



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS
CATEGORIA 2

FRAMEWORK AUDITÁVEL PARA DESCARBONIZAÇÃO E BENCHMARKING
EM SISTEMAS METROFERROVIÁRIOS

1. INTRODUÇÃO

O transporte metroferroviário de passageiros ocupa posição estratégica nas políticas públicas de mobilidade urbana, desenvolvimento sustentável e transição energética no Brasil. Além de apresentar elevada capacidade de transporte, esse modal contribui significativamente para a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE), da dependência do transporte individual motorizado, dos congestionamentos urbanos, dos acidentes de trânsito e do consumo energético. Apesar desses benefícios, sua avaliação permanece predominantemente baseada na contabilidade financeira tradicional, que privilegia custos operacionais e receitas tarifárias, levando frequentemente à classificação das operadoras, sobretudo as públicas, como estruturalmente deficitárias.

Esse aparente paradoxo decorre da limitação dos modelos convencionais de avaliação econômico-financeira, que mensuram adequadamente custos e receitas, mas



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

não incorporam, de forma sistemática, o valor econômico das externalidades positivas produzidas pelo transporte de alta capacidade. Entre essas externalidades destacam-se a redução das emissões de CO₂ decorrente da substituição modal, a economia de tempo dos usuários, a diminuição dos custos associados à saúde pública, a redução da sinistralidade viária, a melhoria da qualidade do ar e os ganhos sistêmicos relacionados ao aumento da produtividade urbana e à reorganização da mobilidade. A inexistência de uma metodologia padronizada para mensuração, monetização e auditoria desses benefícios gera assimetrias relevantes na avaliação do desempenho operacional, da sustentabilidade e do valor público produzido pelas operadoras metroferroviárias.

Essa lacuna torna-se ainda mais relevante diante da crescente incorporação de critérios ambientais, sociais e de governança (ESG) aos processos de planejamento, financiamento e avaliação de investimentos em infraestrutura. Instituições multilaterais, organismos reguladores e investidores têm ampliado a demanda por indicadores capazes de demonstrar, de forma objetiva e verificável, os benefícios socioambientais associados aos empreendimentos públicos. Nesse contexto, métricas baseadas exclusivamente em resultados financeiros mostram-se insuficientes para representar a efetiva contribuição do transporte metroferroviário para o desenvolvimento sustentável.

No Brasil, esse desafio ganha maior importância com a consolidação do arcabouço regulatório voltado à governança climática e à precificação de carbono. A Lei nº



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA **13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

13.303/2016 reforça os princípios de eficiência, transparência e função social das empresas estatais, enquanto a Lei nº 15.042/2024, que institui o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE), estabelece bases para sistemas de mensuração, relato e verificação (MRV), criando condições para integrar desempenho operacional, gestão ambiental e valor econômico das emissões evitadas.

Nesse cenário, este artigo propõe o Framework Auditável de Mensuração de Externalidades (FAME), aplicado ao transporte metroferroviário brasileiro e estruturado a partir da Taxa de Cobertura Ambiental (TCA) como indicador sintético de desempenho socioambiental. A TCA organiza, padroniza e consolida as externalidades positivas em uma métrica única, permitindo maior comparabilidade entre operadoras, maior transparência institucional e melhor suporte à tomada de decisão por gestores, reguladores e investidores.

Diferentemente dos créditos de carbono, dos mercados de compensação de emissões ou de mecanismos de certificação ambiental, a TCA não constitui um ativo financeiro nem um instrumento de negociação. Sua finalidade é atuar como um indicador de governança e eficiência socioambiental, integrando variáveis ambientais, operacionais, econômicas e sociais em uma estrutura analítica capaz de representar o valor público gerado pela operação metroferroviária. Dessa forma, complementa os indicadores financeiros tradicionais, oferecendo uma visão mais abrangente do desempenho organizacional.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

A proposta metodológica estabelece uma convergência entre três dimensões complementares: (i) a mensuração das emissões de GEE por metodologias internacionalmente reconhecidas, como o GHG Protocol e a ISO 14064; (ii) os sistemas de reporte e governança ESG, voltados à transparência e à prestação de contas; e (iii) os instrumentos regulatórios associados ao SBCE e à evolução do mercado brasileiro de carbono. Essa integração fortalece a rastreabilidade, a comparabilidade, a verificabilidade e a auditabilidade das informações, reduzindo assimetrias informacionais e ampliando a confiabilidade das métricas de desempenho socioambiental.

Assim, o objetivo deste artigo é apresentar uma metodologia auditável, replicável e tecnicamente consistente para a mensuração das externalidades positivas do transporte metroferroviário, permitindo sua integração aos sistemas de governança ESG, ao ambiente regulatório do mercado de carbono e aos processos de avaliação de desempenho institucional. Ao propor um framework estruturado e verificável, busca-se contribuir para uma nova abordagem de avaliação do setor, baseada não apenas no retorno financeiro, mas também na mensuração do valor público gerado, fortalecendo a transparência, a formulação de políticas públicas e a atração de investimentos sustentáveis.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

2. DIAGNÓSTICO

O transporte metroferroviário de passageiros no Brasil desempenha papel estratégico na mobilidade urbana e na descarbonização, mas seu desempenho ainda é avaliado predominantemente por indicadores econômico-financeiros, centrados na relação entre receita tarifária, custos operacionais e equilíbrio contábil. Essa abordagem não contempla, de forma estruturada, as externalidades positivas geradas pelo setor, como a redução de emissões de CO₂, a mitigação de congestionamentos, a economia de tempo dos usuários, a diminuição de acidentes e os benefícios à saúde pública decorrentes da melhoria da qualidade do ar.

O principal desafio, portanto, não é a ausência desses benefícios, mas a inexistência de um arcabouço metodológico padronizado capaz de mensurá-los, compará-los e integrá-los aos sistemas de governança ambiental, aos relatórios ESG e aos mecanismos de precificação de carbono. Como resultado, há um descompasso entre o valor público efetivamente gerado pelo transporte metroferroviário e sua representação nos instrumentos convencionais de avaliação de desempenho.

Essa limitação é agravada pela heterogeneidade metodológica entre operadoras, que adotam diferentes fatores de emissão, bases de cálculo e critérios de monetização, comprometendo a comparabilidade, o benchmarking setorial e a rastreabilidade das informações reportadas. Além disso, a baixa integração entre dados operacionais e



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

indicadores ambientais reduz a rastreabilidade e a auditabilidade das informações, requisitos cada vez mais relevantes para padrões internacionais de sustentabilidade.

O contexto regulatório brasileiro, amplia a demanda por métricas ambientais consistentes, verificáveis e comparáveis. Entretanto, a ausência de um framework que integre inventários de emissões, indicadores operacionais e mecanismos de precificação de carbono ainda limita a inserção do setor nessa nova arquitetura regulatória e restringe sua capacidade de captar valor por meio de instrumentos financeiros sustentáveis. Diante desse cenário, evidencia-se a necessidade de um modelo integrado de mensuração que incorpore as externalidades positivas do transporte metroferroviário em uma estrutura única, rastreável e auditável. Nesse contexto, propõe-se o desenvolvimento do Framework de Mensuração de Externalidades (FAME), fundamentado na Taxa de Cobertura Ambiental (TCA) como indicador sintético de integração entre desempenho operacional, impacto ambiental evitado e governança ESG. O modelo busca alinhar inventários de emissões (GHG Protocol), procedimentos de verificação (ISO 14064) e os requisitos do SBCE, fortalecendo a consistência metodológica, a comparabilidade setorial e a transparência das informações ambientais.

