



19ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

TEMA DO TRABALHO: SUSTENTABILIDADE E MEIO AMBIENTE

TÍTULO DO TRABALHO: ANÁLISE DA EMISSÃO DE CO₂ EM SISTEMAS METROVIÁRIOS

1. OBJETIVO

A emissão de dióxido de carbono (CO_2) 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 de gases, caso ações de mitigação dessas emissões não sejam implementadas (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 CO_2 equivalente (CO_2e), correspondendo a 48,5% do total de emissões associadas à matriz energética brasileira (EPE, 2012).

O objetivo deste trabalho é analisar a emissão de CO_2 por sistemas metroviários, apresentar as diferentes abordagens adotadas por pesquisadores e por alguns sistemas metroviários em todo mundo, mostrando possíveis ações de mitigação dos impactos ambientais. 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 relata a relevância do estudo. A seção 3 trata da descrição do trabalho, sendo dividida em três itens: a) Descrição da emissão em sistemas metroviários, apresentando os diferentes tipos de emissões; b) apresentação de dados reais de emissões de alguns sistemas; e c) apresentação e aplicações de abordagens utilizadas na determinação das emissões em metrô. A seção 4 trata das possibilidades de mitigação das emissões de sistemas metroviários.

2. RELEVÂNCIA

A consciência ambiental vem crescendo em todo mundo, e os governos vêm implementando 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, cortando 60% das emissões até 2025, tendo como base o ano de 1999 (London Underground, 2009). No

Estado do Rio de Janeiro, de acordo com o decreto 43.216, de 30/09/2011, foram estabelecidos objetivos de redução, até 2030, de 30% nas emissões de gases do efeito estufa pelo setor de transportes, em relação ao ano de 2010.

No setor de transportes a melhoria e maior utilização dos sistemas de transporte público podem contribuir para a solução do problema, através da diminuição do uso de transporte privado. Por outro lado o planejamento de transporte público também deve procurar soluções que minimizem a emissão de gases do efeito estufa. Os sistemas metroviários, na condição de transporte de massa, ocupam lugar de destaque na solução de transporte das grandes cidades, porém necessitam ser pesquisados mais profundamente para obter-se uma melhor compreensão no que tange à emissão de CO₂.

3. DESCRIÇÃO

Essa seção é dividida em três itens: a) Descrição da emissão em sistemas metroviários, apresentando os diferentes tipos de emissões; b) apresentação de dados reais de emissões de alguns sistemas; e c) apresentação e aplicações de abordagens utilizadas na determinação das emissões em metrô.

3.1 Descrição da emissão de sistemas metroviários

A emissão direta de CO₂ em metrô é usualmente muito pequena, sendo a mesma 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. Essas emissões são contabilizadas no âmbito do “Escopo 1”, seguindo a metodologia recomendada pelo IPCC - Painel intergovernamental sobre mudanças climáticas - e pela Norma ISO 14.064.

Os metrô são entre os maiores consumidores individuais de energia elétrica. Grandes quantidades de energia elétrica são necessárias para prover a força de tração que movimentam os trens. Usualmente essa energia elétrica não é gerada localmente e sim adquirida de terceiros, e as emissões correspondentes de gases, de acordo com a metodologia do IPCC, são contabilizadas no “Escopo 2”, ou seja, como emissões indiretas de CO₂. O valor das emissões depende das fontes energéticas utilizadas pelo sistema gerador dessa energia. Nesse aspecto o Brasil é favorecido por utilizar predominantemente fontes hidrelétricas, representando 81,7% da geração de energia elétrica brasileira, que possuem menor emissão que as fontes térmicas (EPE, 2012). 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).

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 outras emissões indiretas, que, de acordo com o IPCC, devem ser contabilizadas no “Escopo 3”, sendo esse item opcional.

3.2 Apresentação de dados reais de emissões de alguns sistemas

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, devem-se multiplicar os totais correspondentes de passageiros transportados no ano pela extensão média das viagens, baseada em pesquisas de origem-destino dessas viagens.

Alguns metrô do mundo constituíram comunidades com o intuito de, em conjunto, criarem projetos cobrindo diversas áreas de interesse comum, em busca das melhores práticas de operação e gerenciamento. O grupo CoMET reúne sistemas de metrô de grande porte, como o de São Paulo, e o grupo NOVA reúne os de médio porte, como o do Rio de Janeiro.

O gráfico da figura 1 mostra as emissões indiretas de CO₂, por eletricidade, pertencentes ao “Escopo 2” do IPCC, do ano de 2011, em gramas por passageiro-km, de metrô das

Américas, Europa e Ásia/Oceania, componentes do grupo CoMET/NOVA. A grande variação observada, de 2 a 130 gCO₂e ocorre devido a diferentes matrizes energéticas, à carga dos sistemas e à eficiência energética, entre outros fatores.

