

“23ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA”**“4º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS”,****CATEGORIA 2**

TÍTULO: A CONTRIBUIÇÃO AMBIENTAL PROPORCIONADA PELAS OPERAÇÕES DE SISTEMAS METROFERROVIÁRIOS DE PASSAGEIROS, VISANDO À REDUÇÃO DAS EMISSÕES TOTAIS DE CO₂ DO SETOR DE TRANSPORTES DE UMA REGIÃO: APLICAÇÃO NOS SISTEMAS METROFERROVIÁRIOS DE PASSAGEIROS DO RIO DE JANEIRO – METRÔRIO E SUPERVIA

RESUMO:

As emissões de gases de efeito estufa, principalmente o dióxido de carbono (CO₂), têm sido objeto de preocupação da comunidade científica em todo o mundo. As nações, incluindo o Brasil, assumiram, na Convenção do Clima em Paris, compromissos de redução dessas emissões. O transporte é um grande emissor desses gases. O Estado do Rio de Janeiro estabeleceu legislação estabelecendo metas de redução. O transporte metroferroviário tem, geralmente, emissão menor que outros meios de transporte e deve ser considerado como solução de transporte de baixa emissão, contribuindo para que as metas de redução compromissadas sejam atingidas. Em 2016 a emissão média do MetrôRio (metrô) e da SuperVia (ferrovia) foi aproximadamente 5,5 gramas de CO₂ por passageiro-quilômetro, cerca de 3 a 37 vezes menor que automóveis e ônibus analisados. Foram consideradas as emissões na produção da energia e no uso do veículo.

1. INTRODUÇÃO

A preocupação com o meio ambiente, a nível mundial, está relacionada ao agravamento das condições ambientais decorrentes dos processos de industrialização e urbanização (Vasconcellos, 2006).

Na Rio 92, Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e Desenvolvimento, realizada no Rio de Janeiro em 1992, representantes de 179 países consolidaram uma agenda global para minimizar os problemas ambientais mundiais (UNFCCC, 1992). É reconhecido pela comunidade internacional que a concentração de certos gases na atmosfera, conhecidos como GEE – Gases de Efeito Estufa, produz o efeito conhecido como aquecimento global, aumentando a temperatura média do planeta. Esse aumento na temperatura ocasiona alterações climáticas em várias regiões do planeta, causando efeitos indesejáveis, como redução das geleiras, aumento do nível do mar, maremotos, calor ou frio excessivo, etc. O principal gás de efeito estufa é o CO₂ - dióxido de carbono (IPCC, 2014). Os setores de geração de eletricidade e calor, indústria e de transportes são grandes emissores de CO₂, produzidos pela queima de combustíveis fósseis, responsáveis em conjunto por 60% da emissão mundial em 2010 (EPA, 2017a).

No período de 1970 a 2015 a concentração dos GEE cresceu 43 % atingindo 401 partes por milhão (EPA, 2017b). Segundo o IEA (2009), o setor de transportes é responsável por 23% do total de emissões de GEE (relacionadas à energia) do mundo, fatia que deve crescer 50% até 2030. Ao longo dos anos as nações e muitas cidades vêm assumindo compromissos com ações de mitigação das emissões de GEE, como a cidade de 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 1990 (LU, 2009). Em Portugal, a cidade do Porto estabeleceu uma meta de redução de 45% até 2020, em relação a 2004 (ADEPORTO, 2010),

enquanto que a cidade de Lisboa estabeleceu meta de 20% de redução entre 2013 e 2020, tendo como base o ano de 2012 (LISBOA e-NOVA, 2014). Na cidade de Nova Iorque foi planejada uma redução de 30% das emissões até 2030, comparado a 2005 (PlaNYC, 2007).

O objetivo deste trabalho é avaliar a contribuição ambiental proporcionada pelas operações de sistemas metroferroviários de passageiros, visando à redução das emissões totais de CO₂ do setor de transportes de uma região. A aplicação do trabalho ocorreu com os dois principais sistemas metroferroviários de passageiros da cidade do Rio de Janeiro – MetrôRio (sistema metroviário) e SuperVia (sistema ferroviário). Serão aplicados os procedimentos de cálculo da emissão, em gramas de CO₂ (gCO₂) por passageiro-quilômetro (pass-km), e em gCO₂ por passageiro transportado, na operação desses sistemas, durante todos os meses do ano de 2016. Posteriormente, os resultados encontrados das emissões produzidas do MetrôRio e da SuperVia serão comparados com os resultados das emissões produzidas por diferentes sistemas de transportes rodoviários do Brasil, a fim de comprovar os benefícios ambientais de redução de emissões proporcionados pela operação do transporte metroferroviário de passageiros.

O MetrôRio é uma concessionária de transporte, sendo o serviço privado iniciado no dia 5 de abril de 1998, com previsão de vigorar durante 20 anos. A concessão foi renovada antecipadamente em Dezembro de 2007. Com isso, o serviço metroviário de passageiros do Rio de Janeiro continua sob a responsabilidade da iniciativa privada até o ano de 2038.

A concessionária MetrôRio tem sob seu controle a administração, manutenção e operação das Linhas 1, 2 e 4 do transporte metroviário de passageiros do Rio de Janeiro com um total de 53 quilômetros de extensão e com 42 estações, distribuídos nas linhas conforme abaixo:

- Linha 1 - 18km – trecho todo subterrâneo.
- Linha 2 - 22km – trecho de metrô de superfície com dois pontos de mergulho.
- Linha 4 - 13km – praticamente todo o trecho subterrâneo.

A figura 1 apresenta as linhas do MetrôRio e suas estações:



Figura 1: Rede do metrô do Rio de Janeiro (Fonte: MetrôRio, 2017a)

Em 2016 foram transportados aproximadamente 240 milhões de passageiros, que representa um aumento de 3,1% com relação ao ano anterior, número que fez da empresa a maior operadora privada de metrô do país.

O sistema de tração metroviária é composto por 4 subestações principais e 46 subestações retificadoras e auxiliares que alimentam o terceiro trilho eletrificado a 750 Vcc.

A frota atual do Metrô Rio é composta por 64 trens, cada trem formado por 6 carros, com a capacidade média de 1.800 lugares por trem (considerando 6 passageiros por metro quadrado).

A Supervia é uma concessionária de transporte, sendo o serviço privado iniciado no dia 1 de novembro de 1998, com previsão de vigorar durante 25 anos. A concessão foi renovada antecipadamente em Novembro de 2010. Com isso, o serviço ferroviário de passageiros do Rio de Janeiro continua sob a responsabilidade da iniciativa privada até o ano de 2048.

A concessionária SuperVia tem sob seu controle a administração, manutenção e operação de toda malha do transporte ferroviário de passageiros do Rio de Janeiro com um total de 270 quilômetros de extensão e com 102 estações, distribuídos conforme abaixo:

- 5 ramais (Deodoro, Santa Cruz, Japeri, Belford Roxo e Gramacho/Saracuruna).
- 3 extensões (Paracambi, Vila Inhomirim e Guapimirim).