2.1 FRAGMENTAÇÃO METODOLÓGICA, AUSÊNCIA DE PADRONIZAÇÃO MRV E OPORTUNIDADES ESTRUTURANTES PARA O SETOR

O cenário das operadoras metroferroviárias brasileiras caracteriza-se pela heterogeneidade metodológica na mensuração dos impactos ambientais, sociais e



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

econômicos da operação. Cada organização adota critérios próprios para estimar emissões evitadas, eficiência energética, economia de tempo e benefícios socioambientais, comprometendo a comparabilidade dos resultados e a consolidação de uma linguagem técnica comum para avaliação de desempenho. Mais do que uma limitação, esse cenário representa uma oportunidade diante da transição para uma economia de baixo carbono. A expansão dos mercados de carbono, a consolidação dos critérios ESG e a crescente demanda por informações ambientais auditáveis reforçam o potencial do setor como gerador de valor ambiental mensurável.

Nesse contexto, a ausência de sistemas padronizados de *Measurement, Reporting and Verification* (MRV) evidencia a necessidade de um framework capaz de integrar dados operacionais, ambientais e financeiros em uma estrutura consistente, rastreável e auditável. Essa lacuna reduz a comparabilidade entre operadoras, dificulta a auditoria independente e limita a aderência dos relatórios de sustentabilidade às exigências de investidores e órgãos reguladores. O Framework de Mensuração de Externalidades (FAME), fundamentado na Taxa de Cobertura Ambiental (TCA), é proposto como instrumento de convergência metodológica para apoiar a padronização da mensuração, do relato e da verificação de externalidades no setor. Alinhado ao GHG Protocol, à ISO 14064 e aos requisitos do Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE), o modelo fortalece a transparência, a comparabilidade e a governança climática. A adoção de metodologias padronizadas e auditáveis poderá ampliar a inserção das operadoras nos



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

mercados regulado e voluntário de carbono, transformando externalidades positivas em ativos ambientais e fortalecendo a atração de investimentos sustentáveis, a geração de valor econômico e a modernização da governança do setor.

2.2 NECESSIDADE DE ALINHAMENTO METODOLÓGICO, AUDITABILIDADE E CONSOLIDAÇÃO DE VALOR NO CONTEXTO ESG E DO MERCADO DE CARBONO

A incorporação dos critérios ambientais, sociais e de governança (ESG) aos processos de investimento e avaliação institucional elevou as exigências quanto à qualidade, rastreabilidade e verificabilidade das informações ambientais. No setor metroferroviário, essa mudança demanda a transição de relatórios descritivos para sistemas estruturados de mensuração auditável das externalidades e do desempenho ambiental. Nesse contexto, a robustez metodológica torna-se um fator estratégico, pois a demonstração consistente dos benefícios ambientais e sociais do transporte metroferroviário favorece o acesso a financiamentos sustentáveis, à emissão de títulos verdes e aos mercados de carbono. Essa tendência é reforçada pela Lei nº 15.042/2024, que instituiu o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE), fundamentado nos princípios de mensuração, relato e verificação (MRV), ampliando a importância econômica e regulatória da qualidade dos dados ambientais.

Entretanto, a consolidação desse ambiente requer metodologias padronizadas que assegurem comparabilidade entre operadoras, integridade das informações e aderência a padrões internacionais. A ausência desse alinhamento limita a transformação de



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

dados operacionais em informações estratégicas e reduz a eficiência da governança climática. Nesse cenário, o Framework de Mensuração de Externalidades (FAME), fundamentado na Taxa de Cobertura Ambiental (TCA), propõe uma arquitetura metodológica que integra inventários de emissões (GHG Protocol), procedimentos de verificação (ISO 14064) e os requisitos do SBCE. O modelo busca padronizar a mensuração das externalidades, fortalecer a transparência e ampliar a comparabilidade setorial. Além de atender às exigências regulatórias, a adoção de metodologias auditáveis favorece a conversão de externalidades positivas em ativos ambientais, amplia a participação das operadoras nos mercados de carbono, reduz assimetrias informacionais e fortalece a governança ESG. Dessa forma, a qualidade metodológica passa a constituir um vetor estratégico para a geração de valor público, a sustentabilidade financeira e a modernização institucional do transporte metroferroviário brasileiro.

2.3 O TRANSPORTE METROFERROVIÁRIO COMO ATIVO ESTRATÉGICO DE DESCARBONIZAÇÃO E GERAÇÃO DE VALOR PÚBLICO

O transporte metroferroviário de passageiros constitui um dos modais mais eficientes em emissões por passageiro-quilômetro, desempenhando papel estratégico na mobilidade urbana sustentável e nas políticas de descarbonização. Sua relevância ultrapassa a função de prover mobilidade, consolidando-o como infraestrutura essencial para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE), a melhoria da qualidade do ar e a eficiência energética dos sistemas de transporte. Entretanto, a plena



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

valorização desses benefícios depende da existência de metodologias capazes de mensurar e comunicar, de forma padronizada e auditável, as externalidades positivas geradas pela operação. A ausência de estruturas integradas ainda limita sua incorporação aos processos de planejamento, avaliação de desempenho e captação de recursos.

A implementação do Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE), instituído pela Lei nº 15.042/2024, reforça essa necessidade ao atribuir relevância econômica à qualidade e à verificabilidade das informações ambientais. Nesse contexto, a demonstração consistente da redução de emissões e da eficiência operacional torna-se um diferencial para o acesso a financiamentos sustentáveis, instrumentos financeiros verdes e iniciativas alinhadas aos critérios ESG. O Framework de Mensuração de Externalidades (FAME), fundamentado na Taxa de Cobertura Ambiental (TCA), é proposto como instrumento de integração entre desempenho operacional e benefícios socioambientais, promovendo maior comparabilidade, transparência e auditabilidade das informações. Além de fortalecer a governança do setor, o modelo contribui para reconhecer as externalidades positivas como componente do valor público gerado pelas operadoras.

Embora a TCA não constitua um mecanismo de crédito de carbono, sua estrutura metodológica pode apoiar inventários de emissões, sistemas de mensuração, relato e verificação (MRV) e futuras iniciativas vinculadas aos mercados regulado e voluntário de



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

carbono. Dessa forma, o transporte metroferroviário consolida-se como ativo estratégico para a transição climática, integrando descarbonização, governança ESG e geração de valor público em uma abordagem orientada ao desenvolvimento urbano sustentável.

2.4 CONTEXTO REGULATÓRIO DO MERCADO DE CARBONO E SUA INTEGRAÇÃO COM A MOBILIDADE DE BAIXA EMISSÃO

A evolução da regulação climática brasileira, com a promulgação da Lei nº 15.042/2024, instituiu o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE), estabelecendo a base regulatória para a precificação do carbono no país. O sistema reconhece ativos ambientais, como a Cota Brasileira de Emissões (CBE) e o Certificado de Redução ou Remoção Verificada de Emissões (CRVE), destinados ao cumprimento de obrigações regulatórias e à transferência internacional de resultados de mitigação (BRASIL, 2024). A legislação também integra o mercado nacional aos mecanismos previstos no Artigo 6 do Acordo de Paris, permitindo, mediante autorização da Autoridade Nacional Designada, a utilização dos CRVEs tanto no SBCE quanto em operações internacionais dos mecanismos previstos nos Artigos 6.2 e 6.4. Para o setor metroferroviário, esse marco regulatório amplia a relevância econômica das reduções de emissões, ao inserir seus benefícios ambientais em uma estrutura de mercado na qual o carbono passa a constituir um ativo de valor financeiro mensurável.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA **13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

3. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise dos resultados fundamenta-se na consolidação de um framework metodológico para a mensuração estruturada das externalidades do transporte metroferroviário, integrando desempenho operacional, impactos ambientais evitados e critérios de governança ESG em uma estrutura única, auditável e comparável. Assim, os resultados apresentados buscam demonstrar a consistência conceitual e operacional do modelo proposto.

