

EMISSÃO DE CO₂ EM SISTEMAS METROFERROVIÁRIOS SOB A ABORDAGEM DE AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

Carlos Eduardo Sanches de Andrade

Ilton Curty Leal Junior

Isabela Araujo Bittencourt

COPPE / Universidade Federal do Rio de Janeiro

PET – Programa de Engenharia de Transportes

RESUMO

A avaliação do ciclo de vida de um sistema de transporte metroferroviário mostra uma grande participação da construção da infraestrutura na emissão de carbono, quando comparada à emissão durante a operação do sistema. Ainda assim o longo tempo de vida útil dessa infraestrutura pode fazer com que a emissão total seja menor que a emissão que ocorreria caso o sistema não tivesse sido implantado. Este trabalho visa analisar a emissão de CO₂ em sistemas metroferroviários, utilizando a abordagem da avaliação do ciclo de vida. Através dessa análise serão identificados os estágios e suas emissões, sendo estabelecidas as condições que favorecem, ou não, a justificativa da implantação do sistema em termos de emissão de carbono. Essas condições estão relacionadas ao projeto, à tecnologia utilizada, à matriz de energia utilizada na operação, aos materiais empregados, à carga de passageiros transportados e às alternativas de transporte ao sistema metroferroviário.

ABSTRACT

The evaluation of the life cycle of a metrorail transport system shows a large share of the construction of infrastructure in the carbon emissions, when compared to the emission during operation of the system. Even so long lifetime of this infrastructure can make the total emission lower than the emission that would occur if the system had not been deployed. This paper aims to analyze the CO₂ emissions in metrorail systems using the life cycle evaluation approach. This analysis will identify the stages and their emissions and established the conditions that favor or not, the justification of the system in terms of carbon emissions. These conditions are related to the design, the technology used, the matrix of energy used in the operation, the materials employed, the load of passengers and transportation alternatives to the metrorail system.

1. INTRODUÇÃO

Em 2007 a ONU – Organização das Nações Unidas publicou o relatório “*Climate Change*” destacando o efeito dos gases do efeito estufa nas variações climáticas e no aumento da temperatura média do planeta. As nações foram, então, estimuladas a ações de redução da emissão desses gases. O principal gás do efeito estufa é o dióxido de carbono (CO₂).

A emissão de CO₂ em sistemas de transportes responde por cerca de 25% do total de emissões globais, sendo o transporte privado responsável pela maior parte dessas emissões. É estimado que até 2050 a energia utilizada nos sistemas de transporte dobre, o que aumentaria ainda mais a emissão 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 CO₂ equivalente (CO₂e), correspondendo a 48,5% do total de emissões associadas à matriz energética brasileira (EPE, 2012). A consciência ambiental vem crescendo em todo mundo, e os governos vêm 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 foram estabelecidos, pelo decreto 43.216 de 30/09/2011, objetivos de redução, até 2030, de 30% nas emissões de gases do efeito estufa pelos transportes, em relação ao ano de 2010.

No setor de transportes um bom sistema de transporte público pode contribuir para a solução do problema, diminuindo o uso de transporte privado. Os sistemas metroferroviários são reconhecidos como tendo a menor emissão de CO₂ na comparação com outros meios de transportes motorizados. Contudo, considerando as emissões totais, incluindo, por exemplo, a construção da infraestrutura, é preciso investigar se esses sistemas continuam, em termos de emissão de CO₂, como a melhor alternativa de transporte.

O objetivo deste trabalho é pesquisar a ACV - Avaliação do Ciclo de Vida em sistemas metroferroviários de passageiros, com o objetivo de estimar a importância de cada estágio do ciclo de vida na quantidade de CO₂ emitida durante o tempo de vida útil do sistema e as condições que justifiquem, ou não, a implantação desses sistemas. A seção 1 constitui-se como uma introdução, onde houve uma breve contextualização do estudo em questão e foi definido o objetivo. A seção 2 analisa os componentes dos sistemas metroferroviários. A seção 3 aborda a ACV e as normas, modelos de avaliação e ferramentas de software a ela relacionadas. A seção 4 analisa a emissão de CO₂ em diferentes sistemas metroferroviários durante o ciclo de vida e as condições que justificam a implantação desses sistemas. A seção 5 apresenta as conclusões.

2. A AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

A ACV é uma ferramenta de gestão do ciclo de vida de um produto ou serviço. A norma ISO 14.040 aborda a ACV, relacionando essa avaliação com os aspectos ambientais e potenciais impactos ambientais através do ciclo de vida do produto/serviço, desde a extração de matéria prima, passando pela produção, uso, tratamento do fim de vida, reciclagem e disposição final. 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). Essa metodologia consiste de quatro estágios principais: 1) Definição do objetivo e escopo do estudo e determinação de seus limites e nível de detalhe; 2) análise de inventário, que envolve coleta de dados e cálculo dos impactos ambientais; 3) avaliação dos impactos; e 4) interpretação dos resultados (ISO, 2009).

