

4º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

CATEGORIA 2

**EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA E CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS
LOCAIS ASSOCIADOS AO CICLO DE VIDA DE UMA LINHA DE METRÔ: ESTUDO
DE CASO DA LINHA 5 – LILÁS DO METRÔ DE SÃO PAULO**

RESUMO

A implantação de linhas de metrô está relacionada a obras de grandes proporções e têm sido crescentes as exigências dos agentes financeiros. Para o financiamento da extensão da Linha 5 – Lilás firmado entre o Governo do Estado de São Paulo - GESP e o Banco Internacional para a Reconstrução e Desenvolvimento - BIRD, fez parte da operação, o desenvolvimento de metodologia de contabilização de emissões e a construção de uma ferramenta para quantificar as emissões de gases de efeito estufa - GEE e contaminantes atmosféricos locais - CAL para análise de impactos associados ao ciclo de vida do empreendimento. Assim, este trabalho apresenta os resultados da aplicação da metodologia de inventariamento de dados de consumo de materiais e energia estimados na fase de projeto e monitorados na implantação da Linha 5-Lilás e considerações sobre áreas potenciais de desenvolvimento tecnológico para redução de emissões em projetos de transporte público sobre trilhos e estudos futuros de expansão da rede.

INTRODUÇÃO

No contexto de alta dependência por energia, predominantemente de origem fóssil, o setor de transportes é responsável por parte significativa das emissões de gases de efeito estufa e por seus efeitos nas mudanças climáticas e no agravamento da qualidade do ar a nível local.

No Estado de São Paulo, o setor de transportes foi responsável por 32% do total de emissões de gases de efeito estufa do Estado, em 2014, sendo que mais da metade deste total (25,7 MtCO₂e) foi decorrente do transporte de passageiros, segundo o Sistema de Estimativa de Emissão de Gases de Efeito Estufa do Observatório do Clima. (Way Carbon, 2016).

O transporte público sobre trilhos, que é uma referência mundial como solução para a mobilidade urbana em grandes cidades, tem se destacado não só pelos benefícios mais evidentes que proporciona à população e à qualidade de vida, mas pela diferença do seu desempenho ambiental associado às emissões de gases de efeito estufa – GEE frente a outros modos, como ônibus e automóveis.

Ainda que seja fortemente influenciado pela matriz energética, que no caso do Brasil é predominantemente renovável, o sistema metroviário é mais eficiente e sustentável por apresentar menor emissão de gases de efeito estufa por passageiro-quilômetro.

No período de 2008 a 2011 – quando se utilizou mais hidrelétricas na composição da energia no país, a emissão indireta média para transportar cada passageiro do Metrô de São Paulo pela distância de um quilômetro foi de 3 gramas em CO₂ equivalente (gCO₂e). Já no período de 2012-2016, essa emissão foi de 6 gCO₂e/pkm, (Metrô de São Paulo, 2016).

Analisando o desempenho dos modais em termos de emissão de carbono, pode-se dizer que as emissões médias do metrô em São Paulo (período 2012-2016), são 18 vezes menores que as dos automóveis à gasolina (período 2012-2015) e 14 vezes menores que as dos ônibus na cidade de São Paulo (período 2012-2016), (Metrô de São Paulo, 2016).

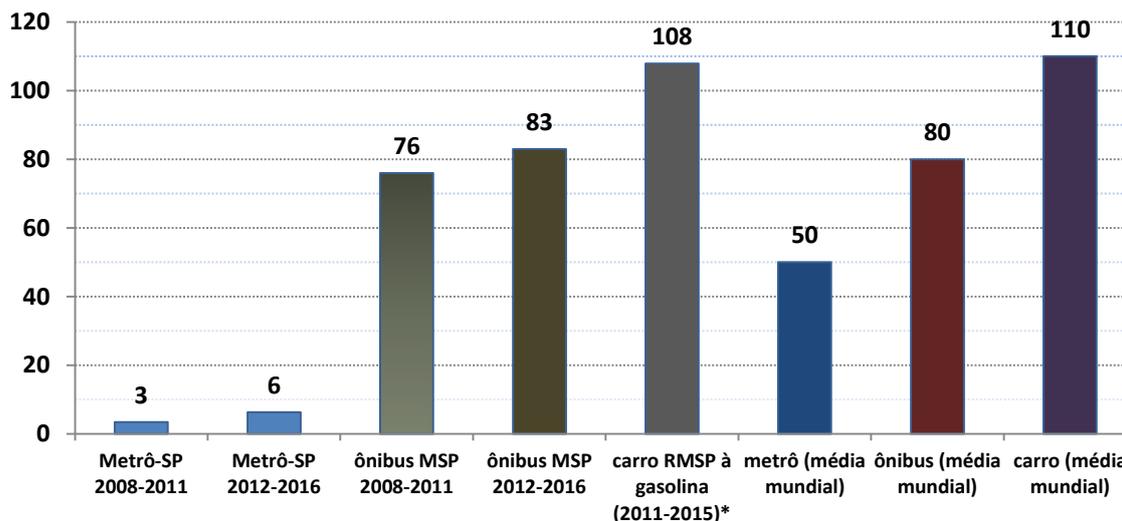


Figura 1: Emissões de gases de efeito estufa por passageiro.kilômetro - metrô, ônibus e automóvel (gCO2e por pkm) *Emissão de veículos a gasolina calculado com base em dados disponíveis de autonomia e frota de veículos da RMSP. Fonte: Valores de São Paulo - Inventário de Emissões de GEE Metrô de São Paulo 2016. Valores mundiais de referência: Custos de Energia, Fontes Renováveis e Emissões de CO2e. NOVA, 2008.

1 Informações obtidas nos relatórios anuais “Emissões veiculares do Estado de São Paulo” da CETESB. O relatório com informações referentes a 2016, ainda não foi editado.

Mas para que as grandes cidades alterem o padrão de mobilidade urbana atual privilegiando sistemas não sustentáveis, existe a necessidade de empreendimentos importantes em infraestrutura. A implantação de empreendimentos de porte, como o de linhas de metrô, requer, além de expressivos investimentos financeiros, a execução de obras e o emprego de métodos construtivos com alto impacto no ambiente, no consumo de materiais e uso de equipamentos que geram emissões de GEE.

Por se tratar de problemas globais, as soluções devem levar em conta os impactos ambientais em todo o ciclo de vida de produtos e serviços.

Para identificar as medidas e soluções que possam reduzir as emissões de gases de efeito estufa no setor de transporte, é necessário realizar um diagnóstico das fontes de emissão desde a concepção do projeto, implantação da infraestrutura até a operação.

O conceito de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma técnica usada para análise do desempenho ambiental de um produto, processo ou serviço, no exercício de determinada função. Em linhas gerais, esta análise consiste em duas etapas, sendo a primeira, denominada Análise do Inventário de Ciclo de Vida (ICV), e compreende a contabilização das interações ocorridas entre o ciclo de vida do produto – desde a extração de recursos naturais, passando por todas as etapas de sua cadeia produtiva, do uso em si para efeito do atendimento da função, e de seu descarte – e o meio ambiente. Estas interações ocorrem na forma de correntes de matéria e de energia que circulam através das fronteiras que definem as dimensões do ciclo de vida – ou sistema de controle. A segunda etapa da ACV consiste da Avaliação de Impactos Ambientais (AICV) e trata da expressão dos consumos e gerações associados ao ciclo de vida do produto em termos de impactos ambientais (ABNT 2009 a).

A ACV, como uma técnica de diagnóstico, permite identificar o desempenho ambiental discriminando cada estágio do ciclo de vida, abrindo por isso uma perspectiva para implantação de ações de engenharia que resultem na redução de consumos e de emissão; ou seja, em uma melhora nas eficiências de conversão de insumos em produtos. Além disso, ao ser aplicada esta abordagem durante a fase de concepção de um produto – ou mesmo, de uma tecnologia, permite identificar gargalos ambientais a eles associados, abrindo campo para que ações de redução de impactos sejam incorporadas ao processo em desenvolvimento, antes que a produção do bem, ou a implementação do processo, passem efetivamente para escala industrial (ABNT 2009 b).