A SuperVia atende 12 municípios do Estado do Rio de Janeiro: Rio de Janeiro, Duque de Caxias, Nova Iguaçu, Nilópolis, Mesquita, Queimados, São João de Meriti, Belford Roxo, Japeri, Paracambi, Magé e Guapimirim.

A figura 2 apresenta os ramais e as extensões, com as suas estações:



Figura 2: Rede ferroviária do Rio de Janeiro (Fonte: SuperVia, 2017)

Em 2016, foram transportados aproximadamente 180 milhões de passageiros, que representa um aumento de 2% com relação ao ano anterior. O sistema de tração ferroviária é composto basicamente pela operação de trens elétricos. Apenas as linhas Saracuruna - Vila Inhomirim e Saracuruna - Guapimirim são operadas com trens a diesel, mas se trata de uma parcela muito pequena do total de trens em operação (a grade horário para esses serviços tem apenas 3 trens nos dias úteis e 2 trens nos finais de semana).

A frota atual da SuperVia é composta por 201 trens, com diferentes números de carros para cada composição.

2. DIAGNÓSTICO

No Brasil a participação do setor de transportes nas emissões de GEE é ainda maior que a média mundial. A quantidade de GEE emitidos pelo setor de transportes do país atingiu, em 2016, 45% do total de emissões associadas à matriz energética brasileira (EPE, 2017). Os veículos rodoviários são responsáveis pela geração de mais de 210 milhões de toneladas de CO₂ (MMA, 2013) e os poluentes atmosféricos locais liberados pelos mesmos – MP, NOx e SOx – acarretam um alto custo anual por doenças respiratórias, que atinge o patamar de R\$ 7,9 bilhões de reais (ANTP, 2012), o equivalente a 0,35% do PIB. Segundo a IEA (2012), o transporte rodoviário é responsável pela maioria das emissões do setor de transporte e o crescimento estimado é que as viagens rodoviárias sejam dobradas até 2050, caso nenhuma ação seja tomada.

No Rio de Janeiro a situação é ainda pior, estimando-se que 66% das emissões do município estejam associadas ao setor de transportes (SMAC-RJ e COPPE, 2011). De fato, mais de 90% das viagens motorizadas são realizadas em transporte rodoviário (SETRANS-RJ, 2017).

Na Conferência do Clima de Paris, em dezembro de 2015, o Brasil assumiu compromisso de reduzir suas emissões em 37% até 2025 e 43% até 2030, em relação ao ano de 2005 (CAT, 2017). Outros países também assumiram compromissos de redução. A comunidade científica recomenda que o aumento na temperatura média do planeta não deve exceder de 2 graus Celsius, sob pena de graves implicações no clima. Os planos traçados nessa conferência atendem a esse objetivo. Um plano mais ambicioso pretende que esse aumento não ultrapasse 1,5 graus Celsius.

Em consonância com os esforços do país o Estado do Rio de Janeiro fixou pelo decreto nº 43.216 de 30/09/2011, objetivos de redução de 30% das emissões em transportes entre 2010 e 2030, enquanto que o Estado de São Paulo aprovou o decreto nº 58.107 de 05/06/2012, que estabeleceu objetivos de redução de 20% das emissões até 2020, tendo por base o ano de 2005. A Cidade do Rio de Janeiro foi uma das primeiras no país a definir uma Política Municipal de Mudanças Climáticas e Desenvolvimento Sustentável, estabelecendo metas de redução de emissões de gases do efeito estufa para os próximos anos: até 8% em 2012, até 16% em 2016 e até 20% em 2020, com relação às emissões registradas em 2005 pelo Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa elaborado pela SMAC em parceria com a COPPE. A ampliação do sistema metroferroviário foi considerada como uma das ações a serem tomadas para o atingimento dos objetivos de redução.

Por outro lado o panorama dos sistemas de transportes no Rio de Janeiro, bem como em todo o país, ainda mostra predominância do transporte rodoviário. O uso do transporte de passageiros sobre trilhos no país representava em 2010 apenas 1,7% do total (EPE, 2012). No Rio de Janeiro, em 2012, o transporte metroferroviário atendia 5,4% do total de viagens/dia (SETRANS-RJ, 2017). Desde então alguns projetos avançaram (por exemplo: Linha

4 do sistema metroviário e VLT – Veículos Leves sobre Trilhos) mas ainda se mostram insuficientes.

Em vista do cenário crítico da concentração de GEE na atmosfera, dos compromissos de redução desses gases assumidos pelo país junto à comunidade internacional e da legislação vigente no Rio de Janeiro estabelecendo metas de redução de GEE, a ampliação do transporte metroferroviário representa uma grande oportunidade para obter-se a redução das emissões totais do setor de transportes da cidade, em função da utilização da energia elétrica para prover a movimentação dos trens, diferentemente dos veículos do modo rodoviário, que necessitam da queima direta de combustíveis fósseis para prover a movimentação dos veículos. A pequena participação do transporte sobre trilhos no Rio de Janeiro contrasta com outras cidades em todo o mundo, onde a participação alcança, por exemplo, 21% em Madrid e 48% em Tóquio (LTA Academy, 2011). Isso significa que investimentos na ampliação do sistema metroferroviário do Rio de Janeiro são essenciais para a redução das emissões de GEE.

2.1. A EMISSÃO DE CO₂ PRODUZIDA PELOS SISTEMAS DE TRANSPORTE DE PASSAGEIROS

Diferentes abordagens podem ser utilizadas na medição das emissões de CO₂ em sistemas de transportes de passageiros. A abordagem mais simples considera apenas as emissões diretas produzidas pelo uso do veículo, ou seja, a queima de combustível. Esse modelo é conhecido como “Do tanque à roda” (em inglês TTW – *Tank To Wheel*). Nele os modos de transporte que utilizam largamente combustíveis fósseis, como o transporte rodoviário e o aéreo, são responsáveis por grandes quantidades de emissões. Contudo, no transporte movido a eletricidade, como trens e metrô, não há queima de combustível fóssil

diretamente no uso do veículo e, portanto, a emissão TTW é nula (Van der Mei e Van Assen, 2014). Uma abordagem mais completa considera também a emissão na produção do combustível/energia. Essa produção do combustível é conhecida por “Do Poço (ou Origem) ao Tanque” (em inglês WTT – *Well To Tank*). A emissão total é conhecida por “Do Poço (ou Origem) à Roda” (em inglês WTW – *Well to Wheel*) e será a soma da emissão na produção do combustível/energia com a emissão no uso do veículo ($WTW = WTT + TTW$). No transporte movido a eletricidade esse modelo é particularmente útil uma vez que, como já visto, $TTW = 0$ e a produção da eletricidade, WTT, será a única responsável pela emissão de CO_2 . Quando se comparam diferentes modos de transporte quanto à emissão de CO_2 a questão que se coloca é se a base de comparação é justa e razoável. O modelo “uso do veículo” (TTW) resultará em emissão zero para veículos movidos a eletricidade, ignorando o fato de que a produção da energia elétrica implica em uso de combustíveis fósseis e consequente emissão, não parecendo razoável a utilização dessa base de comparação. Assim uma base de comparação mais justa deve incluir também a emissão na produção de combustível/energia, como no modelo “produção de combustível/energia e uso do veículo” (WTW). Nos inventários de emissões de GEE, a emissão direta correspondendo ao “uso do veículo” é contabilizada como sendo do “Escopo 1”, e a emissão indireta pela produção da eletricidade é contabilizada no “Escopo 2” (IPCC, 2006).