O ciclo de vida pode ser abordado em sua totalidade, denominado “*cradle to grave*” (da extração à disposição final), ou parcialmente, como “*cradle to gate*” (da extração à produção) e “*gate to gate*” (cadeia de produção, que adiciona valor agregado ao produto).

2.1 Modelos de ACV

Os modelos comumente utilizados são o modelo baseado em processos e o modelo baseado em análise econômica das entradas e saídas. O modelo baseado em processos identifica e quantifica as entradas (recursos de materiais e energia) e saídas (emissões e resíduos) de cada estágio do ciclo de vida, baseado na modelagem da unidade de processo. A identificação das entradas pode se estender a vários níveis, aumentando a complexidade. É necessário, portanto, estabelecer os limites da avaliação. O modelo baseado em análise econômica é uma maneira simplificada de se fazer a ACV. Procura-se uma associação entre os valores monetários da produção das indústrias e os efeitos ambientais. Muitas nações levantam e publicam o modelo econômico de grande quantidade de indústrias, facilitando a obtenção desses dados. É sempre esperado um certo grau de incerteza nos resultados de uma ACV. Por isso a ACV é usualmente enriquecida com análises sensitivas e de incerteza. A análise sensitiva mostra

quão sensíveis são os resultados para o método adotado e a análise de incerteza quantifica a incerteza dos resultados.

2.2 Ferramentas de software para a ACV

Várias ferramentas de software (SIMAPRO, GREET, GABI, etc.) foram desenvolvidas por órgãos governamentais ou empresas privadas para auxiliar na avaliação do ciclo de vida. Algumas dessas ferramentas contêm bancos de dados já levantados para alguns processos, enquanto outras apenas apresentam uma sistematização do modelo, orientando e facilitando ao usuário sua utilização em um caso real. Utilizam fórmulas, algoritmos e simuladores, com uma interface gráfica interativa e rodam em computadores pessoais.

3. COMPONENTES DOS SISTEMAS METROFERROVIÁRIOS

Os componentes dos sistemas metroferroviários são a infraestrutura e os veículos que transportam passageiros.

3.1 Infraestrutura

A infraestrutura é composta basicamente por quatro elementos, que são:

- a) *Via permanente*: estrutura por onde correm os trens. É composta de trilhos - estruturas compostas de perfis de aço laminado, dispostos de forma paralela entre si, que compõem a via férrea propriamente dita; dormentes - estruturas perpendiculares aos trilhos onde eles são colocados e repousam; fixação - elementos para fixar os trilhos nos dormentes; lastro - material granular obtido pela britagem de rochas e que circundam os dormentes e trilhos. Fornece a base de sustentação do sistema. Conforme o tipo de solo pode ser necessário um tratamento com a colocação de fundações. Os dormentes podem ser de madeira ou concreto. Os dormentes de concreto podem ser: monobloco (um único bloco); bibloco (dois blocos ligados por uma barra de aço); e blocos independentes, acomodados na via em placas (*slab track*). As fixações podem ser: rígidas (pregos e parafusos) e elásticas. Há duas categorias de vias permanentes: com e sem lastro. As vias sem lastro são apoiadas em *slab tracks* e podem ser de diferentes tipos.
- b) *Estações*: locais de embarque e desembarque de passageiros. Podem ser subterrâneas, ao nível do solo, ou elevadas, acima do nível do solo.
- c) *Sistemas de eletrificação e sinalização*: sistemas de energização dos trilhos ou cabos necessários para a movimentação dos veículos que transportam os passageiros. O sistema de sinalização permite o controle das partidas e paradas dos veículos.
- d) *Sistemas de telecomunicações*: permitem o controle total da operação do sistema.

3.2 Veículos

Os veículos são os trens. Podem ser de alta velocidade (acima de 200 km/h) ou convencionais (até 200 km/h). A infraestrutura para ambos é semelhante e o combustível mais utilizado é a energia elétrica. Os trens de metrô e ferrovias suburbanas cobrem trajetos dentro das cidades, enquanto os trens de alta velocidade cobrem grandes distâncias ligando diferentes cidades.

4. EMISSÃO DE CO₂ NA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE SISTEMAS METROFERROVIÁRIOS

A emissão de CO₂ nos sistemas metroferroviários ocorre nas diversas fases do seu ciclo de vida, ou seja, nas fases operacionais e não operacionais, como mostrado na figura 1.