Assim, este trabalho apresenta os resultados da aplicação da metodologia de inventariamento de dados de consumo de materiais e energia estimados na fase de projeto e monitorados na fase de implantação do trecho atualmente em expansão da Linha 5-Lilás e as principais considerações para a identificação de áreas potenciais de desenvolvimento tecnológico para redução de emissões em projetos de transporte público sobre trilhos.

Para o desenvolvimento da metodologia e da ferramenta, o Metrô de São Paulo contou com o trabalho de consultoria da empresa Way Carbon, no período de abril de 2016 a abril de 2017.

1. DIAGNÓSTICO

1.1 Emissões de GEE e Contaminantes Atmosféricos Locais associados ao Ciclo de Vida de Empreendimentos

Os sistemas de transporte de passageiros são grandes consumidores de energia, seja na forma de combustíveis (fósseis ou renováveis), seja na forma de energia elétrica e, portanto, é cada vez mais estratégico que se faça monitoramento do consumo e investimentos em tecnologia e eficiência energética.

O inventariamento de emissões de GEE, relacionadas à operação e manutenção das linhas 1-Azul, 2-Verde, 3-Vermelha e 5-Lilás, às atividades realizadas nos canteiros de obras de expansão e nas áreas administrativas da companhia, apontam que o consumo de energia pela operação é responsável por 86% do total de emissões de GEE do Metrô, ou seja, 44 mil toneladas em CO₂e, segundo o Inventário de Emissões de GEE do Metrô de São Paulo, 2016.

Assim, o desenvolvimento da metodologia e plano de gestão de emissões previsto na contratação da Linha 5 - Lilás trazem um aprimoramento das atividades de monitoramento e inventário das emissões de gases de efeito estufa que vêm sendo realizadas pelo Metrô São Paulo desde 2008, abrangendo as atividades de operação, manutenção e administração.

Sob um olhar mais abrangente do ciclo de vida, a fase de implantação de empreendimentos como os de metrô, apresenta importantes aspectos relacionados à dimensão das mudanças climáticas, através de emissões de GEE e outros poluentes atmosféricos, associados às atividades de construção civil pesada.

Considerando o cimento e aço como os mais relevantes precursores de emissões de GEE para o setor de construção civil, juntos, foram responsáveis, em 2014, por 6,75% das emissões no Brasil, segundo o Sistema de Estimativa de Emissão de Gases de Efeito Estufa do Observatório do Clima (cimento = 42,9 MtCO₂e – 2,76%; metalurgia = 62,2 MtCO₂e – 3,99%)(Way Carbon, 2016).

Em relação a outros poluentes atmosféricos, gases de efeito local (não – GEE) na construção civil, destacam-se as emissões de Material Particulado (PM). Trata-se de partículas muito finas com diâmetro aerodinâmico menor que 100 micra de sólidos ou líquidos suspensos no ar e não constituem uma espécie química definida. Elas ficam suspensas no ar na forma de poeira, neblina, fumaça, aerossol, etc. e podem gerar efeitos nocivos à saúde da população, como doença pulmonar, asma e bronquite e provocar danos à vegetação, qualidade do ar e contaminação do solo.

Nas diversas etapas do ciclo de vida de uma construção, pode ser gerada poluição por material particulado, seja na extração de agregados em minerações, na fabricação de materiais, no transporte, ou na execução das obras.

Nas atividades de escavação, serragem de materiais diversos, perfuração, raspagem, movimentação de veículos em áreas não pavimentadas, produção de concretos e argamassas, limpeza, estocagem de agregados e outros materiais, e demolições, são produzidas emissões diretas de material particulado na atmosfera, que se caracterizam por emissões primárias.

As emissões secundárias, nas atividades do canteiro de obras, são menos significativas, frente ao volume de emissões primárias e estão relacionadas à emissão de particulados a partir da queima de combustíveis (foligem).

1.2 Estudo de Caso da Linha 5 – Lilás

Como a implantação de linhas de metrô está relacionada a obras de grandes proporções, têm sido crescentes as exigências dos agentes financeiros quanto aos impactos dos empreendimentos associados ao ciclo de vida do empreendimento.

Para o financiamento da extensão da Linha 5 – Lilás foi firmado contrato entre o Governo do Estado de São Paulo (GESP) e o Banco Internacional para a Reconstrução e Desenvolvimento – BIRD e fez parte da operação e da obrigação contratual, o desenvolvimento de metodologia de contabilização de emissões e a construção de uma ferramenta para quantificar as emissões de GEE e contaminantes atmosféricos locais para análise de impactos nas etapas de planejamento, implantação das obras e operação.

O projeto da Linha 5 – Lilás foi concebido, em 2001, para ligar a região sul à região central da cidade de São Paulo, ligando o Capão Redondo à Chácara Klabin.

O trecho inicial, de 8,4 Km de extensão, encontra-se em operação entre as estações Capão Redondo e Largo Treze, desde outubro de 2002, com seis estações. Foram construídos 7 km de via elevada, 1 km de via em superfície e 850 metros em via subterrânea, bem como um pátio com 550 metros de vias para manutenção e estacionamento de trens, em Capão Redondo. Este trecho foi construído pela Companhia Paulista de Trens Metropolitanos – CPTM

e, em 2001, o Governo do Estado de São Paulo transferiu a operação da linha para a Companhia do Metropolitano de São Paulo.

O atual trecho, em construção pelo Metrô de São Paulo, possui 11,5 km de extensão. Será subterrâneo com via permanente em túneis duplos e singelos, escavados nos métodos conhecidos como túnel mineiro (New Austrian Tunnelling Method – NATM), que consiste na escavação sequencial do maciço utilizando concreto projetado como suporte associado a outros elementos e no método mecanizado (Tunnel Boring Machines – TBM), que utiliza máquinas tuneladoras.

Depois de finalizada, a Linha 5 - Lilás totalizará 19,9 km de extensão, 17 estações, 2 pátios de estacionamento e manutenção e 34 trens.

2. METODOLOGIA

2.1 Inventário de Emissões de GEE

Para o desenvolvimento da metodologia de inventariamento das emissões associadas ao ciclo de vida de uma linha de metrô foram estudadas as metodologias consolidadas internacionalmente, além de indicações específicas para o Brasil e o setor de construções. A partir dessa robusta base metodológica, foi definida uma estrutura preliminar para classificação das etapas do ciclo de vida e abrangência de processos operacionais a serem considerados na análise.

Foram utilizadas as especificações do Programa Brasileiro GHG Protocol que são pautadas pelas Normas Corporativas de Transparência e Contabilização de Gases de Efeito Estufa do GHG Protocol, metodologia de cálculo e relato desenvolvida pelo World Resources Institute-

WRI, em conjunto com o World Business Council for Sustainable Development-WBCSD para inventário empresarial, compatível com as metodologias do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas-IPCC e com as diretrizes da norma ABNT NBR ISO 14064 (FGV/GVCES; WRI, 2011).

O IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories é um guia metodológico mundialmente aceito e adotado como referência para metodologias de cálculo de inventários corporativos, como feito no GHG Protocol. Para o embasamento das emissões no setor de construção civil, foram considerados os procedimentos metodológicos contidos no Guia para Inventário de GEE da Construção Civil do Sinduscon-SP. O guia do setor de construção civil é considerado apenas para o mercado imobiliário, mas pode ser adaptado para obras de infraestrutura, orientando o usuário quanto às especificidades das obras civis desenvolvidas pelo setor, não abordadas detalhadamente nas normas gerais.

2.2 Estrutura de Análise

Sob o aspecto de ciclo de vida e contexto de negócio para a organização, as fontes de emissão e consumo de energia foram caracterizadas com base na unidade operacional correspondente (lotes de obra) e no mapeamento das etapas, processos e atividades que ela se enquadra.