Outro tipo de abordagem consideraria o ciclo de vida do veículo e combustíveis. Elementos como a construção e manutenção da infraestrutura necessária ao transporte, a construção, manutenção e o fim de vida dos veículos seriam levados em conta nessa abordagem.

2.2. EMISSÕES INDIRETAS, PELO USO DA ELETRICIDADE, EM SISTEMAS METROFERROVIÁRIOS

Os sistemas metroferroviários estão entre os maiores consumidores individuais de energia elétrica. O Metrô de Londres consome cerca 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 tCO₂, representando 82% do total de emissões do metrô, sendo 2/3 provenientes dos serviços de trens (LU, 2009). Outros metrôs consomem ainda mais energia. De acordo com NYCSubway (2017) o Metrô de Nova Iorque consome 1,8 TWh a cada ano enquanto o de Hong Kong consome 1,4 TWh (MTR, 2013).

Em 2015, a operação do Metrô de São Paulo consumiu 598.000 MWh, sendo a tração elétrica dos trens responsável por aproximadamente 70% da energia consumida. As emissões totais de gases do efeito estufa devidas à energia elétrica foram, nesse ano, de 70.000 tCO₂ (Metrô de São Paulo, 2017).

Grandes quantidades de energia elétrica são necessárias para prover a força de tração que movimenta os trens. A energia elétrica também é utilizada nos equipamentos operacionais, nas estações, no sistema de ar condicionado e ventilação e em prédios administrativos.

O valor das emissões depende das fontes energéticas utilizadas pelo sistema gerador dessa energia. Nesse aspecto, o Brasil é favorecido por utilizar predominantemente fontes hídricas, de menor emissão que as térmicas. Em 2016, de acordo com dados do EPE (2017), as usinas hidrelétricas foram responsáveis por 68,1% da geração de energia elétrica. A parcela das usinas nucleares correspondeu a 2,6%; carvão, petróleo e gás a 15,7%; biomassa a 8,2% e eólica a 5,4%. O carvão, entre as fontes térmicas, tem o maior indicador de emissão de CO₂ (Brasil Gov., 2017).

Como o sistema elétrico no Brasil é interligado através do SIN – Sistema Interligado Nacional, nos inventários de emissão são utilizados os fatores médios nacionais de emissão do setor elétrico, divulgados mensalmente pelo governo brasileiro. Em alguns países a distribuição de energia permite a utilização de fatores regionais, aumentando o grau de precisão do valor da emissão.

Todo sistema de geração de energia elétrica sofre perdas no caminho entre a usina e o usuário final, de modo que a energia gerada é sempre maior que a utilizada. Foi considerado que há 4% de perdas técnicas de transmissão na rede do SIN – Sistema Interligado Nacional (ANEEL, 2015) e 8% na distribuição (LIGHT, 2015), totalizando perdas de transmissão e distribuição (T&D) de 12%.

2.3. RESULTADOS DAS EMISSÕES DE SISTEMAS METROFERROVIÁRIOS

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

É comum a apresentação de resultados projetados a partir de valores médios de lotação dos veículos, por exemplo: segundo FTA (2010) um automóvel em viagem a trabalho tem carga média de 1,14 passageiros e em viagens gerais, de 1,63 passageiros; e segundo HRT

(2017) os ônibus da cidade de Helsinque transportaram em 2015, em média, passageiros a uma carga de 23,8% de sua capacidade.

Os grupos CoMET – *Community of Metros* e NOVA – *Group of Metros* são grupos internacionais de sistemas metroferroviários com o intuito de, em parceria, criarem projetos cobrindo diversas áreas de interesse comum, entre eles o uso eficiente da energia elétrica. O grupo CoMET reúne sistemas de maior porte e o grupo NOVA reúne sistemas de médio porte. Ambos trabalham em conjunto com a RTSC – *Railway and Transport Strategy Centre*, órgão de pesquisas do *Imperial College London* e contam com 34 membros em todos os continentes. Por um acordo de confidencialidade firmado entre os membros dos grupos, os dados obtidos nessas pesquisas não podem, quando publicados, identificar seus membros.

Em 2015, as emissões por eletricidade, em gCO₂ por pass-km, de alguns componentes do grupo CoMET/NOVA (identificados pelos continentes Am=Américas, Eu=Europa e As=Ásia/Oceania), aparecem no gráfico da figura 3. Os valores vão de 4,9 a 140,6 gCO₂ por pass-km, tendo valor médio de emissão de 51,3 gCO₂ por pass-km para 31 sistemas do grupo (MetrôRio, 2017b). Esse valor, como será visto adiante, é cerca de 10 vezes maior que a emissão do metrô do Rio. A oscilação de resultados é proveniente principalmente da variedade de fontes energéticas utilizadas.