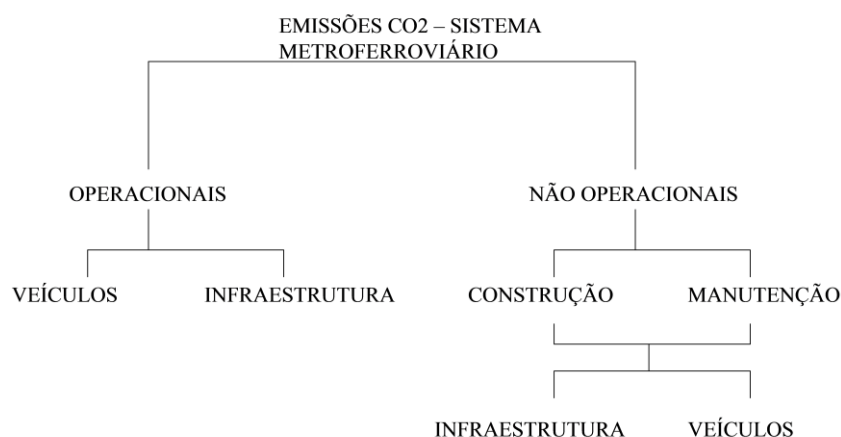


Figura 1: Componentes das emissões na ACV em sistemas metroferroviários

A infraestrutura e os veículos compreendem as etapas de construção, operação, manutenção e fim de vida. Esta última etapa é geralmente desprezada por não haver propriamente um fim de vida completo, no sentido tradicional, que envolve o completo desuso e descarte. O combustível, que no sistema metroferroviário 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 metroferroviários 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).

As emissões operacionais são devidas ao consumo de energia na movimentação dos veículos e na operação da infraestrutura e as emissões não operacionais são devidas à construção e à manutenção da infraestrutura e dos veículos.

A construção da infraestrutura do sistema 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 pesquisas publicadas da ACV em sistemas metroferroviários têm diferentes abordagens e limites do escopo, contribuindo para dificuldades de comparação entre os estudos realizados. A grande 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 numa informação deficiente sobre a emissão dos sistemas metroferroviários.

Os processos de fabricação do cimento e do aço, muito utilizados nos sistemas metroferroviários, consomem grandes quantidades de energia. São liberadas na produção de uma tonelada de cimento, de 0,65 a 0,92 tCO₂, com uma média mundial de 0,83 tCO₂ (IEA, 2007). A produção de uma tonelada de aço libera até 1,9 tCO₂ (WORLDSTEEL ASSOCIATION, 2012). As emissões de CO₂ pela indústria de cimento em todo o mundo são responsáveis por cerca de 5% das emissões globais (WORREL *et al.*, 2001). A tecnologia e as fontes de energia utilizadas no processo de fabricação do cimento e do aço são fatores importantes para a maior ou menor emissão de gases. No Brasil, segundo MCT (2009), a produção de cimento, em 2005, emitiu 14.349.000 tCO₂, sendo responsável por 56% das

emissões de processos industriais e 0,9% das emissões do país e a indústria siderúrgica emitiu 46.418.000 tCO₂, sendo responsável por 13% das emissões do setor de energia e 2,9% das emissões do país. Segundo Lima (2010) a indústria brasileira de cimento emite menos que a média mundial (659 kgCO₂/t contra 810 kgCO₂/t).

4.1 A emissão de CO₂ na fase operacional do ciclo de vida dos sistemas metroferroviários

Os sistemas metroferroviários são grandes consumidores de energia elétrica. 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. Suas emissões de CO₂ por eletricidade, em 2008, foram de 619.000 tCO₂e, representando 82% do total de emissões do metrô, sendo 2/3 provenientes dos serviços de trens (London Underground, 2009). De acordo com MTA (2008) o Metrô de Nova Iorque consome 3,4 TWh a cada ano. Em 2011, a operação do Metrô de São Paulo consumiu 561.341 MWh, emitindo 15.477 tCO₂e, sendo a tração elétrica dos trens responsável por aproximadamente 77% da energia consumida (Metrô de São Paulo, 2013).

O valor das emissões depende das fontes energéticas utilizadas pelo sistema gerador dessa energia. Nesse aspecto os sistemas metroferroviários do Brasil são favorecidos pela predominância de fontes hidrelétricas na matriz energética do país. Em 2011, de acordo com dados do EPE (2012), as usinas hidrelétricas foram responsáveis por 81,7% da geração de energia elétrica. O grupo CoMET/NOVA é um grupo internacional de sistemas metroferroviários com o intuito de buscar as melhores práticas de operação e gerenciamento. Na maioria dos componentes desse grupo localizados na Europa, Ásia e Oceania há predominância de fontes térmicas na matriz energética, com um *mix* de carvão, óleo e gás, enquanto que naqueles localizados nas Américas há um equilíbrio, onde metade deles tem predominância de fontes térmicas e a outra metade, de fontes hidrelétricas (CoMET, 2008). Levantamento em 23 sistema de todos os continentes, do grupo CoMET/NOVA, concluiu que as emissões por eletricidade, em 2011, em gCO₂e por passageiro-km, variaram de 2 a 130, resultado influenciado pelas diferentes matrizes energéticas (CoMET, 2012).