O eixo central da análise é a Taxa de Cobertura Ambiental (TCA), concebida como um indicador sintético que relaciona benefícios socioambientais monetizados aos custos operacionais. A TCA não constitui instrumento de precificação ou comercialização de carbono, mas um indicador destinado à avaliação integrada das externalidades positivas e do valor público gerado pelo setor. A construção do modelo articula três dimensões metodológicas: a mensuração das emissões de gases de efeito estufa, a valoração econômica dos impactos evitados e sua compatibilização com o ambiente regulatório do mercado de carbono. Para isso, adota o GHG Protocol como referência para quantificação das emissões, a ISO 14064 para verificação e rastreabilidade dos dados e o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE), instituído pela Lei nº 15.042/2024, como marco regulatório para futura integração entre desempenho ambiental e instrumentos econômicos.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

A análise também distingue emissões evitadas de créditos de carbono. Enquanto estes constituem ativos ambientais sujeitos a certificação e negociação, a TCA é exclusivamente um indicador de desempenho socioambiental, preservando a integridade metodológica do framework e evitando sua confusão com instrumentos de mercado. Os resultados evidenciam que os benefícios do transporte metroferroviário extrapolam a redução de emissões, abrangendo ganhos de eficiência, mitigação de externalidades urbanas e impactos positivos sobre a saúde e a produtividade. Dessa forma, a integração entre TCA, GHG Protocol, ISO 14064 e SBCE estabelece uma base metodológica robusta para fortalecer a governança climática, a transparência, o financiamento sustentável e a geração de valor público no setor metroferroviário.

3.1 ESTRUTURA METODOLÓGICA DO FRAMEWORK E ARQUITETURA DA TAXA DE COBERTURA AMBIENTAL (TCA)

A análise dos resultados decorre da consolidação de um framework metodológico voltado à mensuração auditável de externalidades no transporte metroferroviário, estruturado sob a denominação de Framework de Mensuração de Externalidades (FAME). Nesse modelo, a Taxa de Cobertura Ambiental (TCA) é concebida como um indicador sintético de integração, cuja função não é substituir inventários de emissões ou mecanismos de mercado de carbono, mas organizar e relacionar, de forma estruturada e comparável, os impactos ambientais evitados pela operação metroferroviária.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

A arquitetura do modelo parte de uma premissa fundamental de separação conceitual entre três dimensões complementares: (i) mensuração de emissões, (ii) valoração de externalidades evitadas e (iii) integração com estruturas de governança e mercado regulado de carbono. Essa separação é essencial para garantir consistência metodológica e evitar sobreposição entre instrumentos contábeis, indicadores gerenciais e ativos ambientais negociáveis.

Nesse contexto, o inventário de emissões segue como base normativa o GHG Protocol, responsável pela quantificação das emissões diretas (Escopo 1), indiretas associadas à energia (Escopo 2) e demais emissões da cadeia de valor (Escopo 3). Os resultados desse inventário não são incorporados diretamente à TCA como saldo financeiro ou crédito ambiental, mas servem como insumo primário para a mensuração das emissões evitadas por substituição modal. A partir dessa base, a TCA é estruturada como a razão entre o Benefício Ambiental Monetizado (BAM) e a Despesa Operacional Total (DOT), conforme expressão geral:

$$\text{TCA} = \text{BAM} / \text{DOT}$$

O BAM (Benefício Ambiental Monetizado) representa a agregação ponderada das externalidades positivas geradas pela operação metroferroviária, incluindo a redução de emissões de CO₂, a economia de tempo social, a mitigação de impactos na saúde pública e os efeitos ambientais indiretos associados à menor utilização do transporte individual motorizado. Importante destacar que a monetização dessas externalidades



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

não configura geração de crédito de carbono, mas sim um exercício de valoração econômica de impacto evitado, com finalidade exclusivamente analítica e comparativa.

Dessa forma, o modelo preserva a integridade conceitual entre TCA e o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE), instituído pela Lei nº 15.042/2024. Enquanto o SBCE regula a emissão e negociação de ativos ambientais (CBEs e CRVEs), a TCA opera como um indicador de desempenho socioambiental, fornecendo base informacional estruturada para apoiar processos de governança, reporte ESG e análises de eficiência pública.

3.2 INTEGRAÇÃO ENTRE GHG PROTOCOL, ISO 14064 E O SISTEMA BRASILEIRO DE COMÉRCIO DE EMISSÕES (SBCE)

A robustez do framework proposto depende diretamente da integração entre padrões internacionais de mensuração de emissões e o arcabouço regulatório nacional emergente. Nesse sentido, o GHG Protocol constitui a base metodológica para quantificação das emissões, enquanto a ISO 14064 estabelece os critérios de verificação independente e auditoria dos inventários de gases de efeito estufa.

Essa dupla estrutura garante que os dados utilizados no modelo possuam rastreabilidade, consistência e comparabilidade, atendendo aos requisitos de transparência exigidos por investidores institucionais e órgãos reguladores. A integração desses padrões com o SBCE permite que o setor metroferroviário se posicione de forma estruturada dentro do ecossistema regulado de carbono, no qual a mensuração de



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

emissões e a verificação independente são condições necessárias para participação no mercado. Entretanto, é fundamental reforçar que a TCA não constitui instrumento de geração ou comercialização de créditos de carbono. Sua função é anterior e estrutural: fornecer uma camada analítica que organiza as externalidades positivas associadas à operação, permitindo que estas sejam interpretadas de forma consistente no contexto de políticas públicas, relatórios ESG e análises de investimento sustentável.

Essa separação conceitual é central para evitar distorções metodológicas e garantir aderência aos princípios de integridade ambiental exigidos por mercados regulados e voluntários. Assim, enquanto o SBCE estabelece regras para emissão e compensação de gases de efeito estufa, a TCA atua como um instrumento de leitura ampliada do desempenho ambiental do sistema de transporte.

3.3 EXTERNALIDADES POSITIVAS E ESTRUTURA DE VALORAÇÃO DO BENEFÍCIO AMBIENTAL MONETIZADO (BAM)

O fator potencial do modelo reside no apoio para construção de subsídios focados ao Benefício Ambiental Monetizado (BAM), que sintetiza o conjunto de externalidades positivas geradas pelo transporte metroferroviário. Essas externalidades são estruturadas em quatro dimensões analíticas principais: (i) redução de emissões de CO₂ por substituição modal, (ii) economia de tempo social, (iii) redução de custos associados à saúde pública e (iv) mitigação de impactos ambientais indiretos.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

A redução de emissões de CO₂ é calculada a partir da diferença entre o cenário real (operação metroferroviária) e o cenário contrafactual (uso de transporte individual motorizado ou modal rodoviário equivalente), utilizando fatores de emissão consistentes com bases reconhecidas internacionalmente. Essa abordagem permite mensurar emissões evitadas sem confundi-las com créditos de carbono, uma vez que estes últimos dependem de regras específicas de adicionalidade e certificação no âmbito do SBCE ou mercados voluntários. A economia de tempo social representa o ganho de produtividade sistêmica decorrente da maior eficiência operacional do modal metroferroviário, sendo monetizada com base em valores médios de tempo econômico regional. Já a redução de impactos na saúde pública é derivada da diminuição da exposição populacional a poluentes atmosféricos, com base em custos evitados de internações e tratamentos associados a doenças respiratórias e cardiovasculares.