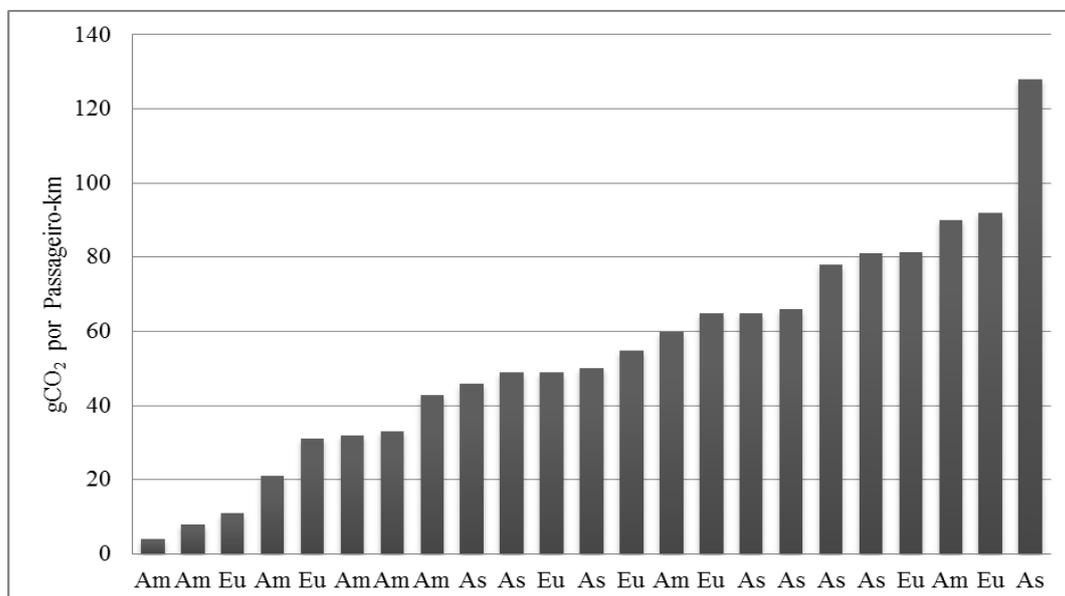


Figura 1: Emissão indireta em CO₂e, pelo uso da eletricidade, nos metrô do Grupo CoMET/NOVA, em 2011 (CoMET, 2012a)

A tabela 1 apresenta os resultados de emissões em alguns metrô, de acordo com os escopos definidos pelo IPCC, além do percentual de participação em cada um dos escopos.

Tabela 1: Resultados das emissões produzidas em 4 sistemas metroviários

	Londres	Porto	São Paulo	Rio de Janeiro
Escopo 1: Emissões diretas	14.156 tCO ₂ e	197 tCO ₂ e	1.477 tCO ₂ e	2.029 tCO ₂ e
Escopo 2: Emissões indiretas, por eletricidade	619.000 tCO ₂ e	17.400 tCO ₂ e	38.928 tCO ₂ e	5.690 tCO ₂ e
Escopo 3: Outras emissões indiretas	121.281 tCO ₂ e	Não calculado	3.198 tCO ₂ e	226 tCO ₂ e
Total de emissões produzidas	754.437 tCO ₂ e	17.597 tCO ₂ e	43.603 tCO ₂ e	7.945 tCO ₂ e
Emissões por passageiro-km	93gCO ₂ e	66gCO ₂ e	3,3gCO ₂ e	4gCO ₂ e
% participação do Escopo 1	1,9%	1,1%	8,7%	25,5%
% participação do Escopo 2	82,0%	98,9%	76,5%	71,6%
% participação do Escopo 3	16,1%	----	14,8%	2,8%
Ano Base das Emissões	2008	2010	2011	2011
FONTES:	London Underground (2009)	Metro do Porto (2011)	Metrô de São Paulo (2013)	MetrôRio (2012)

O Metrô do Rio de Janeiro - MetrôRio - disponibiliza uma extensão da rede, em ônibus exclusivo, no serviço chamado de “Metrô na Superfície”, em que ônibus fazem trajetos que não são atendidos pelo sistema metroviário. Por disso, as emissões do Escopo 1 representaram 25,5% do total das emissões do sistema, sendo a maior parte delas (91,63%) devida à frota locada dos 32 ônibus que realizaram esse serviço. Nos demais sistemas apresentados essas emissões diretas não ultrapassaram 9%, em virtude da não utilização direta de ônibus nos trajetos dos metrôs, evitando a queima direta de combustível em larga escala. Os resultados do Escopo 2 são os mais representativos para todos os metrôs pesquisados, já que existe um grande consumo de energia em todos os sistemas. Já para o Escopo 3 os valores variam muito em função dos itens cobertos, que são opcionais, variando de 2,8% a 16,1%, podendo até mesmo um metrô não contabilizar esse item, por não ser obrigatório, como aconteceu com o Metrô do Porto. Em todos os casos de contabilização, as outras emissões indiretas foram maiores que as emissões diretas e menores que as emissões indiretas por uso da eletricidade.