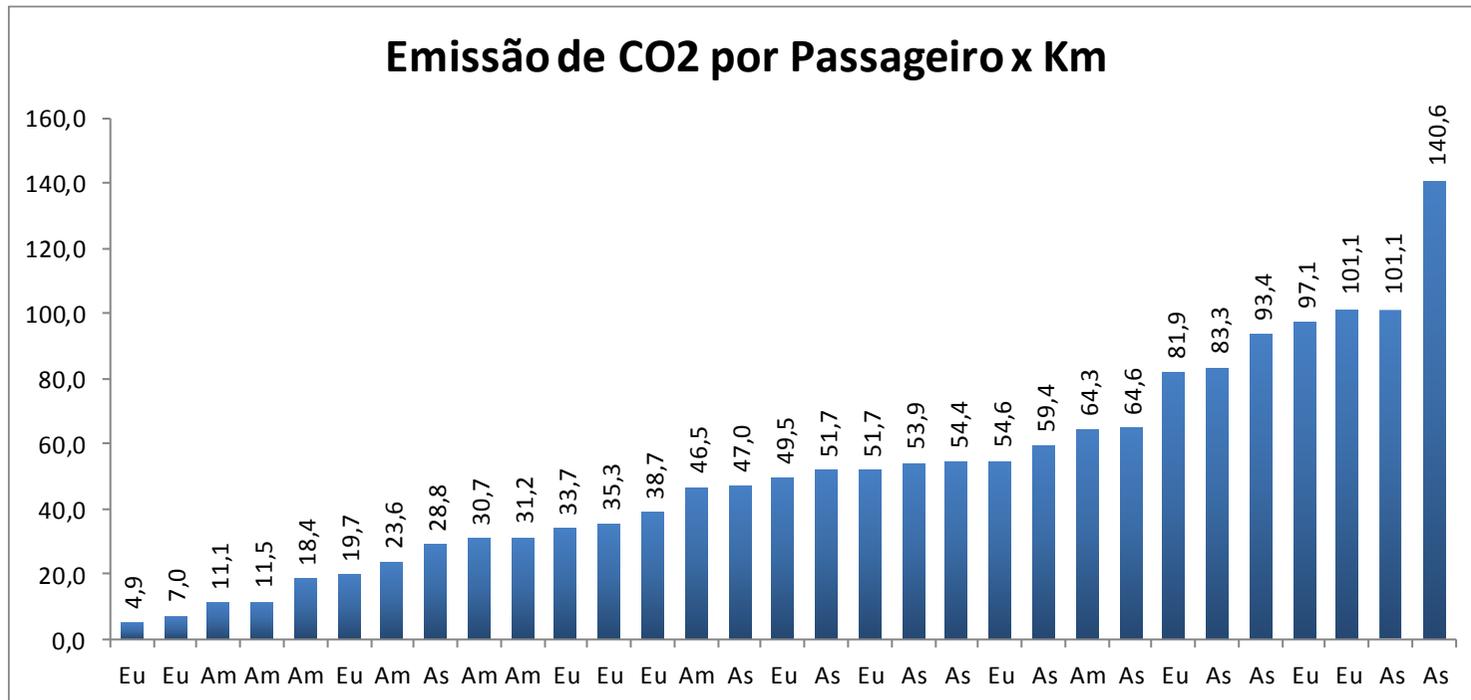


Figura 3: CoMET/NOVA – Emissões por eletricidade em 2015
(Fonte: MetrôRio, 2017b)

Na matriz de energia elétrica dos componentes do CoMET/NOVA constata-se que na maioria dos países da Europa, Ásia e Oceania existe um uso intenso de fontes térmicas, com um *mix* de carvão, óleo e gás. Nas Américas ocorre um maior uso de fontes hidrelétricas ou nucleares (MetrôRio, 2017b). A tabela 1 mostra as emissões de carbono pelo uso da eletricidade na tração dos trens, em 2011, em gramas por pass-km, de 5 sistemas metroferroviários do grupo, identificados pelos continentes (Am=Américas, Eu=Europa e As=Ásia/Oceania). Observa-se variação nos resultados das emissões, decorrentes das variadas matrizes energéticas utilizadas na geração de energia.

Tabela 1: Consumo da energia elétrica de tração dos trens, emissões e fontes térmicas das matrizes energéticas de 5 sistemas metroferroviários do CoMET/NOVA em 2011
(Fonte: MetrôRio, 2017b)

Continentes dos Metrô	Consumo da Energia Elétrica de Tração dos Trens (MWh)	Emissão produzida (tCO ₂)	Emissão em gCO ₂ por pass-km	Fontes Térmicas das Matrizes Energéticas			
				% carvão	% óleo	% gás	Total
AM 1	131.280	7.478	4	1%	3%	4%	8%
AM 2	1.696.210	1.001.357	60	49%	1%	21%	71%
EU	17.470	9.112	48	14%	15%	52%	81%
AS 1	573.000	509.308	97	84%	1%	12%	97%
AS 2	256.480	168.813	37	52%	6%	20%	78%

O sistema de menor emissão por pass-km, das Américas, o AM 1, utiliza apenas 8% de fontes térmicas enquanto que o sistema de maior emissão, da Ásia/Oceania, o AS 1, utiliza 97% de fontes térmicas, sendo 84% de carvão.

Levantamento feito pela ADB (2010), em várias ferrovias da Europa e América do Norte mostrou emissões variando de 45 a 130 gCO₂, resultado compatível com o encontrado nos sistemas do grupo CoMET/NOVA.

A otimização do consumo de eletricidade é um objetivo permanente dos fabricantes de trens e dos operadores dos sistemas. O metrô de Delhi tornou-se o primeiro metrô do mundo a receber créditos de carbono pelo seu projeto de implantação do sistema “*regenerative braking*” em seus trens. Esse sistema permite transformar parte da energia de frenagem em energia elétrica. O metrô de Delhi estima que o sistema de “*regenerative braking*” reaproveita em torno de 35% da energia total consumida na tração dos trens em todo o sistema. Essa energia reaproveitada evita a emissão de 41.160 tCO₂ por ano, que seriam despejadas na atmosfera caso os trens não dispusessem do sistema (UNU, 2012).

Um segundo projeto do metrô de Delhi apresentado às Nações Unidas para receber créditos de carbono demonstra os benefícios de redução de emissão de GEE proporcionados pelo sistema, analisando os cenários “com e sem metrô”. A redução estimada pela implantação do metrô é da ordem de 650.000 toneladas de GEE por ano (Delhi Metro, 2017).

2.3.1. EMISSÃO DE SISTEMAS DE TRANSPORTE NA EUROPA

Os valores médios de emissões, em 2011, por meios de transporte de passageiros de 27 países da Europa, em gCO₂ por pass-km, são mostrados na figura 4. O transporte sobre trilhos aparece como o de melhor desempenho.

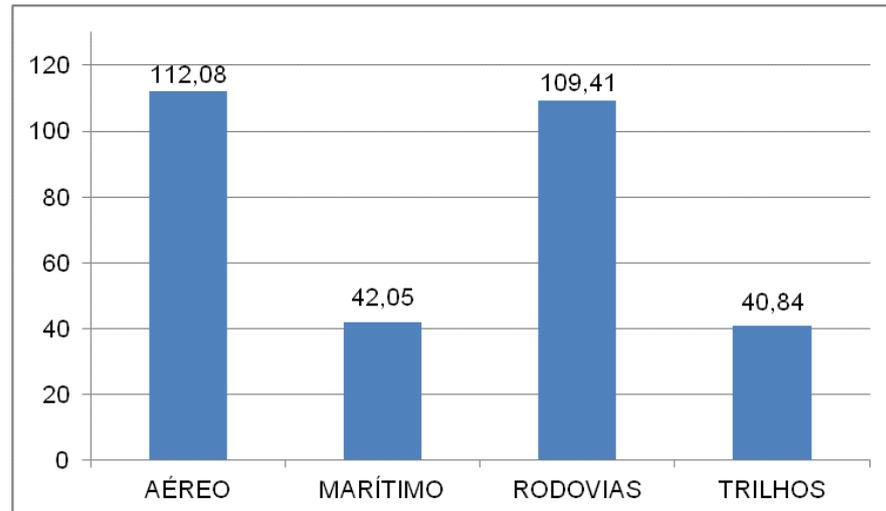


Figura 4: Europa-2011 – Emissões em gCO₂/pass-km por meios de transporte (Fonte: EEA, 2011)

Cálculos realizados para um trem Alstom de alta velocidade usando o fator médio de emissão da rede elétrica da Europa e um fator de carga de passageiros de 75%, mostraram uma emissão de 17 gCO₂/pass-km comparado a 30 gCO₂/pass-km para o ônibus (Jehanno *et al.*, 2011).