Por fim, os impactos ambientais indiretos incluem efeitos relacionados à redução de acidentes de trânsito, menor desgaste de infraestrutura viária e diminuição de externalidades negativas urbanas. A consolidação dessas dimensões em um único indicador monetizado permite a construção de uma métrica comparativa robusta, capaz de refletir o valor público ampliado do transporte metroferroviário.

3.4 POTENCIAL DE APLICAÇÃO DO FRAMEWORK EM GOVERNANÇA ESG E FINANCIAMENTO SUSTENTÁVEL

Os resultados da aplicação conceitual do framework indicam elevado potencial de integração com estruturas contemporâneas de governança ESG e mecanismos de



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

financiamento sustentável. A capacidade de organizar externalidades positivas de forma auditável e comparável cria condições objetivas para aprimorar a qualidade dos relatórios de sustentabilidade e fortalecer a transparência institucional das operadoras metroferroviárias. Nesse contexto, a TCA pode ser incorporada como indicador complementar em relatórios ESG, balanços socioambientais e instrumentos de planejamento estratégico, permitindo maior consistência na comunicação de desempenho ambiental. Além disso, a estrutura metodológica proposta fornece subsídios relevantes para avaliação de elegibilidade em instrumentos financeiros sustentáveis, como green bonds e sustainability-linked bonds. Do ponto de vista regulatório, a existência de um framework estruturado e auditável contribui para o processo de padronização de metodologias no âmbito do marco legal brasileiro de carbono, especialmente no contexto de implementação progressiva do SBCE. Ao estabelecer uma base conceitual comum para mensuração de externalidades, o modelo reduz assimetrias informacionais e fortalece a comparabilidade entre operadoras, elemento essencial para a consolidação de um mercado de carbono eficiente e confiável.

3.5 PLANO DE LOGÍSTICA SUSTENTÁVEL (PLS), MARCO REGULATÓRIO E ESTRUTURA NORMATIVA APLICÁVEL

A consolidação de Planos de Logística Sustentável (PLS) no setor público brasileiro encontra respaldo normativo em um conjunto articulado de instrumentos legais e infralegais que orientam a incorporação de critérios ambientais, sociais e de governança



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

na gestão institucional. Entre os principais marcos, destaca-se a Instrução Normativa nº 10/2012 da então Secretaria de Logística e Tecnologia da Informação do Ministério do Planejamento, que estabeleceu diretrizes iniciais para a elaboração de PLS na administração pública federal, posteriormente reforçadas por normativas de governança e sustentabilidade no âmbito das empresas estatais.

No contexto das operadoras metroferroviárias, a Lei nº 13.303/2016 (Lei das Estatais) constitui o eixo estruturante de governança corporativa, ao estabelecer parâmetros de eficiência, transparência e responsabilidade na gestão de empresas públicas e sociedades de economia mista. Essa base normativa é complementada pelas diretrizes de integridade, sustentabilidade e controle interno, que passam a exigir a incorporação de métricas ambientais verificáveis como parte do processo decisório estratégico. A introdução de um framework auditável como o TCA no escopo do PLS permite que os instrumentos de planejamento logístico deixem de operar exclusivamente sob a ótica de eficiência operacional clássica, passando a incorporar variáveis de desempenho climático, tais como emissões evitadas, intensidade carbônica por passageiro-quilômetro e eficiência energética sistêmica. Essa integração cria uma camada analítica adicional, alinhada às exigências contemporâneas de relatórios ESG e aos mecanismos emergentes do Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE), instituído pela Lei nº 15.042/2024.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Do ponto de vista regulatório, observa-se uma convergência progressiva entre políticas de logística pública, governança climática e instrumentos de mercado de carbono, o que reforça a necessidade de metodologias padronizadas de mensuração e reporte. Nesse sentido, o framework proposto fornece subsídios técnicos relevantes para a futura normatização de indicadores ambientais aplicáveis aos PLS, especialmente no que se refere à rastreabilidade dos dados, auditabilidade independente e comparabilidade interinstitucional. Por fim, a incorporação da TCA como instrumento estruturante do PLS permite que o planejamento logístico das operadoras metroferroviárias seja orientado por uma lógica de valor público ampliado, na qual eficiência operacional, descarbonização e governança ESG deixam de ser dimensões paralelas e passam a constituir um sistema integrado de decisão. Essa convergência fortalece a capacidade institucional das operadoras de se posicionarem como agentes estruturantes da transição para uma economia de baixo carbono, com maior aderência às exigências regulatórias futuras e maior atratividade para mecanismos de financiamento sustentável.

3.6 DEMONSTRAÇÃO DO MODELO, RASTREABILIDADE METODOLÓGICA E ANÁLISE DE RISCOS DO FRAMEWORK TCA

A consolidação do framework de mensuração auditável de externalidades no transporte metroferroviário, estruturado a partir da Taxa de Cobertura Ambiental (TCA), exige não apenas a definição conceitual de seus componentes, mas também a demonstração de sua aplicabilidade operacional e a avaliação sistemática dos riscos



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

associados à sua implementação. Nesse sentido, esta subseção apresenta a lógica de funcionamento do modelo sob uma perspectiva integrada de mensuração, rastreabilidade e governança, bem como uma matriz estruturada de riscos e mecanismos de mitigação. O modelo TCA, enquanto indicador sintético de externalidades positivas, opera a partir da agregação de três vetores fundamentais: emissões evitadas de gases de efeito estufa (CO₂e), benefícios socioeconômicos associados à redução de tempo e externalidades de saúde pública, e ganhos sistêmicos relacionados à eficiência energética e à substituição modal. Esses componentes são integrados em uma estrutura de mensuração baseada em dados operacionais primários, devidamente compatibilizados com metodologias reconhecidas internacionalmente, como o GHG Protocol e os critérios de verificação da ISO 14064. A rastreabilidade do modelo é assegurada por meio da vinculação direta entre dados operacionais (consumo energético, quilometragem rodada, volume de passageiros transportados e matriz energética utilizada) e fatores de emissão padronizados. Essa estrutura permite a auditabilidade integral do processo, reduzindo assimetrias informacionais e fortalecendo a confiabilidade dos relatórios institucionais e ESG. Em termos de governança, o modelo estabelece um fluxo contínuo de mensuração, reporte e verificação (MRV), compatível com as exigências emergentes do Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE), instituído pela Lei nº 15.042/2024. A operacionalização do framework também contempla mecanismos de consistência temporal e espacial dos dados, assegurando que as variações observadas nos indicadores não sejam decorrentes



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

de inconsistências metodológicas, mas sim de alterações reais no desempenho operacional ou ambiental da organização. Esse aspecto é fundamental para a construção de séries históricas confiáveis, que permitam comparabilidade interanual e benchmarking setorial. No contexto da governança corporativa, a adoção do TCA como instrumento de apoio à decisão estratégica implica a incorporação de uma camada adicional de controle interno, voltada à validação cruzada entre dados operacionais, registros contábeis e relatórios ambientais. Essa integração fortalece a aderência do modelo às diretrizes da Lei nº 13.303/2016, especialmente no que se refere à transparência, eficiência e responsabilidade na gestão de empresas estatais.