Além das emissões por eletricidade, que são emissões indiretas, produzidas na geração da energia, os sistemas metroferroviários também produzem suas próprias emissões diretas. As emissões diretas, indiretas pelo uso da eletricidade e outras emissões indiretas são contabilizadas anualmente no inventário de emissões de gases do efeito estufa da empresa metroferroviária. A tabela 1 mostra a emissão total e a emissão, em gCO₂e por passageiro-km, de alguns sistemas metroviários:

Tabela 1: Resultados dos inventários de emissões de gases do efeito estufa dos metrô

	São Paulo	Rio de Janeiro	Nova Iorque	Bilbao	Lisboa
Ano Base Emissões	2011	2011	2010	2010	2010
Emissões Produzidas	20.440 tCO ₂ e	7.945 tCO ₂ e	684.000 tCO ₂ e	14.495 tCO ₂ e	56.906 tCO ₂ e
Emissão em g/passag-km	3	4	42	25	66
Fontes:	Metrô de São Paulo (2013)	MetrôRio (2012)	NYC (2011) MTA (2012)	Metro Bilbao (2012)	Metro de Lisboa (2011)

Observa-se que os metrô do Rio de Janeiro e de São Paulo apresentam uma emissão, por passageiro-km, bem menor que os metrô de Nova Iorque, Bilbao e Lisboa. A tabela 2 permite a comparação das emissões de metrô, ônibus e carros nas mesmas cidades.

Tabela 2: Emissões em gCO₂e por passageiro-km dos metrô, ônibus e carros

	São Paulo	Rio de Janeiro	Nova Iorque	Bilbao	Lisboa
Metrô	3	4	42	25	66
Ônibus	16	16	158	135	85
Carros	127	127	256	208	180
Fontes (metrô)	Metrô de São Paulo (2013)	MetrôRio (2012)	MTA (2012)	Metro Bilbao (2012)	Metro de Lisboa (2011)
Fontes (ônibus e carros)	IPEA (2011)				AGENEAL (2005)

Nota: A emissão dos ônibus no Brasil considera uma carga de lotação máxima (80 passageiros por viagem).

Observa-se que em todos os metrô a emissão é bem menor do que as emissões de carros e ônibus, confirmando o melhor desempenho dos sistemas metroferroviários, na fase operacional de avaliação do ciclo de vida, em relação aos outros meios de transportes.

4.2 A emissão de CO₂ nas fases não operacionais do ciclo de vida dos sistemas metroferroviários

A construção da infraestrutura de um sistema metroferroviário é a mais representativa das fases não operacionais quanto à emissão de carbono (Morita *et al.* 2011). A figura 2 dá uma visão dos elementos envolvidos na construção da infraestrutura.

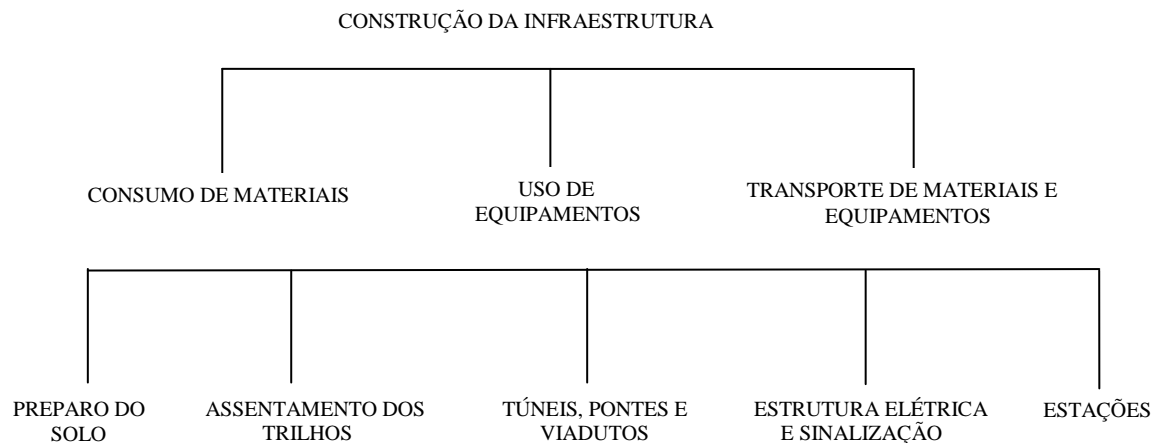


Figura 2: Elementos da construção da infraestrutura

4.2.1 Preparo do solo

Para a instalação da via férrea é necessário realizar escavações e preenchimento do solo, que é preparado para receber a via. O próprio solo escavado é usado no preenchimento de outras partes. Pode haver necessidade de trazer solo de outras regiões mais afastadas, aumentando o uso de transporte. Stripple (2001) classificou as escavações em 4 tipos, do mais simples ao mais complexo, indicando, para o equipamento utilizado, o consumo de combustível por hora e permitindo a determinação da emissão produzida nessa tarefa.

4.2.2 Assentamento dos trilhos

Kiani *et al.* (2008) pesquisaram a emissão produzida durante o ciclo de vida por 3 tipos comuns de leitos de assentamento dos dormentes dos trens: a) Brita, que é o sistema convencional e mais antigo; b) “slab tracks” tipo “embedded rail”; e c) “slab tracks” tipo “cast-in-sleeper”. Esses dois últimos são sistemas mais modernos, baseados em concreto. A brita necessita de uma manutenção maior que o concreto e tem um custo e tempo de vida menor. As estruturas do tipo “slab track” têm um tempo de vida mínimo de 60 anos e máximo

