metrô variou de 63% (São Francisco BART) a 25% menor (Chicago) que a dos automóveis e de 56% (São Francisco BART) a 12% menor (Chicago) que a dos ônibus. (Chester, 2008; Chester e Hovarth, 2009a).

Em outro estudo, Chester e Hovarth (2009b) afirmam que, considerando o ciclo de vida, as emissões totais nos Estados Unidos, em automóveis e ônibus, são, em média, 1,63 vezes maiores que as emissões das fases operacionais.

Conclui-se, portanto, que, nesses estudos, na abordagem do ciclo de vida, mesmo com as emissões das fases não operacionais dos metrô maiores que a dos automóveis e ônibus, ainda assim eles se mantiveram com emissão menor que as emissões dos automóveis e ônibus. Essa conclusão não pode ser generalizada, pois há muitas variáveis envolvidas e cada situação precisa ser avaliada individualmente.

4. CONCLUSÕES

Comparações quanto à emissão de CO₂ dos metrô com outros sistemas de transporte podem conduzir a falsas conclusões, quando baseadas em poucos aspectos, como apenas as emissões operacionais, que mostram apenas parte da realidade. A avaliação da emissão de CO₂ pelos metrô traria resultados mais significativos se fossem considerados outros aspectos além da emissão sob a abordagem operacional. Uma abordagem que considere o ciclo de vida pode mostrar uma visão mais precisa da real dimensão da emissão de CO₂ causada pela implantação dos metrô.

A emissão de CO₂ pelos metrô, sob a abordagem operacional, é devida principalmente à grande utilização de energia elétrica dos sistemas, ficando os resultados das emissões altamente dependentes da matriz energética utilizada na geração da energia. Localidades que possuem fontes hidroelétricas predominantes na matriz energética, como o Brasil, geralmente possuem menores resultados de emissões de CO₂ por passageiro-km, embora esses resultados também dependam da carga de passageiros do sistema.

Os trabalhos publicados com abordagens de ciclo de vida para sistemas de transportes cobrem parcialmente o assunto, com diferentes enfoques. Os sistemas de metrô analisados neste trabalho indicam uma contribuição significativa das emissões da fase não operacional. Entre os materiais utilizados nessa fase, o aço e o cimento são os que mais emitem CO₂.

A construção da infraestrutura dos metrô ocasiona altos níveis de emissão. Contudo, rateada ao longo do seu tempo de vida útil, pode proporcionar níveis aceitáveis. Outro critério é calcular o tempo de recuperação dessa emissão e compará-lo ao tempo de vida útil do sistema. A ACV do metrô pode ser analisada sob uma perspectiva de comparação com outras soluções de transporte, de maneira a encontrar as condições que justifiquem, sob o ponto de vista de emissão de CO₂, a implantação desse sistema. Essa justificativa pode ser obtida, ou não, pela conjunção de vários fatores: o projeto contempla solução “limpa”, com uso de alternativas e tecnologias que produzam menor emissão; uma quantidade de usuários acima de um determinado valor migrará de meios de transporte mais poluentes para o metrô; a carga de passageiros atingirá, no mínimo, um determinado valor.

A proposta do estudo consistiu em avaliar as emissões de CO₂ pelos metrô sob as abordagens operacional e do ciclo de vida, a fim de identificar quais são os estágios de maior emissão pelos metrô e verificar se esses sistemas, nessas abordagens, constituem um meio de transporte de baixa emissão. O objetivo do estudo foi atingido por meio da apresentação e análise dos resultados de pesquisas realizadas das emissões de CO₂ pelos metrô nas abordagens operacional e do ciclo de vida. Na abordagem operacional foi constatada a importância da matriz energética da geração de eletricidade, onde a utilização de fontes não térmicas, como as hidroelétricas, trará um menor impacto nas emissões. Na abordagem do ciclo de vida foi constatada a grande participação das emissões da fase não operacional, comparadas às emissões da fase operacional, aumentando, nos casos analisados, as emissões totais em até 146%. No estudo identificado que permite uma comparação das emissões nos ciclos de vidas de sistemas de transportes, os sistemas metroviários, mesmo com as grandes emissões das fases não operacionais, continuaram a ter uma emissão menor do que as emissões dos ciclos de vidas dos automóveis a gasolina e ônibus a diesel.