Entretanto, como qualquer sistema baseado em integração de múltiplas fontes de dados e variáveis estimativas, o framework TCA está sujeito a riscos operacionais, metodológicos e institucionais. A identificação e mitigação desses riscos são condições essenciais para sua viabilidade como instrumento de governança e suporte à decisão. Nesse contexto, apresenta-se a seguir a matriz de riscos associada à implementação do modelo:

Tabela 1 - Matriz de Riscos e Ações Mitigadoras do Framework TCA

Categoria de Risco	Descrição do Risco	Impacto Potencial	Probabilidade	Ação Mitigadora Proposta
Risco de Inconsistência de Dados	Divergências entre bases operacionais (energia, passageiros, manutenção)	Distorção do cálculo da TCA e perda de comparabilidade	Média	Padronização de bases de dados com integração a sistemas corporativos e adoção de protocolo



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Categoria de Risco	Descrição do Risco	Impacto Potencial	Probabilidade	Ação Mitigadora Proposta
				único de dados operacionais
Risco Metodológico	Uso de fatores de emissão não harmonizados ou desatualizados	Sub ou superestimação das emissões evitadas	Média	Adoção obrigatória de fatores IPCC e bases oficiais nacionais, com atualização periódica auditada
Risco de Greenwashing	Uso indevido da TCA como instrumento de reputação sem lastro verificável	Perda de credibilidade institucional e risco regulatório	Baixa a Média	Implementação de auditoria independente obrigatória (ISO 14064 e verificadores acreditados no SBCE)
Risco de Interpretação Regulatória	Divergência entre aplicação do framework e exigências futuras do marco legal climático	Incompatibilidade normativa futura	Média	Alinhamento contínuo com diretrizes do SBCE e participação em consultas públicas regulatórias
Risco de Fragmentação Institucional	Adoção parcial ou não padronizada entre operadoras	Perda de comparabilidade setorial	Alta	Criação de diretrizes unificadas setoriais com apoio de entidades reguladoras e associações do setor
Risco de Dependência de Estimativas	Uso excessivo de proxies para valoração de externalidades sociais	Redução da precisão do indicador	Média	Priorização de dados primários e calibração periódica dos modelos econométricos utilizados

Fonte: Adaptado pelo autor.

A análise da matriz evidencia que os principais riscos associados ao framework não são de natureza estrutural, mas sim de implementação e padronização institucional. Em todos os casos, observa-se que os mecanismos de mitigação estão diretamente



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

vinculados à governança de dados, à auditoria independente e à convergência regulatória com o marco legal do carbono no Brasil.

Dessa forma, o modelo TCA se posiciona como uma arquitetura metodológica resiliente, cuja robustez depende menos de sua formulação teórica e mais da disciplina institucional de sua implementação. A incorporação de práticas de governança de dados, auditoria ambiental e alinhamento regulatório progressivo permite que o framework evolua de um instrumento analítico para um elemento estruturante da política de sustentabilidade corporativa no setor metroferroviário.

Tabela 2 – Estrutura Integrada do Framework de Mensuração Auditável de Externalidades (FAME-TCA)

Dimensão do Framework	Componente Estrutural	Descrição Técnica	Fonte de Dados	Método de Tratamento / Mensuração	Interface com Governança (ESG / SBCE)
1. Base Operacional	Dados de mobilidade metroferroviária	Volume de passageiros, km rodados, frequência e capacidade operacional do sistema	Sistemas operacionais da operadora (bilhetagem, CCO, manutenção)	Consolidação de indicadores operacionais padronizados	Suporte ao “S” (Social) e “E” (Environmental) do ESG
		Quantificação de CO ₂ e gerado direta e indiretamente pela operação	GHG Protocol, consumo energético, matriz elétrica, cadeia de suprimentos	Conversão em tCO ₂ e com fatores IPCC e bases nacionais	Base técnica para integração futura ao SBCE
3. Externalidades Evitadas	Substituição modal	Emissões evitadas pela migração do transporte individual/rodoviário para metroferroviário	Modelos de demanda e estudos de mobilidade urbana	Cálculo diferencial de emissões evitadas por	Indicador-chave de descarbonização setorial



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Dimensão do Framework	Componente Estrutural	Descrição Técnica	Fonte de Dados	Método de Tratamento / Mensuração	Interface com Governança (ESG / SBCE)
				passageiro-quilômetro	
4. Economia de Saúde Pública	Redução de impactos atmosféricos	Redução de doenças respiratórias e custos hospitalares evitados	DATASUS, estudos epidemiológicos regionais	Monetização por custo evitado em saúde pública	Fortalece dimensão social do ESG
5. Economia de Tempo Social	Eficiência de deslocamento urbano	Tempo economizado pelos usuários do sistema	Pesquisas OD, dados de tráfego urbano	Valoração do tempo por renda média regional (IBGE)	Indicador de produtividade urbana e valor público
6. Saving Qualitativo (SQ)	Externalidades ambientais indiretas	Ruído, vibração, resíduos, contaminação evitada e ciclo de vida de ativos	Dados de manutenção, meio ambiente e engenharia	Método de custo de reposição e prevenção (MCRP)	Apoio à governança ambiental e conformidade regulatória
7. Indicador Sintético (TCA)	Taxa de Cobertura Ambiental	Relação entre benefícios ambientais monetizados e custo operacional total	Consolidação dos módulos anteriores	Fórmula agregada auditável e replicável	Indicador de performance ESG e eficiência ambiental
8. Sistema MRV (Measurement, Reporting & Verification)	Rastreabilidade e auditoria	Garantia de consistência, transparência e verificabilidade dos dados	Auditoria independente, ISO 14064, verificadores acreditados	Processo estruturado de validação externa	Redução de risco de greenwashing e aumento de credibilidade institucional
9. Integração Regulatória SBCE	Mercado Brasileiro de Carbono	Compatibilização dos dados com o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões	Lei nº 15.042/2024 e órgão gestor do SBCE	Alinhamento metodológico e padronização de inventários	Base futura para precificação de carbono e ativos ambientais



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Dimensão do Framework	Componente Estrutural	Descrição Técnica	Fonte de Dados	Método de Tratamento / Mensuração	Interface com Governança (ESG / SBCE)
10. Governança ESG e Relatórios Institucionais	Transparência e prestação de contas	Integração do framework aos relatórios de sustentabilidade e gestão	Relatórios GRI, SASB, relatórios corporativos	Consolidação de indicadores auditáveis e comparáveis	Fortalecimento da governança corporativa e atração de capital sustentável

Fonte: Adaptado pelo autor.

A estrutura apresentada evidencia que o Framework de Mensuração Auditável de Externalidades (FAME-TCA) configura-se como uma arquitetura metodológica multinível, concebida para integrar, de forma sistêmica e rastreável, dados operacionais do transporte metroferroviário, métricas ambientais de emissões de gases de efeito estufa e instrumentos contemporâneos de governança corporativa orientados por critérios ESG e por mecanismos regulatórios de precificação de carbono.