de 120 anos, enquanto a brita alcança 20 e 30 anos, respectivamente. O estudo, realizado para sistemas ferroviários do Reino Unido, abrangeu todas as fases do ciclo de vida dos assentamentos, incluindo os trilhos; extração da matéria prima; manufatura dos componentes; transporte até o local; construção dos assentamentos; manutenção; renovação; desmonte dos trilhos; e reciclagem/reuso. O estudo considerou o tempo de vida de componentes da via férrea, como trilhos e fixações, como sendo entre 20 e 30 anos. A emissão média produzida, em tCO₂e, para um tempo de vida da ferrovia de 120 anos, foi cerca de 70.000 para a brita, 60.000 para o “*embedded rail*” e 50.000 para o “*cast-in-sleeper*”. Assim, levando em conta o ciclo de vida, houve uma menor emissão das estruturas de concreto, quando comparada à estrutura convencional de brita, mostrando um resultado que não era esperado, por ser o concreto um grande emissor de carbono.

Outro estudo (Milford e Allwood, 2010) analisou os tipos de vias férreas usados no Reino Unido, comparando as vias tradicionais com as tecnologias mais recentes: dormentes de concreto dos tipos *embedded rail*, *embedded double-head rail* e *embedded quadruple-head rail*, concluindo que os elementos mais importantes para a emissão de carbono são: a carga de tráfego suportada; o tempo de vida útil dos componentes da via; e a tecnologia usada no projeto da via. Diminuindo a carga de tráfego aumenta o tempo de vida útil, acarretando menor emissão. Os assentamentos baseados em concreto são mais eficientes que os convencionais, que utilizam dormentes de madeira ou aço. Os trilhos “*embedded double-head*” têm tempo de vida útil maior que os convencionais, contribuindo para diminuir a emissão, enquanto os “*quadruple-head*” não se mostraram mais eficientes que os “*double-head*”. A implementação dessas tecnologias na rede ferroviária do Reino Unido contribuiria para uma redução de 40% na emissão de CO₂ em relação ao projeto convencional.

4.2.3 Túneis, pontes e viadutos

Estudo realizado para o ciclo de vida da infraestrutura de túneis de uma estrada na Suécia avaliou três tipos de túneis: o primeiro escavado na rocha e sem concreto, com 7,5 km; o segundo escavado na terra e concretado, com 2,5 km; e o terceiro escavado na rocha e concretado, com 10 km. O tempo estimado de vida foi de 100 anos. Os túneis com utilização de concreto tiveram uma emissão por metro de construção muito maior do que o escavado na rocha sem concreto, indicando a grande importância do concreto nas emissões. Na média as emissões dos três túneis durante a construção revelou que 65% foram provenientes dos materiais utilizados, 22% da construção no local, 3% do transporte de materiais e 10% da eliminação dos resíduos inertes. Durante todo o ciclo de vida as fases não operacionais responderam por 44% das emissões. Neste caso a operação foi a responsável pelo maior impacto, devido ao sistema utilizado na iluminação e ventilação dos túneis (Miliutenko, 2012).

Em estudo semelhante desenvolvido por Grossrieder (2011) para um projeto de uma futura ferrovia na Noruega, chegou-se a uma emissão, por metro-ano, para um tempo de vida de 100 anos, de 18 kgCO₂e para os trechos abertos, 59 kgCO₂e para os túneis e 90 kgCO₂e para as pontes, confirmando o grande impacto do aço e do cimento, utilizados nos túneis e pontes, na emissão de gases. As fases não operacionais responderam por 88% das emissões.

4.2.4 Estrutura elétrica, sinalização e estações

Svensson e Eklund (2007) afirmam que a construção da estrutura elétrica e da sinalização tem menor relevância quando comparada à construção da via permanente. Em um levantamento

das emissões médias de CO₂, em kg/km, na construção da infraestrutura de ferrovias do Reino Unido, constatou-se que a construção das estações teve uma emissão muito pequena, de apenas 0,01 contra 68,2 da via permanente (NETWORK RAIL, 2009).

4.2.5 Importância das fases não operacionais na emissão de carbono

As pesquisas publicadas que incluem ferrovias, ou sistemas mistos com ferrovias e metrô, apontam para significativas contribuições na emissão de gases das fases não operacionais. 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* – cobre São Francisco e cidades vizinhas, num total de 104 milhas e 44 estações, das quais 15 subterrâneas) e MUNI (*San Francisco Municipal Railway* – cobre São Francisco, com 33 estações, das quais 9 subterrâneas), que possuem características de metrô, quando avaliadas as emissões das fases não operacionais, 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 não operacionais foram normalizadas para o tempo de vida dos trens, considerado como 26-27 anos. Foi utilizado o software de avaliação do ciclo de vida SIMAPRO. Em levantamento posterior de Chester e Hovarth (2009a) nos metrôs de Nova Iorque e Chicago, quando considerada a avaliação do ciclo de vida, houve um aumento das emissões em relação à operação de 94% no Metrô de Nova Iorque e de 75% no Metrô de Chicago, também considerando a emissão por passageiro-km.