A implantação da linha foi segmentada em lotes de acordo com o processo adotado na licitação, e tendo em vista o escopo de estudo para a Linha 5 - Lilás, foram cadastrados os lotes 1 a 8. Para alguns itens, projetados para a linha como um todo, foi necessário a criação de uma unidade operacional para comportar essas informações.

Para fazer a distinção entre os macroprocessos do ciclo de vida, foram definidas as principais etapas para projeto de novas linhas: obra bruta, via permanente e sistemas. O mapeamento de processos ilustrou o conjunto de atividades previstas para cada etapa. A abordagem de classificação das atividades foi feita de acordo com os itens planejados por cada processo de trabalho no planejamento de novas linhas.

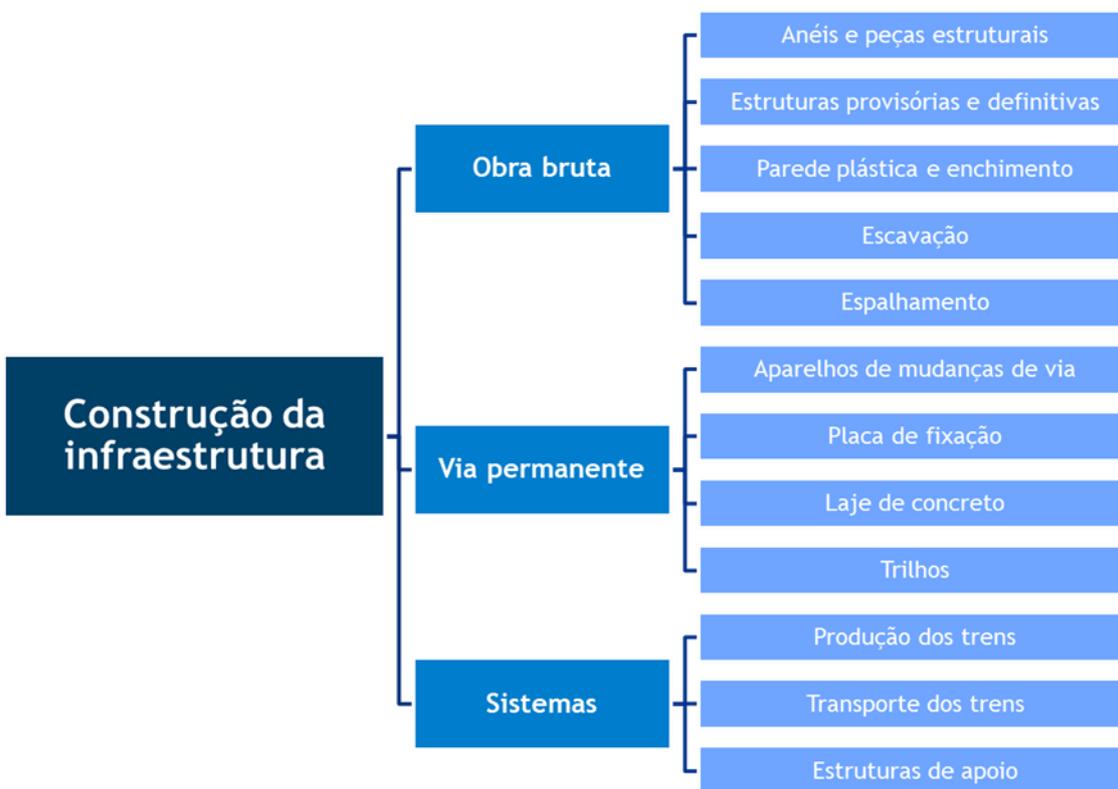


Figura 2 - Representação de etapas, processos e atividades.

O estudo compreendeu dois modelos de análise: modelo ex-ante baseado nos dados de consumo de insumos e energia estimados no projeto básico, e modelo ex-post pautado nos dados efetivos obtidos na implantação do trecho em expansão da Linha 5 – Lilás.

2.2.1 Modelo ex-ante – dados de projeto

O modelo ex-ante visou analisar o que foi estimado para a implantação do projeto básico de acordo com os aspectos de emissões de gases de efeito estufa e contaminantes atmosféricos locais geradas e a energia consumida. Após alinhamento com a equipe de projetos, a lista de aspectos contemplados para análise compreendeu volume ou massa dos insumos previstos para a obra, volume escavado por maquinário e por shield, massa de itens das linhas e estações junto à composição material, distância de transporte dos trens até a linha.

No escopo desta análise, o cenário se referiu a fontes de emissões (materiais e consumo de energia) referentes às etapas, processos e atividades da implantação da linha para diagnosticar os principais processos responsáveis pelos impactos ambientais no ciclo de vida de produtos e serviços por unidade operacional (lotes de obra).

2.2.2 Modelo ex-post – dados de obra

Já o modelo de análise ex-post mensurou as emissões de gases de efeito estufa e contaminantes atmosféricos locais e, a energia consumida para a implantação e obras com dados efetivos levantados junto aos consórcios de construtoras responsáveis pelos lotes da Linha 5-Lilás.

Algumas construtoras envolvidas na implantação da Linha 5-Lilás possuíam a prática de realizar o inventário de GEE das obras ou da empresa como um todo. Ao analisar os resultados dos relatórios apresentados pelas construtoras, foi possível observar um perfil característico das emissões e a constante presença dos mesmos tipos de fontes dentre as mais relevantes. Desse modo, a lista definida para a coleta final dos dados com a intenção de obter as princi-

país informações para o cálculo de emissões em todos os lotes, incluiu volume ou massa consumida de aço, cimento e concreto; volume consumido de diesel no gerador e maquinário; número de funcionários e dias de obra; compra de energia da rede elétrica; massa de resíduos sólidos gerado; volume de efluente gerado.

2.3 Ferramenta de Modelagem de Consumo de Energia e Emissões

Além do desenvolvimento da metodologia de inventariamento de emissões de GEE e CAL, foi construída uma ferramenta para modelagem de consumo de energia e emissões que considere o ciclo de vida – produção, implantação e operação/manutenção – de sistemas de transporte público sobre trilhos, considerando diferentes alternativas tecnológicas e construtivas, para avaliar ex-ante os resultados do cenário planejado e ex-post, os dados efetivos obtidos nas obras, e na operação.

Além de estimar e calcular as emissões dos principais insumos e processos de cada etapa do ciclo de vida de uma linha de metrô e diferentes alternativas tecnológicas e construtivas, a ferramenta compreendeu campos para registros dos dados dos seguintes estágios:

- Produção de materiais e equipamentos (por ex.: geração de energia, produção de cimento, asfalto, aço e outros metais, fabricação dos veículos e equipamentos, fabricação de trilhos, entre outros); Construção da infraestrutura; Operação e manutenção, incluindo reposição de frotas.

A Figura 3 apresenta um recorte da ferramenta que exemplifica como os dados de entrada, assim como o cadastro de apoio e dados de parametrização foram sistematizados:

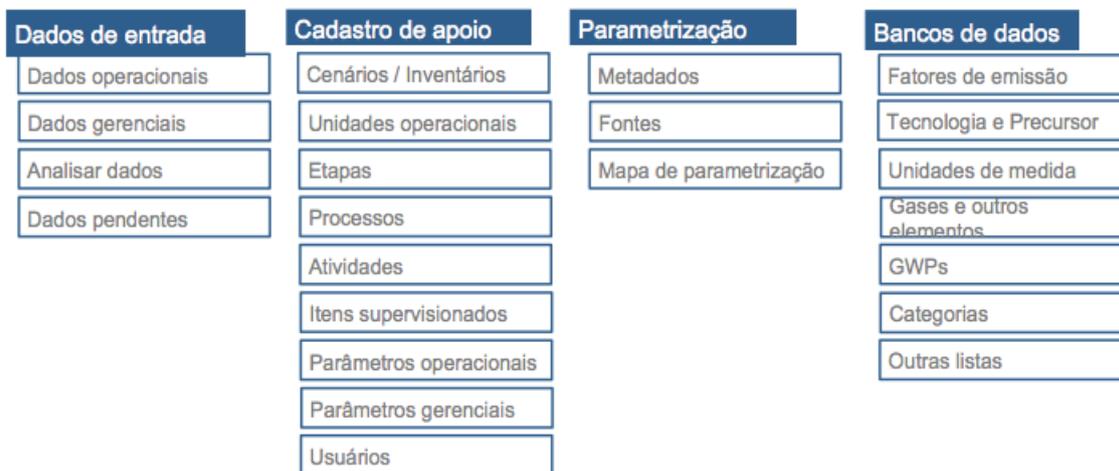


Figura 3 - Recorte da página inicial da ferramenta.