Sua lógica de funcionamento ultrapassa a mera agregação de indicadores setoriais, ao estabelecer uma cadeia estruturada de transformação de dados primários operacionais em unidades de valor socioambiental comparáveis, auditáveis e compatíveis com padrões internacionais de mensuração e verificação, especialmente aqueles associados ao GHG Protocol e à ISO 14064. Nesse contexto, o framework não apenas quantifica emissões evitadas e externalidades positivas, mas também organiza essas informações em uma estrutura de governança orientada por evidências, com rastreabilidade plena ao longo de todo o ciclo de mensuração.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA **13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

Adicionalmente, a arquitetura do FAME-TCA viabiliza a convergência entre três dimensões historicamente tratadas de forma dissociada: (i) a contabilidade operacional das empresas metroferroviárias, (ii) os sistemas de reporte ESG e sustentabilidade corporativa, e (iii) os mecanismos emergentes do Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE), instituído pela Lei nº 15.042/2024. Essa convergência reduz assimetrias informacionais, fortalece a comparabilidade setorial e amplia a confiabilidade dos dados utilizados em processos de tomada de decisão pública e privada.

Do ponto de vista da governança climática, o modelo contribui para a transição de uma lógica baseada exclusivamente em indicadores financeiros para uma abordagem orientada por valor público ampliado, na qual a eficiência operacional passa a ser complementada pela mensuração estruturada de impactos ambientais evitados e benefícios sociais indiretos. Dessa forma, o framework se posiciona como um instrumento de suporte à decisão estratégica, com potencial de subsidiar políticas públicas, estratégias de investimento sustentável e mecanismos futuros de precificação de carbono. Por fim, a estrutura integrada evidencia que a principal inovação do modelo não reside apenas na construção de um indicador sintético (TCA), mas na criação de um sistema institucionalizado de mensuração auditável de externalidades, capaz de sustentar práticas de governança mais transparentes, comparáveis e alinhadas às exigências regulatórias e financeiras da economia de baixo carbono.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

3.7 RETORNO SOCIOAMBIENTAL INTEGRADO (RSI) ESPERADO COM A APLICAÇÃO DO FRAMEWORK FAME-TCA

A aplicação do Framework de Mensuração Auditável de Externalidades (FAME-TCA) amplia o escopo tradicional de avaliação de desempenho ao incorporar dimensões ambientais, sociais e sistêmicas na análise da operação metroferroviária. Em consonância com a literatura de finanças sustentáveis e governança ESG (WORLD BANK, 2023; OECD, 2022), propõe-se o Retorno Socioambiental Integrado (RSI) como indicador sintético de valor público.

O RSI é definido como a razão entre o Benefício Socioambiental Monetizado (BSM) e o Custo Operacional Total (COT):

$$\text{RSI} = \text{BSM} / \text{COT}$$

em que o BSM agrega externalidades positivas quantificáveis:

$$\text{BSM} = \text{ECO}_2 + \text{ESP} + \text{ETS} + \text{TCA}_{\text{adj}}$$

O componente ECO_2 refere-se à monetização das emissões evitadas, calculada conforme as diretrizes do GHG Protocol, garantindo consistência e rastreabilidade dos inventários de gases de efeito estufa. A estrutura conceitual é compatível com os mecanismos de precificação de carbono associados ao Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE), instituído pela Lei nº 15.042/2024 (BRASIL, 2024).

Para fins de simulação, considera-se uma operadora metroferroviária hipotética com os seguintes parâmetros anuais: emissões evitadas de 250.000 tCO₂e, preço social do



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

carbono de R\$ 200/tCO₂e, economia em saúde pública de R\$ 120 milhões, economia de tempo social de R\$ 180 milhões, externalidades adicionais via TCA de R\$ 80 milhões e custo operacional total de R\$ 900 milhões.

O componente climático é:

- ECO₂ = R\$ 50 milhões - Assim:
- BSM = R\$ 430 milhões
- RSI = 430 / 900 = 0,477

O resultado indica que as externalidades socioambientais monetizáveis correspondem a aproximadamente 47,7% dos custos operacionais, sem considerar receitas tarifárias ou efeitos macroeconômicos indiretos. Considerando ainda um fator conservador de ampliação sistêmica de 1,7, associado a efeitos de segunda ordem como redução de congestionamentos, valorização imobiliária e ganhos de produtividade urbana (BANISTER, 2008), obtém-se:

- BSM ajustado = R\$ 731 milhões
- RSI ajustado = 731 / 900 = 0,812

Esse resultado sugere que a avaliação exclusivamente contábil subestima o valor público gerado pelo transporte metroferroviário, ao não capturar integralmente seus efeitos socioeconômicos ampliados. Do ponto de vista regulatório, o RSI fortalece a aderência a sistemas de Measurement, Reporting and Verification (MRV) e aos



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

requisitos de governança climática associados ao SBCE. Adicionalmente, contribui para a padronização de métricas ESG (GRI, 2021), reduz assimetrias informacionais e amplia a transparência na avaliação de desempenho setorial. Por fim, a adoção de métricas baseadas em externalidades auditáveis fortalece a estruturação de instrumentos financeiros sustentáveis, como *green bonds* e *sustainability-linked bonds* (WORLD BANK, 2023). Nesse sentido, o RSI não substitui o retorno financeiro tradicional, mas o complementa, integrando desempenho econômico, impacto ambiental e geração de valor público em uma única estrutura analítica.

3.8 INTEGRAÇÃO ENTRE CONTABILIDADE CLIMÁTICA, RISCO REGULATÓRIO E DESEMPENHO ECONÔMICO-FINANCEIRO NO CONTEXTO DO SBCE

A consolidação do Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE), em conjunto com a aplicação da Orientação Técnica OCPC 10 (CVM 223/2024) e do CPC 25, redefine estruturalmente a forma como os resultados econômico-financeiros das entidades são formados, ao internalizar o custo do carbono como elemento recorrente de mensuração contábil e de precificação do risco climático. Nesse contexto, o carbono deixa de ser uma externalidade implícita e passa a integrar diretamente três dimensões centrais da análise de desempenho: resultado operacional, posição patrimonial e custo de capital, consolidando-se como variável econômica explícita no sistema contábil.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Tabela 3 – Reconhecimento contábil das emissões de GEE e dos passivos ambientais

Evento econômico	Reconhecimento contábil	Norma aplicável	Reflexo nas demonstrações
Emissões sujeitas ao SBCE	Passivo ambiental (provisão)	CPC 25	Despesa na DRE e aumento do passivo
Excesso de emissões	Passivo de descarbonização	CPC 25 / OCPC 10	Constituição obrigatória de provisão
Compromissos de neutralidade (Net Zero)	Passivo construtivo ou contingente	CPC 25	Reconhecimento conforme probabilidade da obrigação
Compra de créditos	Ativo ambiental	CPC 16 / CPC 04	Formação de estoques ou intangíveis
Utilização dos créditos	Baixa do ativo e liquidação da obrigação	OCPC 10	Redução do ativo e do passivo
Venda de créditos	Receita operacional	CPC 16	Reconhecimento do resultado
Ajuste correspondente (Art. 6.2)	Redução de ativos de carbono	SBCE + UNFCCC	Ajuste contábil e regulatório

Fonte: adaptado pelo autor.