Estudo realizado em 2008 por Stripple e Uppenbergh (2010) para analisar o ciclo de vida da maior ferrovia da Suécia, projetada para trens de alta velocidade, revelou uma importância ainda maior das fases não operacionais, respondendo por 99,1% das emissões contra apenas 0,9% da operação. Tal fato decorreu, entre outros fatores, do vulto da ferrovia (183 km, 143 pontes e 25 km de túneis) e do desflorestamento da área por onde passam os trilhos. O desflorestamento e o material usado na infraestrutura responderam pela maior parte das emissões (16,3% e 52,7%, respectivamente). Nesse levantamento constatou-se que o aço e o cimento, entre todos os materiais utilizados na construção da ferrovia, foram os maiores responsáveis pela emissão. O aço, utilizado principalmente nos trilhos, respondeu por 43% das emissões dos materiais usados na infraestrutura e o cimento, utilizado principalmente nos túneis e pontes, por 32%. O tempo de vida dos trens foi estimado em 30 anos e da infraestrutura em 60 anos. Foi utilizado o software de avaliação do ciclo de vida KCL-ECO.

Chester e Hovarth (2009b) afirmam que o consumo de energia e as emissões de gases nos sistemas metroferroviários são mais fortemente influenciados pelos componentes não operacionais do que nos sistemas de transporte rodoviários ou aéreos.

Svensson e Eklund (2007) estudaram as ferrovias da Suécia e procuraram determinar a influência da construção da infraestrutura na emissão de carbono. Analisando os principais componentes encontrados nessas ferrovias, concluíram que o material mais utilizado é a brita (13.695 t), seguida do concreto (210 t). Contudo a maior quantidade de energia (77% do total) é consumida na produção do aço e ferro utilizados, embora representem, em massa, apenas 2% do total. O sistema da via férrea (trilhos e sua colocação) é o mais importante, na demanda de energia e consequente emissão de gases, utilizando aço, ferro, concreto e brita.

Estudo realizado das emissões médias de CO₂, em kg/km de via permanente, na construção da infraestrutura de ferrovias do Reino Unido mostra que as vias sem brita têm emissão inicial maior (270,6) que as vias com brita (236,5), por utilizarem mais concreto e aço. O componente de maior emissão foi a via permanente, com 68,2 kgCO₂e/km. A abertura de túneis mostrou-se uma atividade de grande emissão, pelo uso intensivo de concreto e aço. Cada km de via permanente em seções de túneis emitiu quase seis vezes mais que em seções abertas (NETWORK RAIL, 2009).

4.3 Justificativas para implantação de projetos de sistemas metroferroviários, sob a ótica da emissão de CO₂

Chang e Kendall (2011) analisaram o projeto de construção da infraestrutura de uma ferrovia ligando São Francisco a Anaheim. A infraestrutura considerada compreende a construção dos assentamentos dos trilhos, dos túneis, das estruturas aéreas, da rede elétrica e da preparação do solo, ficando de fora do estudo a construção das estações e a manutenção. O resultado final apontou uma emissão de 2,4 milhões de tCO₂e, sendo a produção de material responsável por 80% das emissões, o transporte desse material por 16%, e a construção dos equipamentos de operação por somente 4%. Os túneis e estruturas aéreas, embora representassem apenas 15% do comprimento da rota foram responsáveis por 60% das emissões. Foi estimado que essa ferrovia evitaria, por ano, a emissão de 1,15 milhões de tCO₂e pela migração de usuários de transportes mais poluentes, resultando em cerca de 2 anos para a recuperação dos efeitos da emissão de gases. Contudo o tempo de recuperação é altamente dependente da quantidade de usuários da ferrovia. Uma queda de 75% na quantidade de usuários prevista aumentaria o tempo de recuperação para 20 anos.

Um projeto de ferrovia de alta velocidade (Europabanan), para transporte de carga e passageiros, na Suécia, foi avaliado por Akerman (2011), abrangendo: a) A operação dos trens; b) a manufatura e manutenção dos trens; c) a construção, manutenção e operação da infraestrutura; e d) a produção e transporte de combustíveis. Na construção da infraestrutura o componente de maior emissão por km de construção são as pontes (12.870 tCO₂e) e túneis (7.119 tCO₂e). Em menor escala estão o sistema de trilhos da via férrea (2.954 tCO₂e); desflorestamento (1.038 tCO₂e); e eletrificação, sinalização e telecomunicações (460 tCO₂e). Considerando toda a ferrovia e um tempo de vida de 60 anos, a emissão total por ano é de 66.000 tCO₂e, sendo a operação responsável por 11.800 tCO₂e. Observa-se, então, que, considerando o ciclo de vida da ferrovia, as emissões crescem mais de 5 vezes em relação à operação. Porém, como a construção da ferrovia vai permitir o menor uso de carros, caminhões e aviões as emissões totais seriam reduzidas em 550.000 tCO₂e por ano, sendo 60% dessa redução devida ao deslocamento do transporte de carga de caminhões e 40% ao deslocamento do transporte de passageiros de carros e aviões.