A proposta de novo estudo se baseia na realização de um estudo prático de estimativa de cálculo das emissões de CO₂, sob a abordagem do ciclo de vida, em um sistema de metrô que esteja sendo implantado na América Latina, visto que não foi identificado nenhum estudo dessa natureza realizado em um sistema metroviário nesse continente. Dessa forma, confrontando os resultados da emissão da fase não operacional com a emissão da fase operacional, seria possível concluir se esses metrôs continuam a ser, do ponto de vista de emissão de CO₂, uma boa alternativa de transporte motorizado. A obtenção dos dados necessários para esse estudo torna-se mais viável em sistemas em fase de construção, onde a empresa construtora pode se organizar para realizar a coleta de dados. No Brasil, existem atualmente 2 sistemas de metrôs em fase de implantação, onde esses estudos de emissões sob a abordagem do ciclo de vida poderiam ser realizados, que são o Metrô de Salvador e a Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro.

Agradecimentos:

Ao SEST - Serviço Social do Transporte, SENAT - Serviço Nacional de Aprendizagem do Transporte e ITL - Instituto de Transporte e Logística, pelo suporte técnico e financeiro concedido ao trabalho desta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akerman, J. (2011) The role of high-speed rail in mitigating climate change – The Swedish case Europabanan from a life cycle perspective. *Transportation Research Part D*, v. 16, p. 208–217. DOI: 10.1016/j.trd.2010.12.004
- Andrade, C. E. S.; Bittencourt, I. A.; D’Agosto, M. A., Leal Júnior, I. C. (2013) O transporte de passageiros sobre trilhos e sua contribuição para a redução das emissões de gases do efeito estufa. *CBTU*.
- Chang, B. e A. Kendal (2011) Life cycle greenhouse gas assessment of infrastructure construction for California’s high-speed rail system. *Transportation Research Part D*, v. 16, p. 429-434. DOI: 10.1016/j.trd.2011.04.004
- Chester, M. (2008) Life-cycle environmental inventory of passenger transportation in the United States. Tese de doutorado na Universidade da Califórnia, Berkeley, 2008. Disponível em <<http://escholarship.org/uc/item/7n29n303>>. Acesso em 20/07/14.
- Chester, M. e A. Horvath (2009a) Life-cycle energy and emissions inventory for motorcycles, diesel, automobiles, school buses and metropolitan rails. Disponível em <<http://escholarship.org/uc/item/6z37f2jr.pdf>>. Acesso em 20/07/14.
- Chester, M. e A. Horvath (2009b) Environmental assessment of passenger transportation should include infrastructure and supply chains. *Environmental Research Letters*, 2009, v 4 no. 2, DOI: 10.1088/1748-9326/4/2/024008
- CoMET (2013) *Key Performance Indicators – Annual Report (2012 data)*. Community of Metros.
- EPE (2013) *Balanço energético nacional de 2012*. Empresa de Pesquisa Energética. Disponível em <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2013.pdf>. Acesso em 20/07/14.
- FTA (2010) *Public Transportation’s Role in Responding to Climate Change*. Federal Transit Administration. Disponível em: <<http://www.fta.dot.gov/documents/PublicTransportationsRoleInRespondingToClimateChange2010.pdf>> Acesso em 20/07/14.
- IEA (2007) *Tracking Industrial Energy Efficiency and CO₂ Emissions*. International Energy Agency. Disponível em: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/tracking_emissions.pdf>.
- IEA (2009) *Transport, energy and CO₂*. International Energy Agency. Disponível em: <<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/transport2009.pdf>>. Acesso em 20/07/14.
- IPCC (2006) *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Inter-governmental panel on climate change. Disponível em < <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol1.html> >. Acesso em 20/07/14.
- ISO (2007) *ISO 14.064:2007 Gases do efeito estufa*. International Organization for Standardization.
- ISO (2009) *ISO 14.040:2009 Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura*. International Organization for Standardization.
- MCTI (2014) Informações do site oficial do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação do Brasil. Disponível em: <<http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/full/321144.html#ancora>> Acesso em 20/07/14.