O Metrô de Londres consome mais de 1 TWh por ano, valor responsável por 2,8% de todo o consumo da cidade, sendo o seu maior consumidor individual. Em 2008, suas emissões por eletricidade representaram 82% do total de emissões do metrô, sendo 2/3 provenientes dos serviços de trens (London Underground, 2009). Em 2010, o Metrô de São Paulo consumiu 0,55 TWh, equivalente a um consumo médio de 3,5 milhões de residências, sendo a tração dos trens responsável por 80% da energia consumida (Metrô de São Paulo, 2011).

3.3 Apresentação e aplicações de abordagens utilizadas na determinação das emissões em metrôs

- *Emissão produzida* – É aquela descrita no inventário de emissões de gases do efeito estufa, de acordo com as diretrizes do IPCC – Painel intergovernamental sobre mudanças climáticas e da norma ISO 14.064.
 - ✓ A aplicação para essa abordagem foi apresentada nesse trabalho, na tabela 1.

- *Emissão evitada* – É a redução na emissão de CO₂ em função da operação do sistema metroviário, considerando que milhares de passageiros deixam de utilizar outros meios de transportes mais poluentes, como automóveis, ônibus, motos e vans, para utilizar o metrô.
 - ✓ Essa abordagem foi utilizada pelo Metrô de São Paulo no inventário de gases do efeito estufa de 2012, chegando-se ao resultado de 821 mil tCO₂e. De acordo com o Metrô de São Paulo (2013) “considerando essas emissões evitadas com a existência do Metrô e as emissões geradas em decorrência do consumo de energia elétrica para tração dos trens, há um balanço líquido de emissões evitadas de mais de 790 mil tCO₂e”.

- *Emissão no ciclo de vida* – É a estimativa da quantidade de CO₂ 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 CO₂ sob a avaliação do ciclo de vida (ISO, 2009).
 - ✓ Chester (2008) avaliou alguns sistemas de transporte dos Estados Unidos com o objetivo de construir um inventário de ciclo de vida para vários meios de transporte. Os sistemas de São Francisco BART (*Bay Area Rapid Transit*) e MUNI (*San Francisco Municipal Railway*), que possuem características de metrôs, quando avaliadas as emissões das fases de construção, tiveram um crescimento em relação às emissões operacionais de, respectivamente, 119% e 146%, por passageiro-km. Nesse estudo não foram considerados a construção dos túneis e pontes e nem o fim de vida dos veículos. As emissões de construção foram normalizadas para o tempo de vida dos trens, considerado como 26-27 anos. Em levantamento posterior de Chester e Hovarth (2009) nos metrôs de Nova Iorque e Chicago, quando considerada a avaliação do ciclo de vida, houve um aumento das emissões por passageiro-km em relação à operação, de 94% no Metrô de Nova Iorque e de 75% no de Chicago.

- *Emissão operacional* – É a emissão de CO₂ relacionada a toda operação do sistema metroviário, ou seja, a todo o consumo de eletricidade necessário à operação do metrô, seja a energia das estações, do canteiro de obras, dos prédios administrativos, de tração dos trens e outras, sendo amplamente utilizada para fins de comparação de resultados entre os sistemas metroviários (CoMET, 2008). A diferença da abordagem operacional para a abordagem da emissão produzida é que a primeira desconsidera as emissões diretas (escopo 1) e as outras emissões indiretas (escopo 3).
 - ✓ A aplicação para essa abordagem foi apresentada nesse trabalho, na figura 1.

- *Emissão da energia de tração dos trens* – É a emissão de CO₂ relacionada somente ao “combustível” do sistema metroviário, que é a eletricidade que realiza a movimentação dos trens. Ela está diretamente ligada ao consumo de energia de tração dos trens dos metrô, desprezando outros tipos de consumo de energia elétrica do sistema, como prédios administrativos, estações, canteiro de obras e outras. É a mais apropriada para a comparação de resultados com outros meios de transporte quando se analisa a emissão provocada apenas pelo consumo de combustível.
 - ✓ A aplicação para essa abordagem foi realizada nos Metrô de Londres, do Rio de Janeiro e em 2 metrô do grupo CoMET/NOVA, sendo apresentados, na tabela 2, apenas os continentes dos sistemas do grupo CoMET/NOVA. Observa-se a oscilação de resultados, em gramas por passageiro-km, decorrentes das variadas matrizes energéticas utilizadas na geração de energia.