2.3.2 EMISSÃO DA ENERGIA DE TRAÇÃO NOS ESTADOS UNIDOS

Nos Estados Unidos, as médias nacionais de emissão de alguns meios de transporte de passageiros, em gCO₂ por pass-km, são mostradas na figura 5. Por esse resultado, constata-se que os meios de transporte sobre trilhos têm, na média, em todo o território americano, os menores índices de emissão. Nos autos as viagens a trabalho têm, em média, 1,14 passageiros e as viagens gerais 1,63 passageiros. Esse levantamento revela também que, se fossem consideradas as cargas máximas de lotação, o transporte sobre trilhos teria valores de emissão ainda menores: 39 para o VLT, 28 para as ferrovias, e 31 para os metrô, contra 51 para os ônibus (FTA, 2010).

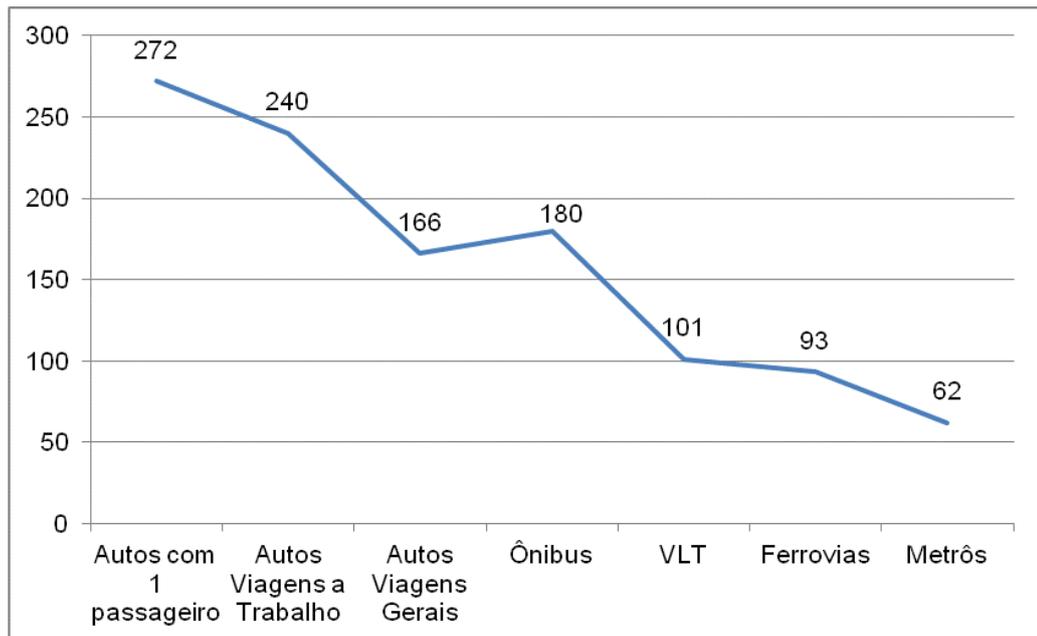


Figura 5: Média nacional nos Estados Unidos de emissão de energia de tração (Fonte: FTA, 2010)

Nos Estados Unidos, diferentemente do Brasil, a distribuição de energia elétrica é realizada por sub-regiões, permitindo a utilização de fatores de emissão mais próximos dos reais. Assim alguns sistemas podem ser alimentados por energia elétrica proveniente de fontes hidrelétricas enquanto em outros sistemas as fontes são térmicas, fazendo com que haja diferenças sensíveis entre a emissão dos sistemas. A figura 6 mostra alguns sistemas dos Estados Unidos e suas emissões.

Observa-se que o único sistema que tem emissão maior que os ônibus é o Metrô de Baltimore. Isso se deve a uma baixa carga de utilização do sistema, de 17% na média. Em todos os outros é evidenciada a vantagem dos sistemas sobre trilhos (FTA, 2010).

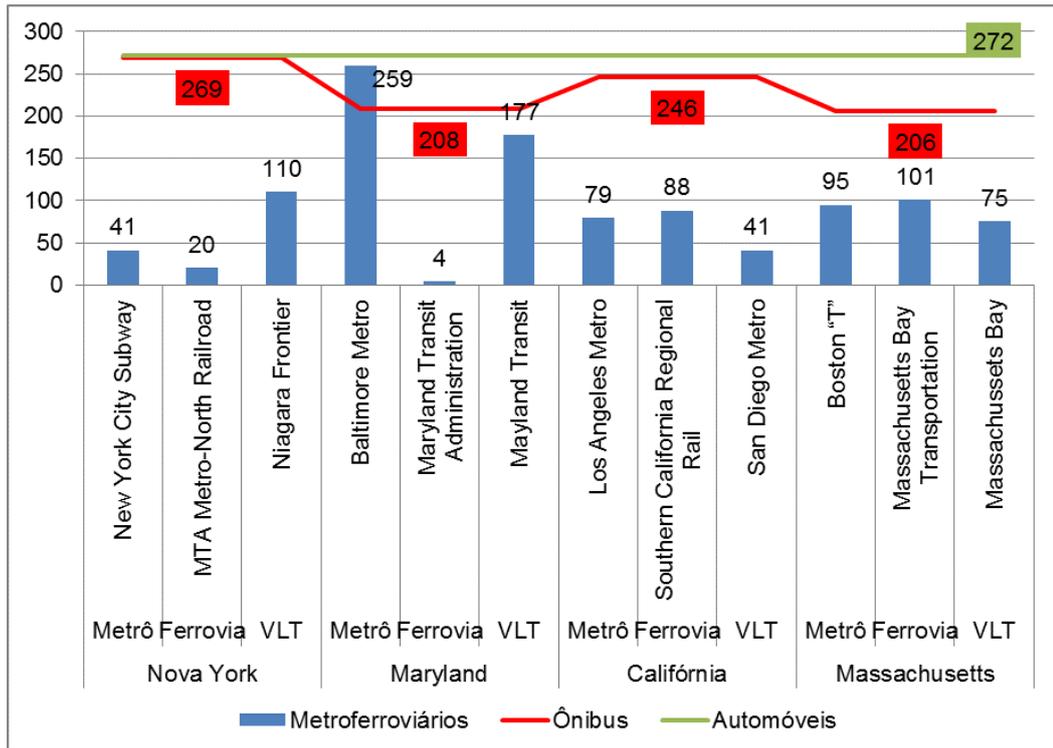


Figura 6: Emissões da energia de tração, em gCO₂ por pass-km, de sistemas de transportes nos Estados Unidos (Fonte: FTA, 2010)

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

Os resultados das medições no MetrôRio e na SuperVia, em 2016, são mostrados na tabela 2. A Linha 4 do MetrôRio não foi contabilizada por ter entrado em operação somente no final de 2016, não sendo possível, nesse início de operação, a medição da quantidade de pass-km. São indicadas, mês a mês, a energia consumida na tração dos trens, considerando as perdas de transmissão e distribuição da energia elétrica. Multiplicando-se a energia consumida pelo fator de emissão da energia elétrica do SIN obtém-se a emissão de CO₂. Dividindo-se essa emissão pela quantidade de passageiros transportados e de passageiro-quilômetro obtém-se a emissão por passageiro transportado (ou passageiro-viagem) e por pass-km.