2.3.1 Emissões Consideradas e Fatores de Emissão

As emissões consideradas na ferramenta foram divididas em dois grupos distintos: as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) e as emissões de Contaminantes Atmosféricos Locais (CAL).

No grupo das emissões de GEE, conforme as recomendações de padrões nacionais e internacionais foram incluídos os seguintes gases: Dióxido de carbono (CO₂), Metano (CH₄), Óxido nitroso (N₂O), Hidrofluorcarbonetos (HFCs), Perfluorcarbonetos (PFCs), Hexafluoreto de enxofre (SF₆) e Trifluoreto de Nitrogênio (NF₃).

Tais gases foram totalizados em um resultado único, utilizando-se os chamados Potenciais de Aquecimento Global (PAG ou GWP - Global Warming Potencial) para se converter as emissões de cada GEE em valores de dióxido de carbono equivalente (CO₂e).

Para o cálculo das emissões de GEE foram utilizados fatores de emissão baseados em padrões nacionais e internacionais, como IPCC 2006, GHG Protocol, da Agência Internacional de Energia, entre outros.

Em relação a alguns fatores, como os referentes ao consumo de energia elétrica do Sistema Interligado Nacional ou a fração de biocombustíveis no diesel e na gasolina nacionais, é necessária a atualização periódica na ferramenta.

Entre as emissões de Contaminantes Atmosféricos Locais - CAL, foram considerados Dióxido de enxofre (SO₂), Óxidos de Nitrogênio (NO_x), Monóxido de carbono (CO), Compostos Orgânicos Voláteis exceto Metano (NMVOC), Material Particulado inferior a 10 µm (PM₁₀), Material Particulado inferior a 2,5 µm (PM_{2,5}).

Para o cálculo das emissões de CAL, a principal referência utilizada foi a ferramenta do Fórum Global sobre Poluição Atmosférica (Global Atmospheric Pollution Forum – GAPF) que utiliza fatores de emissão disponibilizados pelas agências ambientais da Europa e dos Estados Unidos. Para os casos em que existirem fatores de emissão mais específicos para a realidade brasileira, como, por exemplo, para o transporte rodoviário de cargas, foram utilizados fatores regionalizados em vez daqueles de caráter mais geral.

Como estes poluentes possuem apenas efeito local, ao contrário dos GEE que causam impactos em todo o sistema climático global, foram consideradas apenas as emissões de CAL que ocorreram em território brasileiro. Dessa forma, as emissões desses poluentes para a fabricação de materiais e para a fabricação dos trens que ocorrerem fora do território nacional não foram incluídas na análise.

Outro motivo para se adotar essa simplificação é a indisponibilidade de fatores deste tipo que sejam específicos para a matriz energética de cada país. Mesmo para a matriz energética brasileira, esses fatores não estão prontamente disponíveis e terão que ser construídos de forma estimada e indireta a partir de dados do Balanço Energético Nacional, combinados com fatores do GAPF.

Ressalta-se por fim que, tanto para GEE quanto para CAL, dependendo da etapa do ciclo de vida em questão e da localização geográfica, pode ser que não estejam disponíveis na literatura fatores de emissão específicos para um determinado país (em que partes dos trens estejam sendo produzidas, por exemplo). Nesses casos, foram avaliadas as limitações e aplicados fatores aproximados mais adequados.

A análise das emissões do Metrô considerou a princípio cinco etapas distintas do seu ciclo de vida: construção da infraestrutura, fabricação dos trens, manutenção, operação da infraestrutura, operação dos trens. Tal organização é a mesma utilizada em estudo da Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro e se mostrou condizente com os objetivos da ferramenta.

DIAGNÓSTICO

ANÁLISE DOS RESULTADOS

3.1 Emissões de GEE por etapa do Ciclo de Vida: Processo, Atividade

Utilizando a ferramenta de cálculo constatou-se que 94 % das emissões ex-ante são correspondentes ao processo de obra bruta devido ao consumo de insumos para a obra.

Tabela 1 - Emissões ex-ante de GEE por processo.

Unidades	tCO2e	%
Obra bruta	317.221,75	94,4%
Via permanente	11.372,60	3,4%
Sistemas	7.530,44	2,2%
Total Geral	336.124,80	100,0%

Já os processos de via permanente e sistemas somaram 5,6% apenas. Em relação à via permanente, também se destaca a produção dos insumos para a construção da linha. Já para os sistemas, que contempla uma série de componentes elétricos e para movimentação de pessoas, os resultados apresentados indicaram apenas 2% das emissões do cenário a partir de grande volume de dados.

Como a coleta de dados de projeto normalmente é a etapa mais trabalhosa para o cálculo de emissões, foram focados nos insumos de grandes volumes, por representarem mais de 90% do resultado obtido.

Ao analisar o perfil de emissões sob o aspecto de atividade, duas chamaram a atenção por serem responsáveis por 92% do impacto: estruturas provisórias e definitivas, anéis e peças estruturais. Trata-se de atividades para a construção das principais estruturas dos túneis e das estações. As estruturas provisórias e definitivas incluem os moldados e itens para uso na obra por um determinado período de tempo, já os anéis e peças estruturas contemplam os pré-moldados e o graute (tipo específico de concreto para preenchimento de blocos e canaletas).

Em seguida, há uma série de itens da obra que representaram 8% das emissões estimadas como parede plástica e enchimento, laje de concreto, trens, estruturas de apoio, trilhos, placas de fixação, AMV. As operações de maquinário e do Shield, assim como o transporte dos trens da montadora à linha do Metrô são desprezíveis dentro desse contexto.

Tabela 3 - Emissões ex-ante de GEE por atividade.

Processos	tCO2e	%
Estruturas provisórias e definitivas	220.726,84	65,7%
Anéis e peças estruturais	87.060,16	25,9%
Parede plástica e enchimento	9.118,74	2,7%
Laje de concreto	8.223,89	2,4%
Produção dos trens	4.256,02	1,3%
Estruturas de apoio	3.233,40	1,0%
Trilhos	2.141,59	0,6%
Placa de fixação	690,14	0,2%
Aparelhos de mudanças de via	316,99	0,1%
Escavação	257,31	0,1%
Espalhamento	58,72	0,0%
Transporte dos trens	41,03	0,0%
Total Geral	336.124,80	100,0%

Na análise dos dados efetivos (ex-post) obtidos na implantação da Linha 5 – Lilás, mais de 70% das emissões de GEE estavam associadas ao consumo de materiais na obra como concreto, aço e cimento. Os fatores de emissão para produção desses materiais foram obtidos do guia de inventário de GEE do setor de construção do SINDUSCON, de forma a incluir a abordagem de ciclo de vida para o impacto em mudança do clima.

Com impactos menores, a análise identificou as emissões geradas na escavação por maquinário a diesel (12%), nos processos de tratamento de resíduos e efluentes (8%) e pelo consumo de energia adquirida da rede ou do gerador a diesel (5%).

Tabela 4 – Emissões ex-post de GEE por processo.