Analisando projetos futuros, Westin e Kageson (2012) afirmam que a construção de ferrovias de alta velocidade na Suécia só pode ser compensada, em suas altas emissões de carbono, por um volume anual de mais de 10 milhões de viagens. Grande parte do deslocamento de tráfego deve vir da aviação e o projeto não deve fazer uso extensivo de túneis. O tamanho do benefício de carbono líquido de uma futura ferrovia de alta velocidade depende de alguns parâmetros, entre eles: a energia por passageiro-km necessária para diferentes veículos; a emissão produzida por diferentes combustíveis; a origem da eletricidade; a taxa média de ocupação de diferentes modos de transporte; e o efeito de deslocamento de passageiros de outros modos de transporte. Um modelo paramétrico foi usado para calcular a mudança nas

emissões de CO₂ por passageiro-km quando uma pessoa se desloca de algum meio de transporte para o trem de alta velocidade. Devido à incerteza desse efeito, 5 cenários foram analisados, sendo aplicada a simulação de Monte Carlo. Na simulação aplicada a alteração nas emissões por passageiro-km e as emissões líquidas resultantes para os 5 cenários foram calculadas usando valores aleatórios para os parâmetros de distribuição. O processo foi repetido um milhão de vezes até que distribuições estáveis fossem obtidas.

Morita *et al.* (2011) realizaram abrangente estudo do ciclo de vida de ferrovias e o aplicaram em uma ferrovia na cidade de Tokyo, 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. No tempo de vida de 50 anos da ferrovia a emissão devida às fases de construção representariam apenas 35,4% do total. Na visão global a ferrovia teria uma emissão menor que outros meios de transporte, sendo, portanto, plenamente justificada.

5. CONCLUSÕES

A emissão de carbono pelos sistemas metroferroviários durante sua operação é devida principalmente à grande utilização de energia elétrica, ficando altamente dependente da matriz energética utilizada na geração da energia. Considerando apenas a fase operacional os sistemas metroferroviários emitem geralmente menos, por passageiro-km, que os demais meios de transporte que utilizam combustível não renovável. Esse resultado é influenciado também pela carga de passageiros do sistema. Os metrô do Rio de Janeiro e de São Paulo apresentaram, em 2011, valores de 4 gCO₂e e 3 gCO₂e por passageiro-km, respectivamente, na fase operacional da avaliação do ciclo de vida, pequenos quando comparados a outros sistemas metroferroviário do mundo e também com outros meios de transporte utilizados no Brasil. Esse resultado é devido principalmente à predominância de hidrelétricas na matriz energética do Brasil, resultando nas condições favoráveis de emissão na fase operacional.

Para uma avaliação mais precisa da emissão de CO₂ pelos sistemas metroferroviários é necessário considerar outros aspectos além das emissões durante a operação do sistema. A avaliação do ciclo de vida mostra uma visão mais precisa da real dimensão da emissão causada pelos sistemas metroferroviários, pois pode ser analisada sob uma perspectiva de comparação com outras soluções de transporte, permitindo concluir se o sistema avaliado representa a melhor solução de transporte, sob o ponto de vista de emissão de CO₂.

Os sistemas analisados neste trabalho indicam uma contribuição significativa das fases não operacionais nas emissões, e, entre os materiais utilizados nessas fases, o aço e o cimento são os maiores emissores. As atividades de construção de túneis e pontes são grandes emissoras, pelo uso extensivo desses materiais. Na análise das emissões das fases não operacionais a construção da infraestrutura representa a maior parcela, sendo menos representativa a construção dos veículos e a manutenção. A grande emissão das fases não operacionais, contudo, pode ser compensada pelo longo tempo de vida útil do sistema.

A existência, ou projeto de implantação, de um sistema metroferroviário, pode ser justificada pela comparação entre a emissão total desse sistema e de outras alternativas de transporte, considerando o tempo de vida útil. Outro critério é calcular o tempo de recuperação da emissão do sistema, ou seja, o tempo em que os benefícios de emissão proporcionados pela migração de usuários de outros meios de transporte superam a emissão da construção, e compará-lo com o tempo de vida útil.

Algumas condições que favorecem, na fase de construção, a justificativa para a implantação de um sistema metroferroviário, são: a) Projeto que minimize a construção de túneis e pontes; e b) uso de materiais e tecnologias de menor emissão. Na fase de operação algumas condições que favorecem são: a) Matriz energética com pouca utilização de fontes térmicas; b) eficiência energética, otimizando o consumo de energia elétrica; e c) demanda adequada de passageiros migrando de transportes de maior emissão e que possibilitem uma boa carga de passageiros nos trens. Os sistemas com pouca emissão operacional, como os metrô do Rio e de São Paulo, têm, teoricamente, maiores possibilidades de justificativa que os demais.