- Metrô de São Paulo (2011) *Inventário de emissões de gases do efeito estufa do Metrô de São Paulo de 2010*. Disponível em: <<http://www.metro.sp.gov.br/metro/sustentabilidade/pdf/inventario-emissoes-gases.pdf>>. Acesso em 01/07/14.
- Metrô de São Paulo (2013) *Relatório de Sustentabilidade de 2012*. Disponível em: <<http://www.metro.sp.gov.br/relatoriodesustentabilidade-2012>> Acesso em 01/07/14.
- Metrô de São Paulo (2014) *Relatório de Sustentabilidade de 2013*. Disponível em: <<http://www.metro.sp.gov.br/relatoriodesustentabilidade-2013>> Acesso em 01/07/14.
- MetrôRio (2013) *Inventário de emissões de gases do efeito estufa Metrô Rio de 2012*. Disponibilizado por Anderson Correa, Gerente da área de Saúde e Meio Ambiente do Metrô do Rio de Janeiro.
- MetrôRio (2014) Informação fornecida por funcionária do Metrô do Rio de Janeiro: Rejane Micaelo, Gerente da Gerência de Inteligência de Mercado e Planejamento de Transportes.
- Milford, R. e J. Allwood (2010) Assessing the CO₂ impact of current and future rail track in the UK. *Transportation Research Part D*, v.15, p. 61–72. DOI: 10.1016/j.trd.2009.09.003
- Morita, Y.; T. Yamasaki; K. Shimizu; H. Kato e N. Shibahara (2011) A Study on Greenhouse Gas Emission of Urban Railway Projects in Tokyo Metropolitan Area. *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, v.8
- Network Rail (2009) Comparing environmental impact of conventional and high speed rail. Network Rail, London.
- Stripple, H. e S. Uppenberg (2010) Life cycle assessment of railways and rail transports. IVL Swedish Environmental Research Institute, Stockholm. Disponível em <<http://www.ivl.se/download/18.7df4c4e812d2da6a416800072122/B1943.pdf>>. Acesso em 20/07/14.
- Svensson, N. e M. Eklund (2007) Screening of environmental pressure from products in the Swedish railway infrastructure: Implications for strategic environmental management. *Resources, conservation and recycling*, v. 52, p. 248-265. DOI: 10.1016/j.resconrec.2007.03.006
- TFL (2011) London Underground environment strategy. Transport of London. Disponível em <<http://www.tfl.gov.uk/cdn/static/cms/documents/lu-environment-strategy.pdf>>. Acesso em 20/07/14.
- Westin, J. e P. Kageson (2012) Can high speed rail offset its embedded emissions? *Transportation Research Part D*, v.17, p. 1–7. DOI: 10.1016/j.trd.2011.09.006
- Worldsteel Association (2012) Steel's contribution to a low carbon future. Disponível em: <<http://www.worldsteel.org/dms/internetDocumentList/downloads/publications/Climate-change-position-paper-A4/document/Climate%20change%20position%20paper%20A4.pdf>>. Acesso em 20/07/14.
- WRI (2013) *GHG Protocol*. World Resources Institute. Disponível em <<http://www.ghgprotocol.org>>. Acesso em 20/07/14.

Carlos Eduardo Sanches de Andrade (carlos.andrade@pet.coppe.ufrj.br)

Márcio de Almeida D'Agosto (dagosto@pet.coppe.ufrj.br)

Gabriel Tenenbaum de Oliveira (gto@pet.coppe.ufrj.br)

Carlos David Nassi (nassi@pet.coppe.ufrj.br)

Departamento de Engenharia de Transportes, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro

Cidade Universitária – Centro de Tecnologia, Bloco H, Sala 111 – Rio de Janeiro – RJ – CEP: 21.949-900

Isabela Araujo Bittencourt (belabittenc@globocom.com)

Departamento de Engenharia de Transportes, IME, Instituto Militar de Engenharia

Praça General Tibúrcio, 80 – Praia Vermelha – Urca – Rio de Janeiro – CEP: 21.941-972