Processos	tCO2	%
Insumos	166.326,53	73,7%
Escavação	26.426,85	11,7%
Tratamento de resíduos e efluentes	17.604,51	7,8%
Operação	11.875,86	5,3%
Transporte de colaboradores	3.333,12	1,5%
Total	225.566,88	100,0%

3.2 Emissões de GEE por Método Construtivo

Ao verificar a proporção de método construtivo e emissão gerada por metro, ficou evidente o melhor desempenho climático do uso do shield frente ao NATM. O indicador de eficiência climática em toneladas de CO2 equivalente emitidas por metro de túnel construído expressou melhor desempenho quanto maior o trecho escavado. Esse ganho de escala ocorreu devido à possibilidade de uso do Shield, método construtivo que só é justificável financeiramente em túneis mais extensos para amortização do valor da máquina.

Tabela 4 – Indicadores ex-ante para túneis por método construtivo.

Unidade	tCO ₂ e	Túnel (m)	NATM (m)	Shield (m)	VCA (m)	tCO ₂ e/m
Lote 1	13.032	636	500	0	136	20,5
Lote 3	87.291	5.133	90	4.391	652	17,0
Lote 7	95.560	5.743	409	4.851	483	16,6

Ainda que com dados parciais das obras por não se ter obtido dados do Lote 1, o cálculo de indicadores de emissões por método construtivo chegou à mesma conclusão verificada no modelo ex-ante: as emissões por metro de túnel são menores no lote 7 que possui maior uso do shield. Desse modo, o argumento de que a escavação por shield decorre em menores emissões de GEE, levando em conta o ciclo de vida, é reforçado.

Tabela 5 – Emissões ex-post de GEE nas obras por lote e método construtivo.

Unidade	tCO ₂ e	Túnel (m)	NATM (m)	Shield (m)	VCA (m)	tCO ₂ e/m
Lote 1	-	636	500	0	136	-
Lote 3	37.811	5.133	90	4.391	652	7,37
Lote 7	31.916	5.743	409	4.851	483	5,56

3.3 Emissões de CAL

Com relação aos Contaminantes Atmosféricos Locais (CAL), as emissões estimadas foram originadas por combustão móvel. Nesse contexto, destaca-se o transporte dos trens até as frentes de obra por caminhões e a operação de equipamentos para escavação e espalhamento. A combustão do diesel nesses casos gera emissões de SO₂, NO_x, CO, NMVOC, PM₁₀, PM_{2.5}.

Tabela 6 – Emissões ex-ante de Contaminantes Atmosféricos Locais.

tCAL	Atividades				
Processos	Escavação	Espalhamento	Transporte dos trens	Total Geral	
CO	0,011197	0,015117	0,032897	0,059211	
NMVOC	0,002799	0,003779	0,005520	0,012098	
NOx	0,074459	0,100528	0,227899	0,402886	
PM10	0,000084	0,000113	0,037646	0,037843	
PM2.5	0,000066	0,000089	0,003069	0,003225	
SO2	0,262665	0,354630	0,013648	0,630943	

As emissões de poluentes locais estão relacionadas à preocupação com o impacto na saúde humana. Tendo em vista esse objetivo, ressalta-se a importância estratégica para as empresas de transporte e as grandes cidades de aprofundar o estudo de potencial de impacto na saúde humana das diversas alternativas de mobilidade urbana. As emissões de CAL também estão associadas ao consumo de combustíveis, principalmente diesel, para geração de energia utilizada no maquinário da obra. Devido a esse fato, a escavação por shield possui vantagens frente aos demais métodos construtivos que utilizam maquinário de escavação movido a diesel.

Portanto, para a gestão ambiental, especial atenção deve ser dada ao desempenho operacional do maquinário, assim como, é importante monitorar as emissões geradas através de medidores.

Tabela 7 – Emissões ex-post de Contaminantes Atmosféricos Locais.

tCAL Atividades	Poluentes Maquinário a diesel	Gerador a diesel	Transporte de colaboradores	Total
CO	6,804	0,804	4,673	12,281
NMVOG	1,701	0,201	0,527	2,429
NOx	45,246	5,349	5,686	56,282
PM10	0,051	0,006	0,919	0,976
PM2.5	0,040	0,005	0,104	0,149
SO2	159,614	18,870	0,411	178,895

Os resultados obtidos nos dois modelos de análise destacou a importância de melhorias de desempenho ambiental, como a otimização da logística e eficiência do maquinário e gerador, muitas vezes alinhada à redução de custos operacionais.

3.4 Consumo de energia

Os resultados por processo mostraram novamente a obra bruta como destaque devido ao alto consumo de insumos de obra para confecção dos componentes estruturais básicos na implantação do transporte sobre trilhos. Por outro lado, o conjunto de equipamentos incluídos no processo de sistemas possuiu maior participação em termos de energia consumida em relação às emissões de GEE, pois a produção de componentes metálicos presentes na linha demanda maior intensidade energética do que concreto e cimento utilizados em grandes volumes nos lotes.

Tabela 8 – Consumo de energia ex-ante por processo.

Processos	MWh	%
Obra bruta	1.045.003,59	87,76%
Sistemas	86.879,67	7,30%
Via permanente	58.884,81	4,95%
Total Geral	1.190.768,07	100,00%

A energia consumida foi calculada a partir de indicadores de compra de energia elétrica da rede, geração de energia no gerador a diesel e da energia consumida para a produção dos insumos para a execução da obra.

Tabela 9 – Consumo de energia ex-post por processo.

Processos	MWh	%
Insumos	652.781	58,5%
Transporte de colaboradores	273.130	24,5%
Operação	95.627	8,6%
Escavação	94.463	8,5%
Total	1.116.000	100,0%

Os resultados por processo mostraram novamente a representatividade dos insumos de obra no inventário. A energia necessária para produção de aço, cimento e concreto é a parte mais importante no ciclo de vida da implantação de novas linhas metroviárias.

O cálculo de consumo de energia para produção de materiais foi obtido de artigos científicos específicos para análise do ciclo de vida em termos energéticos de cada item. Com relação ao transporte de colaboradores, o cálculo de energia foi baseado no conteúdo energético do diesel e seu poder calorífico como combustível.

Os resultados referentes ao transporte de colaboradores e a energia para a operação da obra representaram níveis menores de consumo.

3.5 Comparação de cenários de emissões

Entre os cenários ex-ante e ex-post, a principal diferença é a origem dos dados a serem alimentados à ferramenta e não a metodologia utilizada para o cálculo. Para a análise ex-ante foi realizado um prognóstico das emissões da etapa de Construção da Infraestrutura. Já na

análise ex-post foram analisados os valores que representam os consumos reais apurados na etapa de construção.

Uma analogia aplicável, apresentada pelo próprio guia da SINDUSCON-SP para inventários de emissões de GEE é a figura do chamado Orçamento de Emissões, calculado anteriormente ao início da obra (ex-ante), que depois poderá ser comparado ao inventário de emissões propriamente dito (ex-post), que quantifica as emissões que de fato ocorreram em decorrência da realização da obra. A comparação ex-ante e ex-post é, portanto, análoga a uma comparação dos gastos orçados versus realizados de uma determinada obra.

Outra análise realizada a partir da ferramenta é a comparação do desempenho de diferentes tecnologias ou diferentes métodos construtivos. Da mesma forma que no caso anterior, a diferenciação entre os resultados de um e outro cenário se dá pelas diferenças entre os dados alimentados à ferramenta para se simular cada uma das tecnologias e/ou métodos construtivos. Desse modo, uma alternativa apresentará vantagens em relação à outra, caso necessite de menos cimento e aço do que outra, ou incorra em um consumo menor de combustíveis e assim por diante.

Nos gráficos a seguir, são apontadas as principais diferenças observadas entre os cenários planejado e executado, sendo os indicadores desdobrados em lotes, atividades, precursores e tecnologias a fim de se compreender as origens dessas desigualdades.