A proposta para trabalhos futuros é o levantamento das emissões na fase de construção de sistemas metroferroviários, quando, confrontando com as emissões operacionais, seria possível concluir se esses sistemas continuam a ser, do ponto de vista de emissão de carbono, a melhor alternativa de transporte motorizado. Os sistemas a serem analisados podem ser os sistemas já existentes, os projetos de expansão, como a Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro, ou os projetos de construção de novos sistemas, como os metrô das cidades de Curitiba e de Salvador.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGENEAL (2005) *Estratégia local para as alterações climáticas*. Agência municipal de energia de Almada. Disponível em <http://www.ageneal.pt/DirEscrita/upload/docs/ELAC_3.pdf>. Acesso em 07/07/13
- 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
- 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 03/08/12
- 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 10/08/12
- 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 (2008) Energy Costs, Renewables and CO₂ Emissions Nova Phase 10 Case Study. Community of Metros.
- CoMET (2012) Key Performance Indicators – Annual Report (2011 data). Community of Metros.
- EPE (2012) *Balanço energético nacional*. Empresa de Pesquisa Energética. Disponível em <https://ben.epe.gov.br/downloads/Resultados_Pre_BEN_2012.pdf>. Acesso em 02/08/12
- Grossrieder, C. (2011) Life-Cycle assessment of future High speed Rail in Norway. Disponível em <<http://ntnu.diva-portal.org/smash/get/diva2:441342/FULLTEXT01.pdf>>. Acesso em 15/08/12
- IEA (2007) Tracking Industrial Energy Efficiency and CO₂ Emissions. International Energy Agency. Disponível em <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/tracking_emissions.pdf>. Acesso em 30/07/12
- IEA (2009) Transport, energy and CO₂. International Energy Agency. Disponível em <<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/transport2009.pdf>>. Acesso em 01/08/12
- ISO (2009) ISO 14040:2009 Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura.
- IPEA (2011) Emissões Relativas de Poluentes do Transporte Motorizado de Passageiros nos Grandes Centros Urbanos Brasileiros. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Disponível em <http://desafios2.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/TDs/td_1606.pdf>. Acesso em 03/05/13
- Kiani, M.; T. PARRY e H. CENEY (2008) Environmental life-cycle assessment of railway track beds. *Engineering Sustainability*, v. 161, p. 135–142. DOI: 10.1680/ensu.2008.161.2.135
- Lima, J. (2010) Avaliação das consequências da produção de concreto no Brasil para as mudanças climáticas. Tese de doutorado na Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

- 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 Bilbao (2012) Huella de carbono. Disponível em <<http://metro-bilbao.cms.nuatt.es/system/attachments/4f6b1b0afc7a7b3629000001/original/huella%20de%20carbono.pdf?2012-03-22T12:28:58+00:00>>. Acesso em 07/07/13
- Metro de Lisboa (2011) *Relatório de Sustentabilidade de 2010*. Disponível em <<http://www.metrolisboa.pt/wp-content/uploads/Relat%C3%B3rio-de-sustentabilidade2010.pdf>>. Acesso em 28/06/13
- Metrô de São Paulo (2013) *Inventário de emissões de gases do efeito estufa Metrô SP 2012*. Disponibilizado por Cacilda Bastos Pereira da Silva, Coordenadora de Sustentabilidade do Metrô de São Paulo.
- 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.
- 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
- Miliutenko, S. (2012) Life cycle impacts of road infrastructure – Assessment of energy use and greenhouse gas emissions. Disponível em <<http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:503911/FULLTEXT01>>. Acesso em 10/08/12
- MCT (2009) *Inventário brasileiro de emissões e remoções antrópicas de gases do efeito estufa*. Ministério da Ciência e Tecnologia. Disponível em <<http://www.ipam.org.br/download/livro/Inventario-Brasileiro-das-Emissoes-e-Remocoes-Antropicas-de-Gases-de-Efeito-Estufa/255>>. Acesso em 10/08/12
- 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
- MTA (2008) Renewable energy task report. Metropolitan Transport Authority. Disponível em <<http://www.mta.info/sustainability/pdf/MTA%20Renewable%20Energy%20Report%2010%2029%2008.pdf>>. Acesso em 30/07/12
- MTA (2012) *Sustainability report*. Metropolitan Transport Authority. Disponível em <<http://www.mta.info/sustainability/pdf/2012Report.pdf>>. Acesso em 20/07/12
- NETWORK RAIL (2009) Comparing environmental impact of conventional and high speed rail. Network Rail, London
- NYC (2011) Inventory of New York City greenhouse gas emissions. City of New York. <http://nytelecom.vo.llnwd.net/o15/agencies/planyc2030/pdf/planyc_2011_planyc_full_report.pdf>. Acesso em 03/05/13
- Stripple, H. (2001) Life Cycle Assessment of Road - A Pilot Study for Inventory Analysis. IVL Swedish Environmental Research Institute, Stockholm. Disponível em <<http://www.ivl.se/webdav/files/B-rapporter/B1210E.pdf>>. Acesso em 05/08/12
- 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 05/08/12
- 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
- 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 16/08/12
- Worrel, E.; L. Price e N. Martin (2001) Carbon dioxide emissions from the global cement industry. *Annual Review of Energy and the Environment*. vol. 26, p. 303-329. DOI: 10.1146/annurev.energy.26.1.303

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

Iilton Curty Leal Junior (iltoncurty@gmail.com)

Isabela Araujo Bittencourt (belabittenc@globo.com)

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

Cidade Universitária – Centro de Tecnologia, Bloco D, Sala 106 – Rio de Janeiro – RJ – CEP: 21.949-900.