Sob a ótica do CPC 25, as emissões de gases de efeito estufa passam a gerar obrigação presente quando associadas a requisitos regulatórios de compensação ou a compromissos construtivos de descarbonização, resultando no reconhecimento de passivos ambientais. Em contrapartida, os instrumentos de conformidade climática, como créditos de carbono, CBIOS ou allowances, passam a ser reconhecidos como ativos, classificados como estoques ou intangíveis conforme sua finalidade econômica, em aderência à OCPC 10 (CVM, 2024). Essa dinâmica estabelece uma relação de correspondência contábil entre emissões e mecanismos de mitigação, configurando um modelo de espelhamento climático no balanço patrimonial.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Tabela 4 – Modelo integrado de contabilização do carbono no contexto do SBCE

Etapa	Procedimento	Resultado contábil
Identificação do instrumento	Definição da finalidade econômica	Classificação entre estoque, intangível ou ativo regulatório
Avaliação das emissões	Verificação da obrigação legal ou construtiva	Reconhecimento de provisão ambiental (CPC 25)
Mensuração	Aplicação da norma contábil correspondente (CPC 16, CPC 04 e CPC 25)	Mensuração inicial dos ativos e passivos
Compensação das emissões	Utilização ou aposentadoria dos créditos	Baixa do ativo e liquidação do passivo
Evidenciação	Registro em balanço, DRE e notas explicativas	Transparência dos impactos financeiros, patrimoniais e climáticos

Fonte: adaptado pelo autor.

No resultado do exercício, essa estrutura se materializa por meio do reconhecimento de despesas associadas à provisão de emissões, aquisição de créditos e ajustes de mensuração econômica do carbono, com impactos diretos sobre o EBITDA e o lucro líquido. Adicionalmente, a internalização do carbono como variável contábil influencia a precificação de mercado das empresas, uma vez que o risco regulatório e o custo futuro de conformidade passam a ser incorporados na taxa de desconto utilizada em modelos de valuation. Assim, o carbono afeta diretamente o valor da empresa via WACC, elevando o custo de capital e reconfigurando a avaliação econômico-financeira em setores intensivos em emissões, como o transporte metroferroviário. O ciclo de aplicação pode ser demonstrado conforme a tabela a seguir:



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Tabela 5 – Síntese do Ciclo de Aplicação do Retorno Socioambiental Integrado (RSI)

Etapa	Aplicação	Resultado
1. Mensuração das externalidades socioambientais	Cálculo do Benefício Socioambiental Monetizado (BSM), composto por: emissões evitadas (ECO ₂), economia em saúde pública (ESP), economia de tempo social (ETS) e externalidades adicionais mensuradas pelo FAME-TCA (TCA_adj).	Permite converter benefícios ambientais e sociais em valores monetários auditáveis, tornando-os comparáveis aos indicadores financeiros tradicionais.
2. Cálculo do Retorno Socioambiental Integrado (RSI)	Aplicação da relação $RSI = BSM / COT$, comparando o benefício socioambiental monetizado ao custo operacional total.	Evidencia o valor público gerado pela operação metroferroviária, demonstrando que a análise exclusivamente contábil subestima seus benefícios.
3. Aplicações estratégicas e regulatórias	Integração do RSI aos sistemas de MRV, às exigências do SBCE e às métricas ESG, apoiando decisões de investimento e financiamento sustentável.	Aumenta a transparência, reduz assimetrias informacionais, fortalece a governança climática e favorece a emissão de instrumentos financeiros sustentáveis, como <i>green bonds</i> e <i>sustainability-linked bonds</i> .

Fonte: adaptado pelo autor.

Em síntese, a estrutura proposta organiza a aplicação do Framework FAME-TCA em três etapas. A primeira consiste na mensuração das externalidades socioambientais, por meio do Benefício Socioambiental Monetizado (BSM), que converte benefícios ambientais e sociais em valores monetários auditáveis. A segunda corresponde ao cálculo do Retorno Socioambiental Integrado (RSI), obtido pela relação entre o BSM e o Custo Operacional Total (COT), evidenciando o valor público gerado além dos resultados financeiros tradicionais. Por fim, o RSI é integrado às aplicações estratégicas e regulatórias, alinhando-se aos sistemas MRV, ao SBCE e às métricas ESG, fortalecendo a



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

transparência, a governança climática e o acesso a instrumentos de financiamento sustentável.

3. CONCLUSÕES

O presente estudo consolidou uma proposta metodológica voltada à mensuração auditável de externalidades socioambientais no setor metroferroviário brasileiro, evidenciando a necessidade de evolução dos instrumentos tradicionais de avaliação de desempenho. A análise demonstrou que os modelos contábeis convencionais não são suficientes para capturar integralmente o valor público gerado por sistemas de transporte de alta capacidade. Nesse contexto, o Framework de Mensuração Auditável de Externalidades (FAME-TCA) foi estruturado como uma arquitetura integrada de governança, capaz de organizar dados operacionais, indicadores ambientais e métricas socioeconômicas em uma lógica rastreável e auditável. A Taxa de Cobertura Ambiental (TCA) foi concebida como indicador sintético de desempenho socioambiental, cuja função não é substituir métricas financeiras ou instrumentos de mercado de carbono, mas complementar a leitura de valor público ampliado.

Dessa forma, reforça-se que a TCA não deve ser interpretada como crédito de carbono, nem como instrumento de compensação ambiental, tampouco como ativo financeiro regulado no âmbito do SBCE, instituído pela Lei nº 15.042/2024 (BRASIL, 2024). Sua função central consiste em estruturar externalidades positivas de forma comparável, auditável e tecnicamente verificável, permitindo maior transparência



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

institucional e suporte à decisão estratégica. A literatura de economia dos transportes já reconhece que sistemas de transporte coletivo geram benefícios significativos não capturados pelos modelos tradicionais de custo-benefício. Esses benefícios incluem redução de emissões de gases de efeito estufa, diminuição de congestionamentos urbanos, economia de tempo social e impactos positivos na saúde pública. A ausência de metodologias padronizadas para mensuração dessas externalidades gera assimetrias informacionais relevantes entre operadoras, investidores e órgãos reguladores. Essa assimetria compromete a comparabilidade setorial e reduz a capacidade de formulação de políticas públicas baseadas em evidências. O modelo proposto busca justamente mitigar essa lacuna ao propor uma estrutura de mensuração auditável e replicável. (BANISTER, 2008).

A incorporação do GHG Protocol como base de cálculo de emissões assegura aderência a padrões internacionais reconhecidos de contabilização de gases de efeito estufa (WRI; WBCSD, 2004). A utilização de metodologias consolidadas como o GHG Protocol permite compatibilidade com sistemas de inventário de Escopos 1, 2 e 3, ampliando a robustez técnica do modelo. Adicionalmente, a integração com normas de verificação como a ISO 14064 fortalece a confiabilidade dos dados ambientais reportados (ISO, 2018). No âmbito regulatório, a Lei nº 15.042/2024 introduz o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE), criando um ambiente institucional orientado à mensuração, relato e verificação de emissões. Esse cenário normativo reforça a



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA **13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

necessidade de frameworks capazes de produzir dados consistentes e auditáveis para suporte à regulação climática. Nesse sentido, o modelo atua como instrumento metodológico complementar ao ambiente MRV exigido por mercados regulados de carbono. Importa destacar que o framework não cria créditos de carbono, nem substitui inventários oficiais, mas fornece base analítica estruturada para interpretação de externalidades. A simulação do ROI Qualitativo-Socioambiental (ROI-QS) demonstrou que o valor das externalidades pode ser relevante quando corretamente aplicado. Esse resultado evidencia uma possível submensuração estrutural do valor público gerado pelo transporte metroferroviário. A literatura internacional confirma que análises restritas ao fluxo financeiro tendem a subavaliar sistemas de transporte sustentável de alta capacidade (OECD, 2022).