3.5.1 Cenário Planejado e Executado - Emissões de GEE

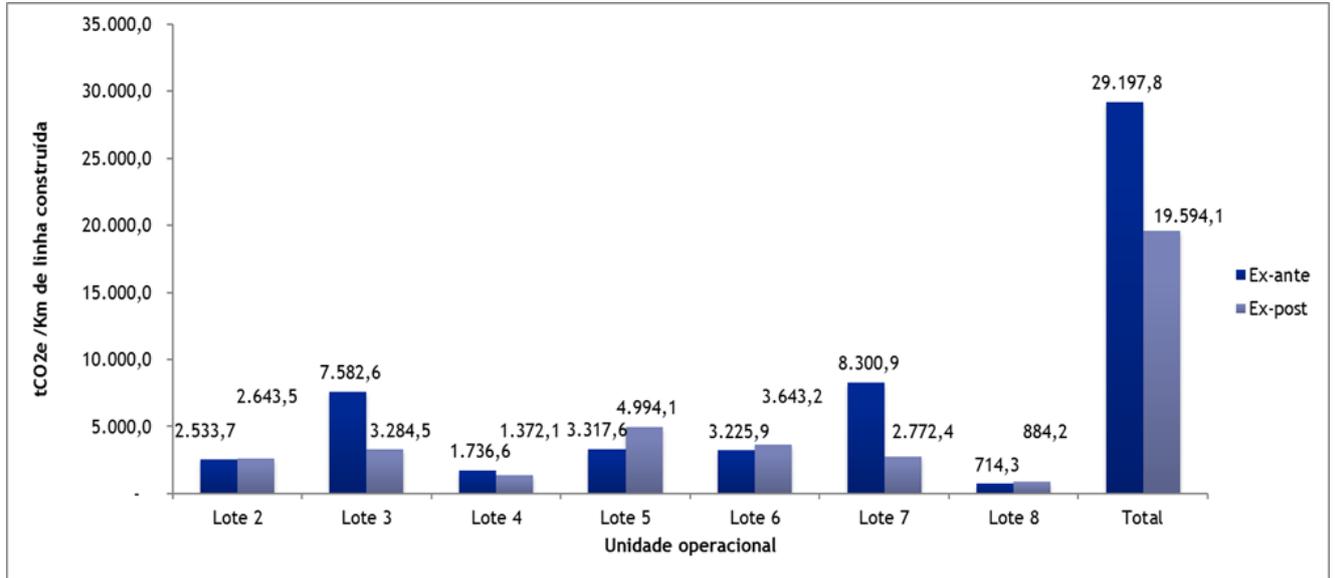


Figura 3 - Emissões de GEE por Km de linha construída

Em relação ao método construtivo selecionado, Shield é aquele que possui maior vantagem em relação aos demais métodos que utilizam maquinário de escavação movido a diesel. Porém, a sua utilização só é justificável financeiramente em túneis mais extensos para amortização do valor da máquina (Figura 4).

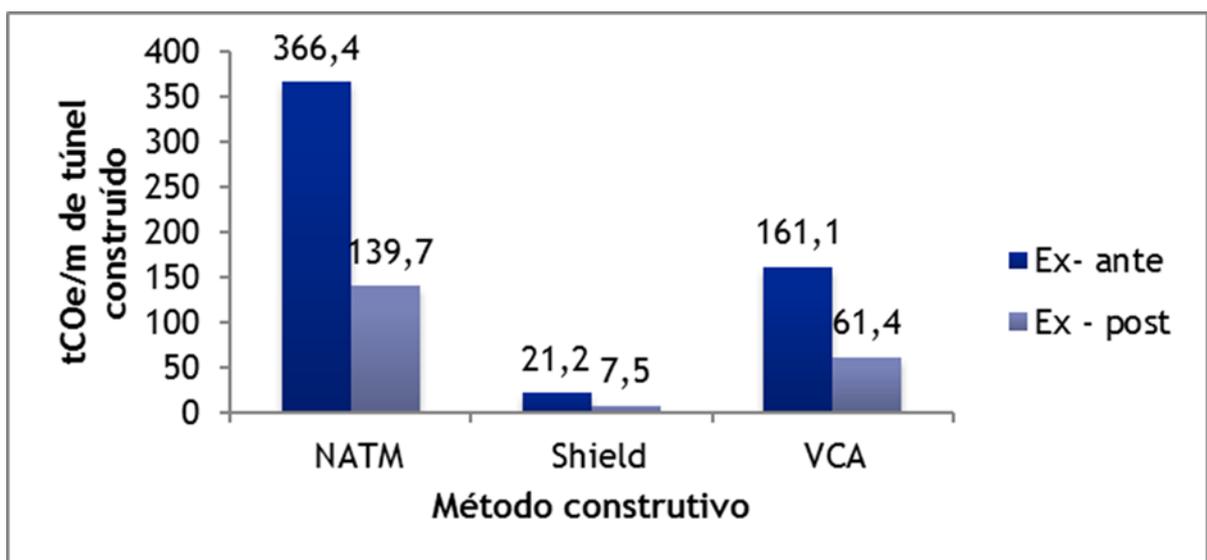


Figura 4- Emissões por m de túnel construído (WayCarbon, 2017).

Dentre os principais precursores responsáveis pelas emissões nas obras estão o aço, o concreto e diesel. Assim como no indicador consumo por m de túnel construído, as emissões referentes ao concreto e aço foram maiores na fase ex-ante em relação à ex-post, sendo que uma melhor estimativa foi realizada para o precursor aço. Novamente as emissões de diesel estão subestimadas na fase ex-ante, pelo mesmo motivo de dificuldade de coleta de dados anteriormente citado.

Como pode ser visto na Figura 5, o consumo de diesel por metro de túnel construído foi muito superior na fase ex-post em relação à ex-ante. Isso se deve ao fato de se tratar de uma variável difícil de ser estimada na fase da concepção de projeto, mas de fácil reporte pela equipe de projeto durante a obra. Já o consumo de concreto e aço foram inferiores na fase ex-post em relação à ex-ante, demonstrando que na obra verificou-se um uso mais eficiente desses materiais.

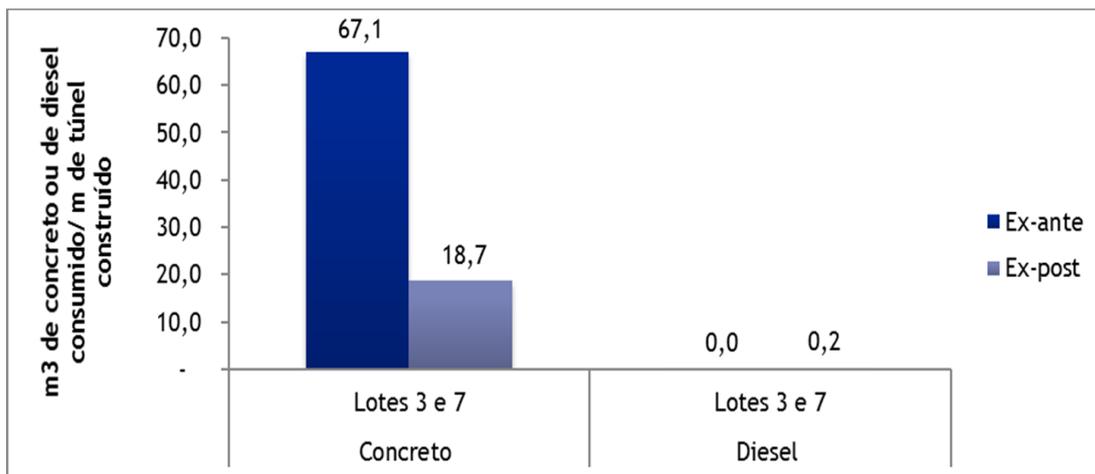


Figura 5 - Consumo de concreto e diesel por m de túnel construído.