Observa-se que o sistema ferroviário consome cerca de 50% a mais de energia elétrica do que o sistema metroviário porém a quantidade de pass-km também cresce na mesma

proporção (em razão de viagens mais longas), resultando em emissão por pass-km praticamente igual nos dois sistemas.

As emissões dos sistemas metroviários brasileiros são extremamente baixas, em decorrência da matriz energética brasileira baseada em hidrelétricas e de uma adequada carga de passageiros. Confrontando a emissão média dos sistemas brasileiros analisados com a dos sistemas do CoMET/NOVA verifica-se que os brasileiros emitem aproximadamente 10 vezes menos.

Devido ao sistema interligado de distribuição de energia os sistemas brasileiros utilizam o fator de emissão anual levantado pelo governo, que varia de ano a ano, em função do crescimento do país e da ocorrência maior ou menor de chuvas, fatos que eventualmente podem levar a uma utilização maior das fontes térmicas.

Os valores obtidos em 2016, 5,5 gCO₂/pass-km para o MetrôRio e 5,6 gCO₂/pass-km para a Supervia podem ser comparados a outros modos de transporte, conforme tabela 2.

Tabela 2: Emissões do MetrôRio e SuperVia em 2016 (Fontes: MetrôRio, 2017a e SuperVia, 2017)

MetrôRio									
Mês	CONSUMO TRACÃO (SEM PERDAS)	PERDAS NA DISTRIBUIÇÃO (8%) E TRANSMISSÃO (4%) DA ENERGIA	CONSUMO TRACÃO (COM PERDAS)	Fatores de Emissão de CO ₂	Emissões de CO ₂ produzidas	Passageiros Transportados	Passageiro-km	Emissões em gCO ₂ /passageiros transportados	Emissões em gCO ₂ /pass-km
	(MWh)	(MWh)	(MWh)	(tCO ₂ /MWh)	(tCO ₂)				
jan-16	13.267	1.592	14.859	0,0960	1.426	18.222.867	198.602.991	78,3	7,2
fev-16	13.474	1.617	15.091	0,0815	1.230	19.997.924	217.430.439	61,5	5,7
mar-16	13.742	1.649	15.391	0,0710	1.093	21.825.473	237.332.043	50,1	4,6
abr-16	12.758	1.531	14.289	0,0757	1.082	20.264.959	221.717.829	53,4	4,9
mai-16	13.257	1.591	14.848	0,0701	1.041	20.697.684	226.694.665	50,3	4,6
jun-16	13.325	1.599	14.924	0,0760	1.134	21.478.770	235.447.571	52,8	4,8
jul-16	13.422	1.611	15.033	0,0725	1.090	21.001.255	229.202.054	51,9	4,8
ago-16	16.117	1.934	18.051	0,0836	1.509	22.858.111	247.083.931	66,0	6,1
set-16	14.191	1.703	15.894	0,0897	1.426	20.681.634	223.826.549	68,9	6,4
out-16	13.274	1.593	14.867	0,0925	1.375	19.158.433	207.540.171	71,8	6,6
nov-16	12.838	1.541	14.379	0,1002	1.441	18.819.710	203.561.752	76,6	7,1
dez-16	13.857	1.663	15.520	0,0714	1.108	19.247.901	207.978.744	57,6	5,3
TOTAL 2016	163.522	19.623	183.145	0,0817	14.963	244.254.721	2.656.418.740	61,3	5,6

SuperVia									
Mês	CONSUMO TRACÃO (SEM PERDAS)	PERDAS NA DISTRIBUIÇÃO (8%) E TRANSMISSÃO (4%) DA ENERGIA	CONSUMO TRACÃO (COM PERDAS)	Fatores de Emissão de CO ₂	Emissões de CO ₂ produzidas	Passageiros Transportados	Passageiro-km	Emissões em gCO ₂ /passageiros transportados	Emissões em gCO ₂ /pass-km
	(MWh)	(MWh)	(MWh)	(tCO ₂ /MWh)	(tCO ₂)				
jan-16	18.789	2.255	21.044	0,0960	2.020	13.431.553	298.355.087	150,4	6,8
fev-16	18.675	2.241	20.917	0,0815	1.705	13.586.247	301.791.305	125,5	5,6
mar-16	21.480	2.578	24.057	0,0710	1.708	16.260.960	361.204.704	105,0	4,7
abr-16	20.233	2.428	22.661	0,0757	1.715	15.255.954	338.880.506	112,4	5,1
mai-16	19.283	2.314	21.597	0,0701	1.514	15.878.166	352.701.701	95,3	4,3
jun-16	18.508	2.221	20.729	0,0760	1.575	16.440.914	365.202.023	95,8	4,3
jul-16	19.393	2.327	21.720	0,0725	1.575	15.756.778	350.005.310	99,9	4,5
ago-16	21.772	2.613	24.385	0,0836	2.039	16.291.901	361.891.997	125,1	5,6
set-16	20.865	2.504	23.369	0,0897	2.096	15.633.576	347.268.624	134,1	6,0
out-16	21.185	2.542	23.728	0,0925	2.195	14.242.095	316.359.656	154,1	6,9
nov-16	20.523	2.463	22.986	0,1002	2.303	14.068.506	312.503.724	163,7	7,4
dez-16	22.705	2.725	25.429	0,0714	1.816	14.265.270	316.874.443	127,3	5,7
TOTAL 2016	243.413	29.210	272.623	0,0817	22.273	181.111.920	4.023.039.080	123,0	5,5

Serão analisadas as emissões dos automóveis e dos ônibus. Na cidade do Rio de Janeiro circulam automóveis movidos a gasolina C, que é uma mistura de gasolina A com etanol anidro, numa proporção determinada pela legislação e que atualmente corresponde a 27% de etanol anidro na mistura. Os automóveis também podem ser movidos a etanol hidratado ou a GNC - Gás Natural Comprimido, além dos chamados “*flex*”, projetados para funcionar com uma mistura de gasolina C e etanol hidratado, em qualquer proporção. Os ônibus funcionam com o diesel, biodiesel, uma mistura de diesel com biodiesel (que atualmente contém 8% de biodiesel), etanol hidratado aditivado E95 (que contém 95% de etanol hidratado e 5% de aditivos), GNC ou GNC combinado com B8. Foram utilizados valores de emissão “do poço à roda”, ou seja, “produção do combustível e uso do veículo” para uma comparação mais justa, conforme mostrado no item 2.1 deste trabalho. As fontes de referência utilizaram valores de proporções de etanol anidro na gasolina C e biodiesel no diesel vigentes à época em que os artigos foram escritos e que são um pouco menores que os valores vigentes em 2016, mas isso não compromete a análise feita, que busca resultados aproximados.