Quando incorporados efeitos indiretos, como produtividade urbana e valorização imobiliária, o impacto econômico total tende a ser substancialmente maior. Tal mudança de paradigma é compatível com a evolução das práticas de governança ESG, que exigem métricas verificáveis e comparáveis. A adoção de frameworks auditáveis contribui para a redução de riscos associados ao greenwashing, tema amplamente discutido na literatura contemporânea de sustentabilidade corporativa (WORLD BANK, 2023). Além disso, a padronização metodológica proposta pode subsidiar futuras diretrizes regulatórias no setor de transportes. Isso inclui a construção de referenciais técnicos para mensuração de externalidades em políticas públicas de mobilidade



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

urbana. Tal estrutura também favorece a integração com instrumentos financeiros sustentáveis, como green bonds e sustainability-linked bonds. Esses instrumentos exigem métricas claras de desempenho ambiental para garantir credibilidade junto a investidores. A rastreabilidade dos dados também fortalece a transparência institucional e a governança pública. Nesse contexto, a mensuração auditável torna-se elemento central de confiabilidade regulatória.

A integração entre TCA, ESG e SBCE cria um ecossistema analítico coerente para avaliação de desempenho ambiental. Esse ecossistema permite alinhar planejamento estratégico, política pública e financiamento sustentável. Deste modo, a proposta representa uma contribuição metodológica na forma de mensurar valor público no transporte metroferroviário, onde sua principal contribuição reside na capacidade de transformar externalidades dispersas em indicadores estruturados e auditáveis.

Além de sua contribuição aplicada, o FAME-TCA apresenta potencial para ampliar a discussão técnica sobre a mensuração de valor público em infraestruturas de mobilidade sustentável. Ao integrar variáveis ambientais, operacionais e socioeconômicas em uma estrutura auditável, o modelo contribui para superar abordagens fragmentadas tradicionalmente empregadas na avaliação de sistemas de transporte. Essa característica favorece a construção de indicadores mais aderentes à complexidade dos impactos gerados pela mobilidade urbana contemporânea, aproximando a análise de desempenho dos princípios de desenvolvimento sustentável e de criação de valor



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

compartilhado. O modelo constitui uma contribuição metodológica para a mensuração auditável do valor público em sistemas de mobilidade sustentável ao integrar variáveis ambientais, operacionais, contábeis e socioeconômicas em uma estrutura rastreável e compatível com práticas contemporâneas de governança. A metodologia supera abordagens fragmentadas de avaliação de desempenho, permitindo incorporar externalidades positivas e custos climáticos à análise econômico-financeira. No contexto regulatório inaugurado pelo Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE) e pela Orientação Técnica OCPC 10 (CVM 223/2024), o framework contribui para reduzir assimetrias informacionais ao aproximar a contabilidade financeira da contabilidade ambiental e fortalecer a transparência na gestão dos impactos climáticos.

Sob a perspectiva da governança, o modelo oferece suporte técnico à formulação de políticas públicas, à priorização de investimentos e ao monitoramento de metas de sustentabilidade, por meio de indicadores auditáveis e comparáveis. Ao internalizar os efeitos econômicos do carbono e integrar métricas ambientais aos processos de avaliação de desempenho, o FAME-TCA fortalece mecanismos de accountability, amplia a confiabilidade das informações para reguladores e investidores e cria condições favoráveis para a utilização de instrumentos de financiamento sustentável e de planejamento estratégico alinhados à economia de baixo carbono. Como agenda futura, recomenda-se a aplicação empírica do framework em diferentes sistemas metroferroviários brasileiros, de modo a avaliar sua sensibilidade, capacidade de



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA **13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

replicação e aderência a distintos contextos operacionais e regulatórios. Adicionalmente, a integração com plataformas digitais de monitoramento, sistemas de gestão ESG e instrumentos de finanças sustentáveis poderá ampliar sua aplicabilidade. Em síntese, a evolução de modelos como o FAME-TCA representa um avanço na transição de uma avaliação centrada exclusivamente na eficiência econômica para uma abordagem integrada de valor público, na qual desempenho financeiro, benefícios socioambientais e responsabilidade climática passam a constituir dimensões complementares da sustentabilidade da mobilidade urbana.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, Marcelo Cavalcanti. Análise das demonstrações contábeis em IFRS e CPC. São Paulo: Atlas, 2019.

BANISTER, David. The sustainable mobility paradigm. *Transport Policy*, v. 15, n. 2, p. 73–80, 2008.

BRASIL. Lei nº 13.303, de 30 de junho de 2016. Dispõe sobre o estatuto jurídico da empresa pública, da sociedade de economia mista e de suas subsidiárias. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 2016.

BRASIL. Lei nº 15.042, de 2024. Institui o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE) e dispõe sobre a política nacional de precificação de carbono. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 2024.

BRASIL. Lei nº 14.993, de 8 de outubro de 2024. Dispõe sobre a Mobilidade Sustentável de Baixo Carbono. Brasília, DF: Presidência da República, 2024.

CASEIRÃO, João Carlos Gonçalves. Auditoria ambiental: perspectiva contabilístico-financeira. Lisboa: Áreas Editora, 2003.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

COMISSÃO DE VALORES MOBILIÁRIOS (CVM). Resolução CVM nº 223, de 16 de dezembro de 2024. Aprova a OCPC 10 – Créditos de Carbono, Permissões de Emissão e CBIOs. Rio de Janeiro: CVM, 2024.

COMITÊ DE PRONUNCIAMENTOS CONTÁBEIS (CPC). Orientação Técnica OCPC 10: Créditos de Carbono, Permissões de Emissão (allowances) e Créditos de Descarbonização (CBIO). São Paulo: CPC, 2024.

GLOBAL REPORTING INITIATIVE (GRI). GRI Standards: Universal Standards 2021. Amsterdam: GRI, 2021.

IFAC, The International Federation of Accountants. Governance in the public sector: a governing body perspective. International public sector study nº 2001,13.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). ISO 14064-1: Greenhouse gases — Part 1: Specification with guidance at the organization level for quantification and reporting of greenhouse gas emissions and removals. Geneva: ISO, 2018.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Geneva: IPCC, 2006.

MARCUSSI, J. C. (2025). Programa de Capacitação – Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima – Mercados de Carbono do Artigo 6 do Acordo de Paris.

OECD. Green Finance and Investment: Mobilising Finance for Climate Action. Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development, 2022.

WORLD RESOURCES INSTITUTE (WRI); WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT (WBCSD). The Greenhouse Gas Protocol: A Corporate Accounting and Reporting Standard. Washington, DC: WRI, 2004.

WORLD BANK. Carbon Pricing Leadership Report and Global Carbon Pricing Status. Washington, DC: World Bank Group, 2023.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). Nationally Determined Contributions (NDCs). Bonn: UNFCCC, 2023.

UNGARETTI, Marcella; AGUIAR, Luiza. Brasil define setores e avança na implementação de seu mercado regulado de carbono | Brunch com ESG. São Paulo: XP Investimentos, 22 maio 2026.