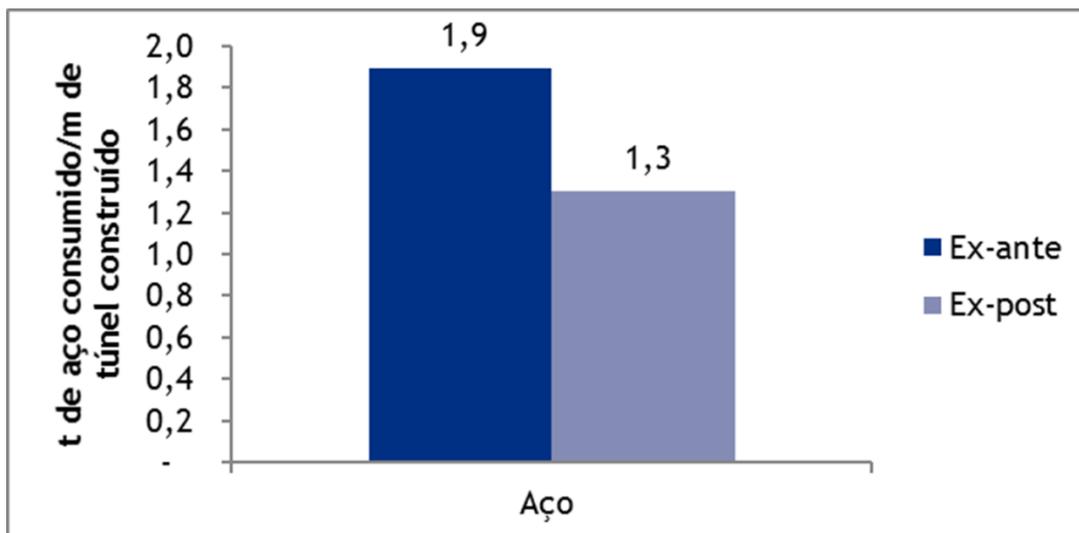


Figura 6 - Consumo de aço por m de túnel construído (WayCarbon, 2017).

4. INDICADORES DE EFICIÊNCIA

Foram calculados indicadores de eficiência de obra para as fases ex-ante e ex-post da Linha 5-Lilás, para auxiliar futuras análises de eficiência e permitir a comparação de alternativas.

Algumas diferenças na abordagem dos modelos tornaram-se necessárias, como a exclusão dos equipamentos e sistemas na fase ex-post, que não foram representativos no inventário como um todo. Além disso, nessa mesma fase, foram descartadas as análises para o Lote 1 – cujas obras já estavam concluídas no momento da coleta de dados – e foram incluídas as emissões referentes ao tratamento de resíduos sólidos e efluentes gerados na obra.

Em relação as emissões de GEE por unidade operacional, observa-se, em geral, uma redução na fase ex-post em relação à ex-ante. As maiores diferenças foram constatadas nos lotes 3 e 7, demonstrando que na obra provavelmente houve uma maior eficiência no consumo dos insumos utilizados na construção dos túneis, já que são eles os maiores responsáveis pelas

emissões nas obras. Ressalta-se que resultados mais precisos e acurados seriam alcançados caso os dados de entrada fossem obtidos ao final da obra e não com a obra parcialmente concluída, como foi o caso do modelo rodado.

Por meio do indicador emissões por km de linha construída foi possível constatar que os lotes 3 e 7 são aqueles que possuem pior desempenho, apresentando as maiores emissões. Isso ocorre porque neles há a escavação de túneis, que exige maior consumo de insumos para a obra. Além disso, nesses lotes é observada uma maior discrepância entre os modelos ex-ante e ex-post, com um pior desempenho ambiental associado à primeira fase. Julgou-se necessário excluir o Lote 1 no modelo ex-ante, pois o mesmo não foi considerado no modelo ex-post, uma vez que as obras já haviam sido finalizadas no momento da coleta de dados. Recomenda-se, entretanto, a não exclusão de lotes em análises posteriores.

Ao se comparar os métodos construtivos de forma mais direta utilizando, por exemplo, o indicador de emissões por quilômetro de via construída, constatou-se que a maior parte do impacto em Mudança do Clima associa o ciclo de vida às emissões para produção dos insumos utilizados na obra. Caso estes materiais sejam utilizados de forma mais eficiente, serão observados menores impactos ambientais e custos.

Além dos indicadores de eficiência associados à obra, o impacto em Mudança do Clima também pode ser avaliado sob a ótica da operação ao se estimar as emissões de CO₂e por passageiro.km. A Tabela X apresenta as emissões relacionadas ao consumo de energia em metros de três centros metropolitanos:

Tabela 10- Emissões relacionadas ao consumo de energia em metrô.

Cidades	Total de emissões tCO ₂ e	Emissões (gCO ₂)/passageiro.km	Ano da análise
Lisboa	14,5	49	2012
Bilbao	16,64	28	2011
São Paulo	44	4	2012

Fonte: Adaptado de de Andrade et al., 2014.

Apesar do total de emissões de CO₂ em Lisboa e Bilbao serem muito semelhantes, os valores do indicador gCO₂e/passageiro.km diferem muito. Nos dois casos a extensão das linhas avaliadas era equivalente a 43 km, mas a demanda de passageiros diferia muito, sendo correspondente a 52 milhões/ano em Lisboa e 87 milhões/ano em Bilbao. Já no caso de São Paulo, que apresentou o melhor desempenho nesse indicador, destacam-se dois aspectos: elevada demanda de passageiros por ano e matriz energética mais limpa, com predominância da energia gerada a partir de hidrelétricas – em 2007, o que representava 77% da oferta interna de energia. (de ANDRADE et al., 2014)

Outra análise relevante é a avaliação da melhoria de desempenho ambiental da cadeia de suprimentos. Ela pode ser feita por meio da pegada de carbono dos seus produtos, utilizando o indicador de tCO₂e por massa ou volume como critério de seleção ou diferencial no processo de contratação.

Já a tomada de decisão sobre a localização das estações pode ser feita por meio do cálculo das emissões para a construção da estação por acréscimo de demanda para a linha em número de passageiros ou em passageiros.km.

CONCLUSÕES

A partir das informações geradas com o desenvolvimento da metodologia e a aplicação na ferramenta de modelagem foi possível verificar aspectos estratégicos para tomada de decisão de planejamento de projetos de transporte sobre trilhos com cenários de baixo carbono, tais como:

- Monitoramento de emissões: acompanhar e comparar as emissões planejadas com as realizadas. Identificar oportunidades de aprimoramento do desempenho climático na etapa de planejamento do transporte sobre trilhos.

- Desenvolver especificações técnicas e de serviços adequadas aos princípios da construção civil sustentável e legislação pertinente, orientando a definição de alternativas tecnológicas e construtivas ainda nas etapas de planejamento, na definição de insumos e processos na etapa de implantação de novas linhas, de forma a promover a redução de impactos na operação e manutenção do sistema de transportes sobre trilhos.

- Benchmarking: ter informações que permitem a comparação das emissões com obras de infraestrutura de transporte em todo o globo.

- Avaliação de riscos e oportunidades: identificar e mitigar os riscos regulatórios e associados a futuras obrigações em relação a taxas de emissão de GEE ou restrições de emissão, bem como avaliar potenciais oportunidades custo-efetivas de reduções de emissão.

- Estabelecimento de metas: subsidiar o estabelecimento de metas de redução de emissões e o planejamento de estratégias de mitigação.

- Estimar em quanto tempo o impacto da implantação poderá ser compensado a médio ou longo prazo.

- Acompanhamento de resultados das ações de mitigação: quantificar progressos e melhorias decorrentes de iniciativas estratégicas relacionadas à temática das Mudanças Climáticas.

Além desses aspectos, é importante considerar os avanços nos acordos multilaterais internacionais sobre a questão das mudanças climáticas, na política nacional e marcos regulatórios. Na etapa de diagnóstico, é importante procurar antecipar este cenário para estruturar a estratégia climática da companhia.

Ao realizar esse exercício para a etapa de implantação de novas linhas metroviárias, é importante considerar um possível cenário nacional de precificação de carbono, o encarecimento das operações que consomem diesel e dos insumos adquiridos.

Segundo o Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável – CEBEDS afirma que a maior parte dos representantes das empresas brasileiras avalia como “Alta” ou “Muito alta” a possibilidade de ser adotado um instrumento de precificação de emissões no âmbito nacional, com possível entrada em vigor em 2020. Um estudo realizado pela IETA (International Emissions Trading Association), com 146 representantes de diversas organizações do mundo, também confirma que os respondentes do estudo esperam que países como Brasil, Chile, Japão, México e África do Sul instituam um ETS (em inglês, Emissions Trading Scheme) entre os anos de 2020 e 2025. (CEBEDS, 2016)

Em relação à legislação de poluentes atmosféricos locais, pode ser obrigatório um procedimento mais rigoroso de medição das emissões, por exemplo. Por outro lado, em um cenário

com preço sobre o carbono emitido, o transporte metroviário terá vantagens sobre as alternativas modais para mobilidade urbana.

Tendo em vista a intensificação de eventos climáticos extremos, o Acordo de Paris cita a necessidade do desencadeamento de estratégias de adaptação à Mudança do Clima. Isso se inicia com a identificação de vulnerabilidades climáticas, que em outras palavras significa analisar potenciais impactos na operação devido à alteração na dinâmica do clima.

Na construção civil, dias de chuva intensa podem deixar mais lentas ou até parar a operação das obras. Com a Mudança do Clima, a frequência de chuvas intensas pode aumentar. Utilizando a mesma lógica para a operação do metrô, o aumento de chuvas intensas pode significar um número maior de paradas da operação. Já um possível aumento na variação da temperatura pode acarretar em aumento potencial dos custos de manutenção do sistema de ventilação e dos trilhos, cujo índice de dilatação é influenciado pela temperatura. Uma maneira de se antever a esses e outros riscos é incluir uma análise da série histórica de fenômenos climáticos, como precipitação, inundação e temperatura na concepção de indicadores utilizados em projetos arquitetônicos e de drenagem. Além disso, recomenda-se avaliar os investimentos e custos operacionais de alternativas para via permanente.

Uma vez realizado o diagnóstico da empresa dentro de uma economia em transição devido aos impactos em Mudanças do Clima, é necessário criar estratégias para adequar seus processos dentro desse novo cenário. Assim, sugere-se o desenvolvimento de três frentes de trabalho: Estratégia de mitigação, Estratégia de compensação e Estratégia de adaptação.

As possibilidades de ações de mitigação recaem principalmente em duas frentes de trabalho: aumento de eficiência operacional e alteração do mix energético. Esse é o caso da troca de equipamentos elétricos por modelos mais modernos que consumam menos energia ou de renovação da frota para aumentar a quilometragem percorrida por litro de combustível.

Por outro lado, a transição para a economia de baixo carbono requer uma transformação brusca do business as usual². Dessa forma, o portfólio de projetos deve abranger fontes renováveis de energia, incluindo estudos sobre energia elétrica adquirida e combustíveis utilizados.

Algumas iniciativas de redução das emissões e do consumo de energia, durante a fase operacional de metrô, já são notórias no mundo. O metrô de Londres, por exemplo, investiu em escadas rolantes ativadas por sensores de presença; ventilação natural que minimiza a necessidade de utilizar ar-condicionado; iluminação natural que reduz a iluminação artificial nas estações. Já o metrô de Singapura, conhecido como Mass Rapid Transit (MRT), instalou portas de plataformas entre estações e túneis a fim de impedir que o ar proveniente dos túneis entre nas estações, reduzindo assim a necessidade de refrigera-las. Além disso, há dispositivos que recuperam parte da energia utilizada na travagem dos freios, recuperando até 5% da energia total utilizada pelo MRT. (ASE, 2013)

Apesar de o modal metrô ser considerado estratégico em cenários de baixo carbono, suas operações ainda assim geram impacto em Mudança do Clima e podem ser compensadas.

² No cenário *business as usual* pressupõe-se que as tendências futuras seguem as do passado e não ocorrerão mudanças nas políticas públicas (IPCC, 2017).

Nas operações do Metrô, as emissões de escopo 2 possuem grande influência no inventário da companhia pela intensidade energética consumida, o que destaca um risco da matriz energética do país se tornar mais intensa em carbono e comprometer metas de redução.

Tendo em vista a importância estratégica do tema de emissões para o transporte metroviário, devem ser avaliadas alternativas para mitigação do risco da matriz energética nacional ter pior desempenho em emissões, como a priorização de compra de energias renováveis no mercado livre.

Muito se fala na compensação das emissões de GEE através do plantio de árvores, porém, esta alternativa de compensação é muito criticada tecnicamente, pois esta é temporária e leva cerca de 20 anos para acontecer. Além disso, existem diversos riscos como mortalidade de mudas, queimadas e cortes ilegais. Geralmente não há monitoramento, verificações externas e registro público da remoção de GEE.

De acordo com a definição do IPCC (IPCC, 2014b), a adaptação à Mudança do Clima é o processo de ajuste ao clima atual ou esperado e seus efeitos, caracterizando-se por iniciativas que visam reduzir os riscos e as vulnerabilidades da empresa associadas a esses efeitos. A capacidade da empresa de se ajustar aos danos potenciais, aproveitar as oportunidades ou responder às consequências define a sua capacidade de adaptação.

Deve-se considerar, entretanto, que existe um limite de adaptação. Esse limite é caracterizado pela impossibilidade de tornar um sistema seguro a riscos intoleráveis, seja porque não existem medidas de adaptação ou porque as opções atualmente existentes não são suficien-

tes para evitar o risco em questão. De acordo com Noble et al. (2014), na prática, os estudos de adaptação são complexos e combinam elementos de todas as abordagens citadas acima. As empresas que possuem estratégias de adaptação aos riscos decorrentes da mudança do clima são menos impactadas pela mudança das circunstâncias associada a esse fenômeno. Assim, a existência dessas estratégias pode ser fundamental para a manutenção da atividade e competitividade da empresa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

de ANDRADE, C. E. S.; D'AGOSTO, M. A.; JUNIOR, I. C. L.; GUIMARÃES, V. A. CO2 emissions per passenger-kilometer from subway systems: Application in the Rio de Janeiro Subway. Institute of Research Engineers and Doctors, USA. ISBN: 978-1-63248-030-9 doi: 10.15224/978-1-63248-030-9-46.

IPCC. Working Group III: Mitigation. 7.3.2.3 Baseline Scenario Concepts. Disponível em < www.ipcc.ch/ipccreports/tar/wg3/index.php?idp=286.

METRÔ DE SÃO PAULO. Relatório de Sustentabilidade 2015. Gestão de Impactos Ambientais na Expansão e Operação. Disponível em < www.metro.sp.gov.br/relatoriodesustentabilidade-2015/.

METRÔ DE SÃO PAULO. Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa 2016. Gestão de Impactos Ambientais na Expansão e Operação. Disponível em < www.metro.sp.gov.br

WAY CARBON. Prestação de serviços de consultoria especializada para desenvolver metodologia, planos de ação, ferramental, especificações técnicas e de serviço para promover a redução de emissões de gases de efeito estufa e de contaminantes atmosféricos na etapa de implantação de sistemas de transporte público sobre trilhos na Linha 5 – Lilás da Companhia do Metropolitano de São Paulo. Relatório Final. Produto 1. Maio de 2016. ; Relatório Final. Produto 2a. Junho de 2016; Relatório Final. Produto 2b. Outubro de 2016; Relatório Final. Produto 3. Dezembro de 2016; Relatório Final. Produto 4. Março de 2017.

SINDUSCON. Guia Metodológico para Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa na Construção Civil. 2013. Disponível

em https://issuu.com/sindusconsp/docs/guia_gee_i_pad_e_web