As emissões desses veículos são mostradas na tabela 3.

Tabela 3: Emissão de CO₂ de automóveis e ônibus na cidade do Rio de Janeiro(Fontes: D'Agosto *et al.*, 2009 e D'Agosto *et al.*, 2015)

Meio de transporte	Emissão (gCO ₂ /pass-km)	Comparação com MetrôRio e SuperVia
Automóvel a gasolina C	193,90	Cerca de 35 vezes maior
Automóvel a GNC	207,18	Cerca de 37 vezes maior
Automóvel a etanol hidratado	16,43	Cerca de 3 vezes maior
Ônibus a diesel (100% diesel)	17,081	Cerca de 3 vezes maior
Ônibus a diesel B8 (8% biodiesel)	16,431	Cerca de 3 vezes maior
Ônibus a GNC (100%)	17,317	Cerca de 3 vezes maior
Ônibus a GNC + diesel B8	13,665	Cerca de 3 vezes maior
Ônibus a biodiesel (100% biodiesel)	3,151	Cerca de 57%
Ônibus a etanol hidratado E95	2,37	Cerca de 43%

GNC = Gás natural comprimido

Com o advento dos automóveis bi-combustíveis os usuários podem utilizar uma mistura de gasolina e etanol hidratado em qualquer proporção, fazendo com que a emissão esteja no intervalo entre os valores das emissões desses combustíveis. Como a venda de gasolina C no Rio de Janeiro em 2016 foi maior do que a venda de etanol hidratado (ANP, 2017) pode-se supor que os automóveis usaram mais gasolina que etanol. Também dados

nacionais de participação de etanol hidratado e gasolina nos veículos leves indicam, em 2016, 36% de etanol e 64% de gasolina (EPE, 2017).

Comparando a emissão dos veículos analisados com a do MetrôRio e da SuperVia, em qualquer situação a emissão dos automóveis é sempre maior, de 3 a 37 vezes maior.

Em relação aos ônibus apenas aqueles movidos a biodiesel 100% ou etanol hidratado E95 têm emissão menor. Nos demais tipos de ônibus a emissão é cerca de 3 vezes maior.

4. CONCLUSÕES

A emissão de GEE dos sistemas de transporte sobre trilhos pode ser analisada sob diferentes abordagens. A abordagem mais adequada para facilitar comparações com outros meios de transporte é a da emissão da “produção da energia e uso do veículo”. Nessa abordagem, a maioria dos sistemas pesquisados em todo o mundo teve emissão variando de 4,9 a 140,6 gCO₂ por pass-km. Os sistemas brasileiros levam grande vantagem em relação à maioria dos sistemas no resto do mundo em virtude de disporem de uma matriz energética baseada em hidrelétricas, com pouco uso de fontes térmicas. Na comparação com outros meios de transporte de uso intenso, como automóveis particulares e ônibus convencionais, os sistemas sobre trilhos levam vantagem na maioria dos sistemas pesquisados. Somente sistemas com uso extensivo de fontes térmicas na geração da energia elétrica ou com baixa carga de utilização poderiam, eventualmente, ter uma emissão maior que os ônibus convencionais.

Os sistemas metroferroviários do Rio de Janeiro (MetrôRio e SuperVia) apresentaram em 2016, em média, emissão 3 vezes menor que os ônibus e 35 vezes menor que os automóveis. Eles estão entre os sistemas sobre trilhos de menor emissão em todo o mundo.

A operação do metrô e ferrovia do Rio de Janeiro emite 10 vezes menos, por passageiro-quilômetro, do que a média de um grupo internacional de 31 sistemas metroferroviários.

Foi comprovado que os sistemas metroferroviários de passageiros são de baixa emissão de CO₂ e, portanto, a sua ampliação é uma maneira segura de contribuir para a redução das emissões de CO₂ da cidade do Rio de Janeiro e de outras cidades do país, possibilitando o cumprimento dos compromissos assumidos perante a comunidade internacional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADB (2010) Reducing Carbon Emissions from Transport Projects. Asian Development Bank.

Disponível em <<http://www.oecd.org/derec/adb/47170274.pdf>>. Acesso em 12/07/2017.

ADEPORTO (2010) Plano de Acção para a energia sustentável da cidade do Porto. Agência de

Energia do Porto. Disponível em <<http://www.adeporto.eu/anexos/newsletter/news1378119716.pdf>>. Acesso em 12/07/2017.

ANEEL (2015) Perdas de energia. Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em

<<http://www2.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=801&idPerfil=4>>. Acesso em 12/07/2017.

ANP (2017) Anuário Estatístico 2017. Agência Nacional do Petróleo. Disponível em

<<http://www.anp.gov.br/wwwanp/publicacoes/anuario-estatistico/3819-anuario-estatistico-2017>>. Acesso em 12/07/2017.

ANTP (2012). Sistema de Informações da Mobilidade Urbana 2011.

- Brasil Gov. (2017) Carvão mineral. Site do governo brasileiro Disponível em <<http://www.brasil.gov.br/sobre/economia/energia/matriz-energetica/carvao-mineral-e-derivados>>. Acesso em 12/07/2017.
- CAT (2017) Brazil's Nationally Determined Contribution. Climate Action Tracker. Disponível em <<http://climateactiontracker.org/countries.html>>. Acesso em 12/07/2017.
- D'Agosto, M.A.; Oliveira, C.M.; Assumpção, F.C.; Deveza, A.C.P. (2015) *Assessing Cleaner Energy Alternatives for Bus Transit in Rio de Janeiro: A Life Cycle Inventory Analysis*. J. Environ. Prot. v6, pp1197–1218.
- D'Agosto, M.A.; Ribeiro, S.K. (2009) *Assessing total and renewable energy in Brazilian automotive fuels. A life cycle inventory (LCI) approach*. Renew. Sustain. Energy Rev. v13, pp1326–1337.
- Delhi Metro (2017) UN Body Credits Delhi Metro- 6.3 Lakh Carbon Credits for Modal Shift Project. Delhi Metro. Disponível em <http://www.delhimetrorail.com/whatnew_details.aspx?id=LrHUclpD03gllld>. Acesso em 12/07/2017.
- EEA (2011) Specific CO₂ emissions per passenger-km and per mode of transport in Europe, 1995-2011. European Environment Agency. Disponível em <<http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/specific-co2-emissions-per-passenger-3>>. Acesso em 12/07/2017.
- EPA (2017a) Global greenhouse gas emissions data. US Environmental Protection Agency. Disponível em <<https://www.epa.gov/ghgemissions/global-greenhouse-gas-emissions-data>>. Acesso em 12/07/2017.

- EPA (2017b) Climate change indicators. US Environmental Protection Agency. Disponível em <<https://www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-atmospheric-concentrations-greenhouse-gases>>. Acesso em 12/07/2017.
- EPE (2012) Consolidação de bases de dados do setor transporte: 1970-2010. Empresa de Pesquisa Energética. Disponível em <http://www.epe.gov.br/Petroleo/Documents/Estudos_28/Consolida%C3%A7%C3%A3o%20de%20Bases%20de%20Dados%20do%20Setor%20Transporte%201970-2010%20-%20PDE%202021.pdf>. Acesso em 12/07/2017.
- EPE (2017) Balanço Energético Nacional - Relatório Síntese. Empresa de Pesquisa Energética. Disponível em <https://ben.epe.gov.br/downloads/S%c3%adntese%20do%20Relat%c3%b3rio%20Final_2017_Web.pdf>. Acesso em 12/07/2017.
- FTA (2010) Public Transportation's Role in Responding to Climate Change. Federal Transit Administration. Disponível em <<https://www.transit.dot.gov/sites/fta.dot.gov/files/docs/PublicTransportationsRoleInRespondingToClimateChange2010.pdf>>. Acesso em 12/07/2017.
- HRT (2013) Helsinki Region Transport – Annual Report. Disponível em <https://www.hsl.fi/sites/default/files/uploads/hsl_vuosikertomus_en_2015_sivut.pdf>. Acesso em 12/07/2017.
- IEA (2009) Transport, energy and CO₂. International Energy Agency. Disponível em <<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/transport2009.pdf>>. Acesso em 12/07/2017.

- IEA (2012) Global transport Outlook to 2050. International Energy Agency. Disponível em <https://www.iea.org/media/workshops/2013/egrdrmobility/DULAC_23052013.pdf>. Acesso em 12/07/2017.
- IPCC (2006) Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Disponível em <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>>. Acesso em 12/07/2017.
- IPCC (2014) IPCC Fifth Assessment Report: Climate Change 2014 – Synthesis Report. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014. Disponível em <https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full.pdf>. Acesso em 12/07/2017.
- Jehanno, A.; Palmer, D.; James, C. (2011) High Speed Rail & Sustainability. International Union of Railways (UIC).
- LIGHT (2015) Relatório de sustentabilidade 2014. Disponível em <http://www.light.com.br/Repositorio/Sustentabilidade/relatorio_sustentabilidade_2014.pdf>. Acesso em 12/07/2017.
- LISBOA e-NOVA (2014) Plano de Acção para a Sustentabilidade Energética de Lisboa. Agência Municipal de Energia-Ambiente de Lisboa. Disponível em <http://mycovenant.eumayors.eu/docs/seap/300_1316002099.pdf>. Acesso em 12/07/2017.
- LTA Academy (2011) Passenger transport modes shares in world cities. Land Transport Authority. Disponível em <https://www.lta.gov.sg/ltaacademy/doc/J14Nov_p54ReferenceModeShares.pdf>. Acesso em 12/07/2017.

LU (2009) London Underground carbon footprint. Disponível em <<http://content.tfl.gov.uk/london-underground-carbon-footprint-2008.pdf>>. Acesso em 12/07/2017.

Metrô de São Paulo (2017) Relatório de sustentabilidade 2015. Disponível em <<http://www.metro.sp.gov.br/relatoriodesustentabilidade-2015/>>. Acesso em 12/07/2017.

MetrôRio (2017a) Informações disponibilizadas por Daniel Habib Ribeiro Coutinho, Diretor de Operações do Metrô do Rio de Janeiro.

MetrôRio (2017b) Informações da base de dados de cálculos do grupo CoMET/NOVA, disponibilizadas por Paulo Lacerda, analista da Coordenação da Gestão da Informação do Metrô do Rio de Janeiro.

MMA (2013) Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários - v. 2013, ano-base 2012. Ministério do Meio Ambiente.

MTR (2013) Sustainability report 2012. Mass Transit Railway System – Hong Kong. Disponível em <<http://www.mtr.com.hk/eng/sustainability/2012rpt/files/sustainabilityreport2012.pdf>>. Acesso em 12/07/2017.

NYC Subway (2017) NYC Subway facts and figures. Disponível em <http://www.nycsubway.org/wiki/Subway_FAQ:_Facts_and_Figures>. Acesso em 12/07/2017.

PlaNYC (2007) A greener, greater New York. New York City Plan Reducing Greenhouse Gas Emissions. Disponível em <http://www.nyc.gov/html/planyc/downloads/pdf/publications/full_report_2007.pdf>. Acesso em 12/07/2017.

SETRANS-RJ (2017). Plano Diretor de Transporte Urbano da Região Metropolitana do Rio de Janeiro. Secretaria de Transportes do Estado do Rio de Janeiro. Disponível em <http://www.setrerj.org.br/dados/pdtu2015_alerj.pdf>. Acesso em 12/07/2017.

SMAC-RJ e COPPE (2011). Inventário e Cenário de Emissões dos Gases de Efeito Estufa da Cidade do Rio de Janeiro. Secretaria Municipal de Meio Ambiente do Rio de Janeiro.

SuperVia (2017) Informações disponibilizadas por João Gouveia Ferrão Neto, Diretor de Operações da SuperVia.

UNFCCC (1992) Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre mudanças no clima. United Nations Framework Convention on Climate Change. Disponível em <<http://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas>>. Acesso em 12/07/2017.

UNU (2012) Development options for Delhi's Metro. United Nations University. Disponível em <<http://ourworld.unu.edu/en/mind-the-gap-development-options-for-delhi%E2%80%99s-metro/>>. Acesso em 12/07/2017.

Van der Mei, A. J., Van Assen, V. (2014) Well to Wheel analysis of future trains and fuels. Disponível em <https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwimxezLk4fVAhUJQZAKHa8wDrsQFggnMAA&url=https%3A%2F%2Fwww.provinciegroningen.nl%2Ffileadmin%2Fuser_upload%2FDocumenten%2FBrief%2F2014-18095_bijlage_3.pdf&usg=AFQjCNGdDACS5WrEh6rG9U_vYPuKP55mBQ>. Acesso em 12/07/2017.

Vasconcellos, E. A. (2006). *Transporte e Meio Ambiente: Conceitos e Informações para Análise de Impactos* (1a Ed.). São Paulo.