Tabela 2: Emissões da energia de tração dos Metrô de Londres, do Rio de Janeiro e Metrô do grupo CoMET/NOVA (London Underground, 2009), (MetrôRio, 2012) e (MetrôRio, 2013)

Sistemas metroviários	Emissão produzida (kgCO ₂)	Emissão em gCO ₂ e por passageiro-km
Londres	473.491.000	48
Rio de Janeiro	4.110.000	2
Américas (grupo CoMET/NOVA)	1.001.357.009	60
Ásia / Oceania (grupo CoMET/NOVA)	509.307.835	97

4. AÇÕES DE MITIGAÇÃO DA EMISSÃO DE CO₂ EM SISTEMAS METROVIÁRIOS

Na operação dos metrô 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 passageiro-km menor será a emissão. CoMET (2008 e 2012b) define alguns fatores que contribuem para a eficiência energética, como:

a) 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 Metrô 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, equipamentos de ventilação eficientes e bem localizados, permitindo uma perfeita comunicação com o ambiente externo;

b) Controle rigoroso da temperatura no interior dos trens, nas estações e nos túneis, possibilitando ajustes na ventilação e ar condicionado;

c) Uso de “*regenerative braking*”, sistema que, na frenagem, reconduz a energia de volta ao sistema, ao invés de dissipá-la sob forma de calor;

d) Uso de lâmpadas LED - *Light emitting diode* na iluminação dos trens e estações;

e) 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;

f) Carga balanceada de passageiros por viagem, para evitar viagens com poucos passageiros. O ajuste dos intervalos entre as viagens deve propiciar um melhor resultado na carga de passageiros por viagem, melhorando a relação de energia consumida; e

g) 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 necessária.

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. O conhecimento pleno dos impactos possibilitará a avaliação de áreas onde seja possível atenuar a emissão de carbono. Diretrizes governamentais influem decisivamente quando estabelecem metas de redução da emissão e apoio a projetos específicos nesse sentido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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 03/08/12
- Chester, M. e A. Horvath (2009) 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 10/08/12
- CoMET (2008) Energy Costs, Renewables and CO₂ Emissions Nova Phase 10 Case Study. Community of Metros.
- CoMET (2012a) Key Performance Indicators – Annual Report (2011 data). Community of Metros.
- CoMET (2012b) Temperature Control and Air Quality. Community of Metros.
- EPE (2012) Empresa de Pesquisa Energética - Balanço energético nacional. Disponível em <https://ben.epe.gov.br/downloads/Resultados_Pre_BEN_2012.pdf>. Acesso em 02/08/12
- IEA (2009) International Energy Agency - Transport, energy and CO₂. Disponível em <<http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2009/transport2009.pdf>>. Acesso em 01/08/12

ISO (2009) ISO 14040:2009 Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura.

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 13/08/12

Metro do Porto (2011) Relatório de Sustentabilidade de 2010. Disponível em <http://www.metrodoporto.pt/PageGen.aspx?WMCM_PaginaId=17246>. Acesso em 07/07/13

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 10/07/12

Metrô de São Paulo (2013) Inventário de emissões de gases do efeito estufa Metrô 2012. Disponibilizado pela Coordenadora de Sustentabilidade e Ecnegócios do Metrô de São Paulo, Cacilda Bastos Pereira da Silva.

MetrôRio (2012) Inventário de emissões de gases do efeito estufa Metrô Rio 2011. Disponibilizado por Anderson Correa, Gerente da área de Saúde e Meio Ambiente do Metrô do Rio de Janeiro.

MetrôRio (2013) Informações fornecidas por funcionários do Metrô do Rio de Janeiro: Paulo Lacerda, Analista de *beenchmarking*; e Daniel Habib, Gerente de Operações.

DADOS DOS AUTORES

Carlos Eduardo Sanches de Andrade, doutorando em Engenharia de Transportes na COPPE/UFRJ. Formações completas em duas graduações, duas pós-graduações lato sensu e no Mestrado em Engenharia de Transportes. Engenheiro do MetrôRio desde 2003, com experiência nas Gerências de Engenharia e de Operação. Atualmente, trabalhando na Gerência de Inteligência de Mercado.

Márcio de Almeida D'Agosto, coordenador e professor do curso de pós-graduação (Mestrado e Doutorado) em Engenharia de Transportes da COPPE/UFRJ. Formações completas em Mestrado e Doutorado em Engenharia de Transportes. Presidente da ANPET – Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes.