

DESENVOLVIMENTO DE TECNOLOGIA DE MONITORAMENTO E MEDIÇÃO: EMISSÃO DE CO₂ NO MODAL RODOVIÁRIO

Emilly Santos da Cunha

Graduanda em Engenharia Química. Emillyscunha@outlook.com

Larissa Sthéfanny Mendes de Melo

Graduanda em Engenharia Química. Larimendes2013@gmail.com

João G. Vedovello

Mestre em administração, professor e orientador. Joao.vedovello@facp.com.br

RESUMO

Este artigo destaca a importância de práticas logísticas mais sustentáveis, com ênfase na logística multimodal como uma solução para reduzir a pegada de carbono ao integrar modais com menos emissões, como o ferroviário e o hidroviário, especialmente no Brasil, onde o transporte rodoviário domina mais de 60% das operações de carga. Além disso, aborda o mercado de créditos de carbono como uma ferramenta relevante para a mitigação de impactos ambientais, com iniciativas que facilitam o acesso a esses créditos, enquanto setores como o de energia e aviação investem em tecnologias limpas e reflorestamento, reforçando o papel estratégico do Brasil graças às suas políticas ambientais e ao Decreto nº 5.882/2006. A metodologia do estudo incluiu análises de emissões de CO₂ com base em dados como consumo de combustível e eficiência energética, culminando no desenvolvimento de uma calculadora de CO₂ para comparar modais e combustíveis alternativos, validada por resultados que demonstram a eficácia na redução de emissões ao substituir combustíveis fósseis. O estudo conclui com a necessidade urgente de mudanças no setor logístico nacional para atingir metas climáticas globais, destacando uma ferramenta prática que auxilia as empresas a adotar soluções mais sustentáveis e o avanço na construção de uma economia de baixo carbono, alinhada aos desafios climáticos e ambientais.

PALAVRAS CHAVE: Emissão, Sustentabilidade, Transporte rodoviário, Dióxido de carbono e ISO 14083.

1 – INTRODUÇÃO.

Desde a Revolução Industrial, as emissões de gases de efeito estufa (GEE), especialmente o dióxido de carbono (CO₂), têm aumentado de forma alarmante, impulsionando mudanças climáticas que afetam o nosso planeta. Essa situação é resultado, em grande parte, de atividades humanas, como a queima de combustíveis fósseis para gerar energia, os processos industriais e o transporte. O CO₂ é responsável por mais de 70% das emissões globais de gases de efeito estufa, e o fato de permanecer na atmosfera por mais de cem anos torna sua presença ainda mais preocupante. O acúmulo de CO₂ não só eleva as temperaturas médias do planeta, mas também altera os padrões climáticos, intensificando eventos climáticos extremos e impactando diretamente a biodiversidade, a agricultura e a segurança de nossos recursos hídricos e alimentares.

Para evitar os efeitos mais severos das mudanças climáticas, o Brasil enfrenta um grande desafio: a necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 92% até 2035, seguindo as metas do Acordo de Paris. Essa tarefa exigirá mudanças significativas nas políticas públicas e nas práticas dos setores de transporte, indústria e energia. O transporte, especialmente o rodoviário, é um dos principais responsáveis pelas emissões de CO₂, devido ao uso intenso de combustíveis fósseis, como diesel e gasolina. No Brasil, onde mais de 60% das operações de carga são feitas por estrada, as emissões desse setor representam um grande obstáculo à sustentabilidade.

O predominante uso do transporte rodoviário no Brasil se deve, em grande parte, à vastidão do território e à falta de opções viáveis, como a infraestrutura ferroviária. Essa situação aumenta a pegada de carbono da logística nacional, já que o transporte rodoviário tende a ser mais poluente em comparação com outros modais, como o ferroviário e o hidroviário. Portanto, é fundamental promover iniciativas que visem a eficiência energética e a redução das emissões de CO₂ nesse setor. Uma abordagem que se mostra promissora é a transição para uma logística multimodal, que envolve a integração de diferentes modais de transporte para otimizar a movimentação de cargas e reduzir o consumo de combustíveis fósseis. Pesquisas indicam que, ao optar por modais com menor impacto ambiental, como o transporte ferroviário para longas distâncias, é possível alcançar reduções significativas nas emissões.

Este trabalho visa contribuir para esses esforços ao avaliar as emissões de CO₂ relacionadas ao transporte de carga no Brasil e desenvolver uma metodologia prática e precisa para calcular essas emissões. Baseando-se em diretrizes reconhecidas globalmente, como o GLEC Framework (Global Logistics Emissions Council, em

português, Conselho Global de Emissões Logísticas) e a ISO 14083 (International Organization for Standardization, em português, Organização Internacional para Padronização), a metodologia proposta oferece uma maneira harmonizada de avaliar as emissões ao longo de toda a cadeia de suprimentos multimodal. A quantificação das emissões de CO₂ nos processos logísticos é crucial não apenas para o monitoramento, mas também para identificar oportunidades de melhoria na eficiência energética e no desenvolvimento de soluções inovadoras.

Além disso, ao criar uma ferramenta específica para estimar as emissões de CO₂, este estudo oferece um suporte prático para empresas do setor logístico que desejam tomar decisões embasadas e adotar práticas com menor impacto ambiental. Essa ferramenta permitirá que as empresas comparem a eficiência entre diferentes modais de transporte e alternativas de combustível, servindo como uma base sólida para decisões estratégicas que visem à redução da “pegada de carbono”.

Portanto, ao analisar os processos de transporte e sua contribuição para as emissões de GEE, este estudo pretende não apenas aprofundar a compreensão sobre o impacto ambiental do setor, mas também fornece soluções práticas e viáveis para uma logística mais sustentável no Brasil. Implementar tecnologias que possibilitem o monitoramento e a redução das emissões é um passo essencial para construir um futuro mais responsável e em sintonia com as metas climáticas globais.

2 – REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 – IMPACTO DAS EMISSÕES DE CO₂ NO TRANSPORTE DE CARGAS E SUAS IMPLICAÇÕES NAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

A partir da Revolução Industrial, as atividades humanas, especialmente a queima de combustíveis fósseis, têm contribuído de maneira expressiva para o aumento das emissões de gases de efeito estufa, com destaque para o dióxido de carbono (CO₂). Segundo Branco et al. (2024), o CO₂ é responsável por mais de 70% das emissões totais de gases de efeito estufa, permanecendo na atmosfera por, em média, 100 anos. Esse fenômeno faz do CO₂ um dos principais agentes do aquecimento global e das mudanças climáticas de longo prazo. Nesse sentido, a quantificação e o monitoramento contínuos dessas emissões são essenciais para a compreensão dos impactos ambientais causados por atividades humanas, especialmente as logísticas.

No Brasil, o impacto das emissões de CO₂ no setor de transporte de cargas é um dos maiores desafios na mitigação das mudanças climáticas. O transporte inter-regional de cargas, por exemplo, tem a projeção de emitir 111 milhões de toneladas de CO₂ até 2025, caso não sejam adotadas medidas para sua redução (BRANCO et al.,

2023). A predominância do transporte rodoviário, responsável por cerca de 61% do transporte de cargas no país, agrava essa situação, em grande parte devido ao elevado consumo de diesel e à falta de uma infraestrutura multimodal eficiente. Isso intensifica as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e compromete os esforços do Brasil em cumprir as metas de redução de CO₂ estabelecidas no Acordo de Paris (COP21).

O Acordo de Paris, firmado na 21^a Conferência das Partes (COP21) da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), em dezembro de 2015, busca fortalecer a resposta global às mudanças climáticas e mitigar seus impactos. Com a adesão de 195 países, o tratado visa limitar o aumento da temperatura média global a bem menos de 2°C em relação aos níveis pré-industriais, além de aplicar esforços para restringi-lo a 1,5°C. Para tanto, exige-se a redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE) em consonância com os princípios de desenvolvimento sustentável. A implementação do Acordo baseia-se nas Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs), metas individualizadas definidas por cada nação conforme suas condições econômicas e sociais. No Brasil, o tratado foi aprovado em setembro de 2016, destacando metas ambiciosas, como a redução de emissões em 37% até 2025 e em 43% até 2030, em relação aos níveis de 2005, e iniciativas como o aumento da bioenergia sustentável e o reflorestamento de 12 milhões de hectares (MMA, 2024).

2.2 – ISO 14083 – Emissões de Gases de Efeito Estufa no Transporte

A ISO 14083 (lançada em 2023) e o GLEC Framework exigem que o cálculo das emissões de uma cadeia de transporte cubra o ciclo de vida completo do combustível/energia, estabelece uma metodologia para o cálculo e a comunicação das emissões de gases de efeito estufa (GEE) associada ao transporte de cargas e passageiros. Ela abrange diversos modais de transporte – rodoviário, ferroviário, marítimo e aéreo – e fornece diretrizes para contabilizar emissões diretas, como a queima de combustível, e indiretas, como o uso de energia para suporte operacional.

Essa norma tem como principal objetivo fornecer uma estrutura padronizada para as empresas identificarem, calcularem e reportarem suas emissões de GEE de forma precisa e uniforme, permitindo uma comparação global e promovendo uma logística mais sustentável. Dentre os principais benefícios da ISO 14083, destacam-se:

1. **Precisão e padronização nos relatórios de emissões:** A norma padroniza o cálculo e a comunicação das emissões, permitindo uma avaliação comparável e precisa entre diferentes organizações e setores.

2. Comparação entre modais de transporte: Ao possibilitar a análise das emissões em diversos modais, a norma facilita a seleção de práticas e rotas de transporte mais sustentáveis.
3. Apoio à tomada de decisão: Proporciona informações detalhadas e padronizadas, auxiliando as empresas na implementação de estratégias de redução de emissões e na escolha de práticas de menor impacto ambiental.
4. Cumprimento de compromissos climáticos: A norma auxilia as empresas a se alinharem com legislações ambientais e compromissos internacionais, como o Acordo de Paris, contribuindo para metas globais de descarbonização.

2.3 – QUEIMA DE COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS

A queima de combustíveis fósseis é uma reação química de combustão, na qual o combustível (formado majoritariamente por hidrocarbonetos) reage com o oxigênio atmosférico, produzindo dióxido de carbono (CO₂), água (H₂O) e energia na forma de calor. Trata-se de uma reação exotérmica, pois libera calor ao ambiente, característica comum em processos que envolvem a transformação de energia química em térmica. Além disso, é do tipo oxirredução, já que ocorre transferência de elétrons: o oxigênio é reduzido enquanto os componentes do combustível são oxidados. A equação química da combustão completa da gasolina, constituída principalmente por octano (C₈H₁₈), é representada como: $C_8H_{18} + 12,5O_2 \rightarrow 8CO_2 + 9H_2O + \text{energia}$. Reações incompletas podem ocorrer em condições de oxigênio limitado, gerando produtos como monóxido de carbono (CO) e fuligem (MANUAL DA QUÍMICA, 2023).

2.3.1 – BIOCOMBUSTÍVEIS

Os biocombustíveis são combustíveis obtidos a partir de materiais orgânicos renováveis, como vegetais e resíduos agrícolas. Eles são uma alternativa mais sustentável aos combustíveis fósseis, pois sua combustão emite uma quantidade menor de gases de efeito estufa. Os principais tipos de biocombustíveis incluem o etanol, obtido da fermentação de açúcares presentes em plantas como a cana-de-açúcar e o milho, e o biodiesel, derivado de óleos vegetais ou gorduras animais. Quimicamente, essas substâncias possuem hidrocarbonetos que, ao serem queimados, realizam reações de combustão, liberando energia. Além disso, a produção e uso dos biocombustíveis promovem o ciclo de carbono renovável, já que o CO₂ emitido durante sua combustão pode ser reabsorvido pelas plantas utilizadas como matéria-prima durante a fotossíntese, tornando-os uma opção mais ecológica em comparação aos combustíveis fósseis.

2.4 – LOGÍSTICA MULTIMODAL E PEGADA DE CARBONO

A logística multimodal configura-se como um sistema integrado que emprega diferentes modais de transporte, visando otimizar a movimentação de cargas na cadeia de suprimentos. Esta abordagem é fundamental para promover a eficiência operacional e a redução da pegada de carbono. A escolha do meio de transporte mais energético e sustentável é um dos principais benefícios proporcionados pela logística multimodal. De acordo com Branco et al. (2024), os modais ferroviário e hidroviário se destacam pela sua capacidade de apresentar baixas emissões de CO₂, sendo o transporte ferroviário capaz de mover grandes volumes de carga com um consumo reduzido de combustível, enquanto o transporte hidroviário se mostra eficiente em longas distâncias.

A pegada de carbono é uma medida que avalia o total de gases de efeito estufa emitidos, direta ou indiretamente, por atividades humanas, produtos ou serviços. Esse cálculo é apresentado em termos de dióxido de carbono equivalente (CO_{2e}), permitindo comparar diferentes fontes de emissão. Considera-se etapas como produção, transporte, consumo e descarte, analisando o ciclo de vida de um produto ou serviço. Além de promover a conscientização ambiental, a pegada de carbono é uma ferramenta essencial para identificar e reduzir impactos no meio ambiente, além de apoiar iniciativas de compensação, como plantio de árvores e créditos de carbono. Medir e gerenciar essa pegada é um passo relevante no combate às mudanças climáticas e no cumprimento de compromissos internacionais, como o Acordo de Paris (PLANETA CAMPO, 2023).

A integração dos modais permite que as empresas selecionem a opção mais adequada com base nas especificidades da carga, na distância a ser percorrida e na infraestrutura disponível. Contudo, o crescente reconhecimento da importância da sustentabilidade e da redução das emissões de carbono tem impulsionado políticas públicas e iniciativas do setor privado que buscam melhorar a eficiência dos sistemas de transporte. Assim, a logística multimodal se apresenta como uma ferramenta poderosa na luta contra as mudanças climáticas, contribuindo para a redução da pegada de carbono e para a criação de cadeias de suprimentos mais resilientes e competitivas.

2.5 – MERCADO DE CARBONO

O mercado de créditos de carbono surgiu com o Protocolo de Kyoto (1997) como uma ferramenta para compensar emissões de gases de efeito estufa, especialmente o CO₂, com cada crédito representando uma tonelada de carbono que deixou de ser emitida. (SEMIL, 2024).

Empresas como a Ambipar têm democratizado o acesso a esse mercado, permitindo que pessoas físicas compensem suas emissões via aplicativos, criando uma cultura de responsabilidade ambiental individual (FORBES, 2023). Além disso, grandes

corporações, especialmente dos setores de aviação e energia, têm adotado estratégias de compensação, investindo em tecnologias limpas, reflorestamento e energias renováveis, de modo a alinhar suas operações às metas climáticas globais (CNN BRASIL, 2024).

No contexto brasileiro, a preservação ambiental, associada a uma regulamentação eficiente, como o Decreto nº 5.882/2006, posiciona o país como um importante ator no mercado de carbono. O uso de tecnologias e soluções inovadoras, como o aplicativo da Ambipar, não apenas facilita a compensação das emissões, mas também integra a população nas soluções para mitigar os efeitos das mudanças climáticas (FORBES, 2023).

Assim, o mercado de carbono se apresenta como uma ferramenta relevante para reduzir as emissões globais, contribuindo para o cumprimento das metas estabelecidas no Acordo de Paris (COP21) e promovendo a sustentabilidade tanto para empresas quanto para indivíduos (CNN BRASIL, 2024).

3 – METODOLOGIA

A metodologia deste estudo segue uma abordagem mista, combinando técnicas quantitativas e qualitativas, para desenvolver uma ferramenta de monitoramento das emissões de CO₂ no transporte rodoviário, fundamentada no GLEC Framework. Conforme Gil (2008), essa escolha metodológica visa integrar a análise objetiva de dados com a compreensão das percepções dos usuários e gestores sobre o uso de combustíveis alternativos e práticas sustentáveis. Essa abordagem possibilita uma visão mais completa e detalhada do impacto ambiental das operações logísticas, abrangendo tanto os aspectos numéricos quanto as sutilezas do comportamento humano e organizacional.

Os dados quantitativos foram coletados a partir de relatórios internos que monitoram o consumo de combustível, distâncias percorridas e eficiência energética dos modais rodoviários. Seguindo a padronização proposta pelo GLEC Framework, esses dados foram utilizados para calcular as emissões de CO₂, garantindo a comparabilidade internacional e o alinhamento com as melhores práticas globais de sustentabilidade (LAKATOS E MARCONI, 2017). Essa metodologia também contempla variáveis importantes, como o tipo de combustível utilizado, o peso da carga e a eficiência do modal de transporte.

A análise dos indicadores, como o consumo de combustível em operações de mineração e as emissões de CO₂ por tonelada de carga transportada, permitiu identificar pontos críticos nas operações logísticas. A partir desses dados, foi possível desenvolver estratégias mais eficazes para reduzir as emissões, tais como a substituição gradual de

combustíveis fósseis por alternativas mais limpas, como o GNV e o biometano, além de otimizar rotas e realizar manutenções preventivas para melhorar a eficiência energética (LAKATOS E MARCONI, 2017).

Com base nas informações coletadas, foi desenvolvida uma calculadora de emissões de CO₂, destinada a estimar de forma precisa as emissões geradas por diferentes modais rodoviários. A ferramenta permite considerar uma série de variáveis, incluindo a introdução de combustíveis alternativos, como o GNV (Gás Natural Veicular) e o biometano, fornecendo às empresas uma visão clara do impacto ambiental em diferentes cenários operacionais. Conforme Bardin (2016), essa abordagem facilita a tomada de decisões mais conscientes e sustentáveis.

A ferramenta foi validada por meio de uma comparação rigorosa entre os resultados obtidos antes e após sua implementação. Para ilustrar as variações nas emissões de CO₂ ao longo do tempo, foram utilizados gráficos e tabelas comparativas, conforme recomendado por Lakatos e Marconi (2017). Esses recursos visuais destacam os ganhos obtidos com a adoção de combustíveis alternativos e práticas mais eficientes. Além disso, a ferramenta é projetada para ser atualizada continuamente com novos dados, garantindo sua eficácia e relevância em um ambiente logístico em constante evolução.

Em suma, a utilização de uma abordagem mista permitiu o desenvolvimento de uma ferramenta robusta para medir e reduzir as emissões de CO₂, ao mesmo tempo em que proporcionou uma compreensão mais abrangente dos desafios e oportunidades de melhoria nas operações logísticas (GIL, 2008; LAKATOS E MARCONI, 2017).

Na Figura 1 as fórmulas apresentadas descrevem o cálculo das emissões de gases de efeito estufa (CO₂) no transporte de cargas. Elas levam em consideração a intensidade de emissões por tonelada transportada e a eficiência do combustível utilizado.

$$\sum_{1}^n (total\ peso\ carga * km * CO2\ e\ fator\ de\ intensidade \left(\frac{kg\ CO2e}{tonelada - km} \right))$$

$$\sum_{1}^n (total\ peso\ carga * km * fator\ de\ eficiencia\ combustivel \left(\frac{kg\ combustivel}{tonelada - km} \right) * fa)$$

Figura 1: Fórmulas para cálculo das emissões de CO₂.

Fonte: GLEC FRAMEWORK

Conforme Figura 1, Km, significa quilômetros e Fa, Fator de emissão. Essa fórmula calcula a emissão total de CO₂ equivalente (CO₂e) considerando o peso da

carga transportada, a distância percorrida e o fator de intensidade de emissões, que varia conforme o combustível e o meio de transporte. Portanto utiliza-se como base o consumo de combustível do veículo, relacionando a eficiência energética do transporte e o fator de emissão do combustível utilizado.

Este estudo utilizou o Qlik Sense, uma ferramenta de Business Intelligence (Em português, inteligência de negócios), para criar dashboards interativos que facilitaram a análise visual dos dados, tornando-a mais precisa e acessível. O Qlik Sense permite integrar diferentes fontes de dados e organizá-las de maneira clara e objetiva, o que simplifica o entendimento e o monitoramento das emissões de CO₂. Além disso, a plataforma possibilitou a criação de visualizações dinâmicas, ajudando na comparação de cenários logísticos e na identificação de oportunidades para reduzir a pegada de carbono. De acordo com Gil (2008), essa abordagem visual, com o uso de dashboards, tem grande importância na análise de dados, pois facilita a interpretação e oferece insights valiosos que contribuem para a tomada de decisões informadas. Dashboards são painéis de controle interativos que reúnem métricas e indicadores-chave em uma forma gráfica e concisa, permitindo o monitoramento em tempo real e a exploração de dados de maneira rápida e eficaz. A utilização de ferramentas como o Qlik Sense torna a análise de grandes volumes de dados mais ágil e eficaz, evidenciando a importância das representações visuais para a compreensão de informações complexas.

4 – RESULTADOS

Neste estudo, uma calculadora de CO₂ foi desenvolvida para estimar a emissão de dióxido de carbono (CO₂) por diferentes modais de transporte, conforme à metodologia do GLEC Framework. A calculadora foi projetada para oferecer estimativas precisas de emissões de CO₂ em toneladas, possibilitando a comparação entre modais quanto à eficiência ambiental. Para isso, foram utilizadas projeções de emissões para combustíveis como biodiesel, GNV e biometano nos modais rodoviários e ferroviário (trem).

A ferramenta utiliza uma série de variáveis essenciais, como:

- Tipo de combustível utilizado (biodiesel, GNV e biometano).
- Distância percorrida em cada trajeto.
- Peso ou volume da carga transportada.
- Eficiência de combustível dos veículos.

Essas informações são processadas por um algoritmo que calcula a emissão total de CO₂ em toneladas por quilômetro para cada tipo de combustível e modal de transporte. O cálculo segue a fórmula de emissão padrão, segundo as diretrizes do GLEC Framework, para assegurar precisão e comparabilidade internacional.

Com base nos resultados, espera-se que a calculadora forneça uma ferramenta de análise para gestores logísticos interessados em reduzir a pegada de carbono de suas operações. Essa ferramenta permitirá uma comparação eficaz entre os diferentes modais, auxiliando na tomada de decisões sustentáveis.

A Figura 2 apresenta uma calculadora, um quadro comparativo de emissões de carbono para diferentes meios de transporte e combustíveis utilizados no transporte de cargas.

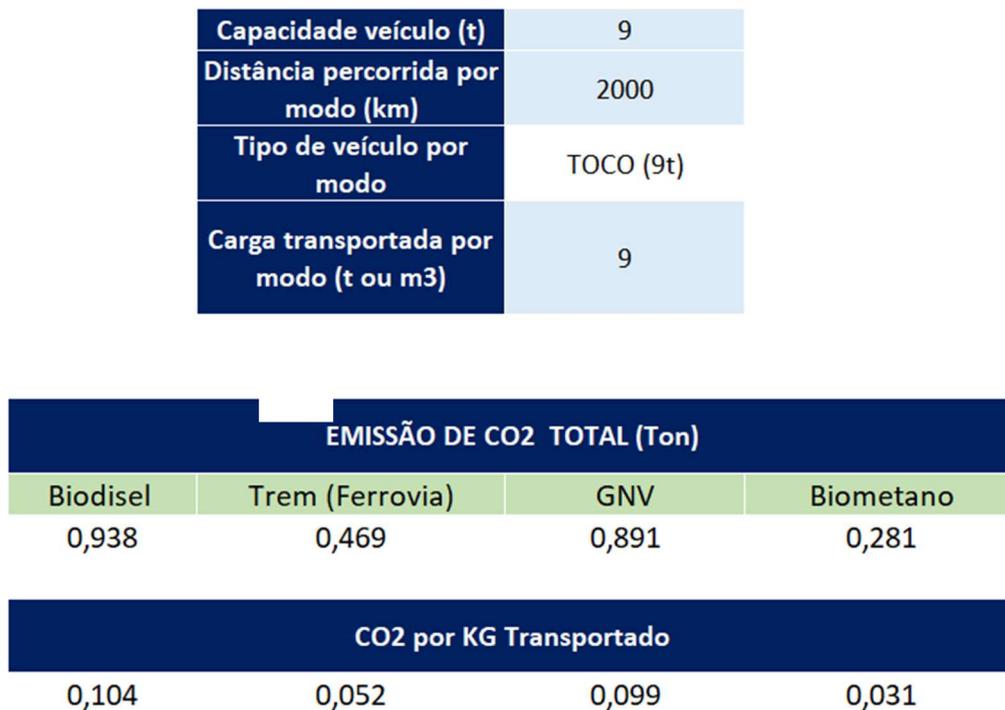


Figura 2: Calculadora de dióxido de carbono (CO₂).

Fonte: Desenvolvido pelos autores

A calculadora apresentada na Figura 2 tem como objetivo estimar resultados relacionados à intensidade de emissões de CO₂, considerando diferentes combustíveis e modos de transporte. A ideia principal é avaliar o impacto ambiental de cada alternativa em termos de emissões totais de dióxido de carbono (CO₂) e emissões específicas por quilograma transportado.

A intensidade de emissões expressa a relação entre a carga transportada e o impacto ambiental gerado (emissões de CO₂). Quanto menor a intensidade, mais eficiente e sustentável é o transporte. A tabela destaca algumas tendências importantes:

- Trem (ferrovia) apresenta a menor intensidade de emissões (0,052 kg), sendo uma solução eficiente.

- Biometano é o combustível rodoviário com a menor intensidade de emissões (0,031 kg), mostrando o potencial das fontes renováveis para reduzir impactos ambientais.
- Biodiesel e GNV, embora apresentem redução em relação a combustíveis fósseis tradicionais, ainda possuem intensidades relativamente maiores, o que pode limitar sua aplicação em estratégias mais rigorosas de sustentabilidade.

Os resultados indicaram que o biometano gerou emissões de CO₂ consideravelmente menores em comparação ao diesel, porém, o transporte ferroviário de modo geral, emite menos CO₂ por tonelada de carga transportada, especialmente em rotas de longa distância, comparado ao transporte rodoviário, portanto é considerado a melhor opção dentre as estudadas.

Para calcular as emissões de gases de efeito estufa no âmbito do GLEC Framework, são necessárias informações específicas, como a distância percorrida, o tipo de transporte utilizado (rodoviário e ferroviário) e o volume ou peso da carga. Além disso, é importante considerar os fatores de emissão para cada tipo de transporte e dados sobre a eficiência do combustível. Informações sobre as operações logísticas, como armazenamento e manuseio, também são relevantes.

Com base no resultados dos calculos apresentados da Figura 2, é possível realizar um comparativo de redução de emissões de CO₂ entre os diferentes modos e combustíveis para transporte de carga (considerando 9 toneladas transportadas por 2.000 km). A análise é feita tanto em termos de emissão total de CO₂ (toneladas) quanto de intensidade (CO₂ por quilograma transportado).

Emissões totais de CO₂ (toneladas) :

- Biodiesel: 0,938 toneladas
- Trem: 0,469 toneladas → Redução de 50% em relação ao biodiesel
- GNV: 0,891 toneladas → Redução de 5% em relação ao biodiesel
- Biometano: 0,281 toneladas → Redução de 70% em relação ao biodiesel

O biometano apresentou a maior redução de emissões (70%), seguido pelo trem (50%). O GNV tem desempenho próximo ao biodiesel, com redução modesta de apenas 5%.

Emissões por quilograma transportado (CO₂/kg):

- Biodiesel: 0,104 kg/kg
- Trem: 0,052 kg/kg → Redução de 50% em relação ao biodiesel
- GNV: 0,099 kg/kg → Redução de 5% em relação ao biodiesel
- Biometano: 0,031 kg/kg → Redução de 70% em relação ao biodiesel

O uso do biometano apresenta a maior redução de emissões de CO₂, sendo a alternativa mais sustentável para o transporte rodoviário. Já o trem é o modo mais

eficiente em termos de transporte de carga, apresenta a menor intensidade de emissões (0,052 kg), sendo uma solução eficiente para longas distâncias e grandes volumes de carga.

Esses resultados evidenciam a importância de priorizar modos e combustíveis com menor impacto ambiental para atender às demandas de sustentabilidade.

Por fim, o método de cálculo empregado e o período de análise (mensal, trimestral ou anual) são essenciais, pois permitem quantificar as emissões totais associadas às operações logísticas, ajudando as empresas a monitorar e reduzir seu impacto ambiental.

Com a ferramenta Qlik Sense, uma plataforma de análise e visualização de dados, que conecta-se a fontes de dados, organiza e modela essas informações, permitiu a criação de dashboards interativos. Foi utilizada uma base de dados fictícia com distâncias reais.

A Figura 3 apresenta as visões gerais do dashboard criado para monitorar as emissões de CO₂ nos modais rodoviários, desenvolvido pelas autoras via Qlik Sense.

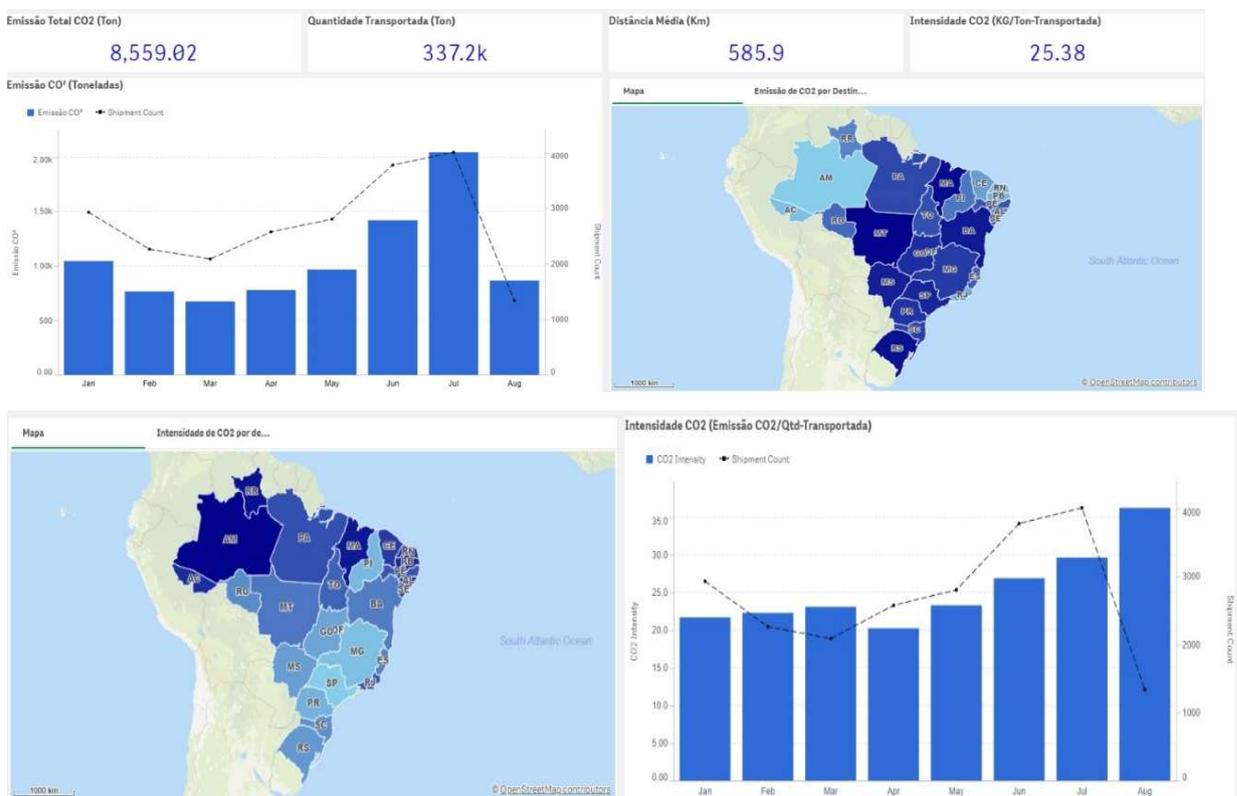


Figura 3: Dashboard emissões de dióxido de carbono (CO₂) e intensidade

Fonte: Desenvolvido pelos autores via Qlik Sense.

A Figura 4 apresenta uma tabela que fornece uma visão detalhada do primeiro mapa que é ilustrado pela emissão por destino.

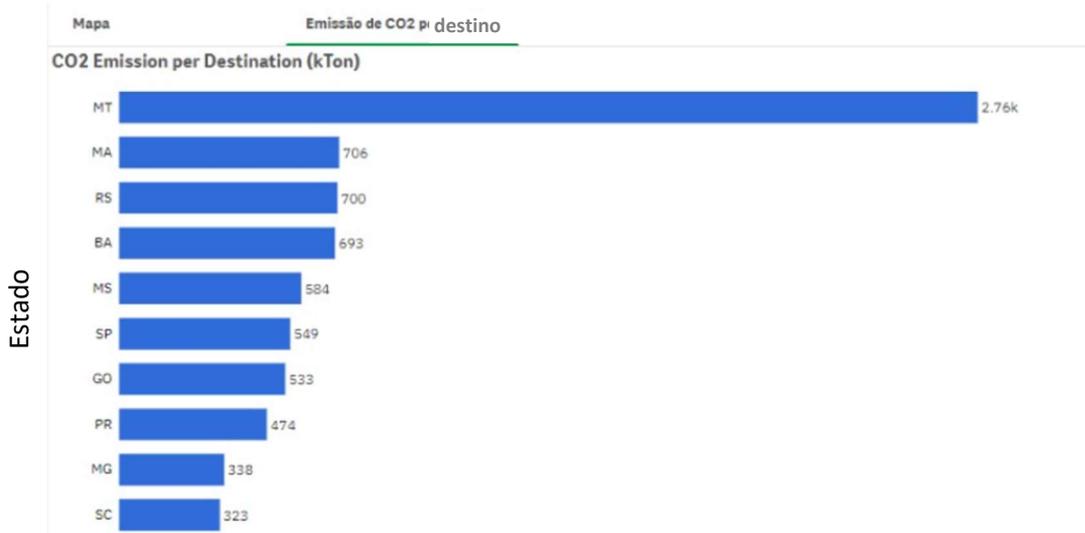


Figura 04: Tabela de emissão

Fonte: Desenvolvido pelos autores

A Figura 5 apresenta uma visão detalhada do segundo mapa que é ilustrado pela intensidade de CO₂ por destino.

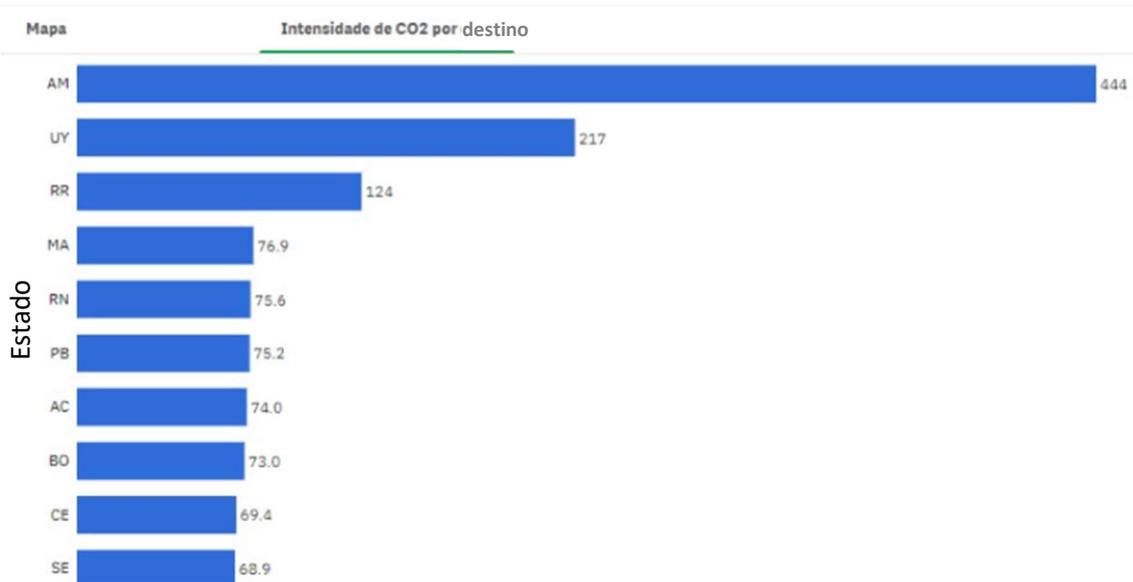


Figura 05: Tabela de intensidade

Fonte: Desenvolvido pelos autores

Foram criadas visualizações para comparação de emissões por modal e destino, um gráfico de barras que compara as emissões totais (em toneladas de CO₂) possibilitando a análise pela distância percorrida. A linha representa a quantidade de

entrega/transferências por período permitindo monitorar as emissões ao longo de períodos mensais, trimestrais ou anuais, identificando variações sazonais.

Os KPI's (Key Performance Indicator, em português, Indicador-chave de desempenho) expressam a dimensão dos volumes correspondendo respectivamente: total de CO₂ gerado, a quantidade transportada, a distância média e a intensidade emitida, todas as representações utilizam como unidade de medida toneladas.

Essas visualizações ajudam a identificar oportunidades de otimização, como rotas que poderiam ser ajustadas para reduzir emissões CO₂ ou períodos de maior consumo, justificando ajustes operacionais.

Os resultados obtidos demonstram o potencial de transformação que a calculadora oferece ao setor logístico. A possibilidade de mensurar, com precisão, o impacto de cada modal e combustível permite que os gestores logísticos:

- Reduzam a pegada de carbono de suas operações por meio de escolhas orientadas por dados.
- Optem por modais de menor emissão em rotas onde o custo ambiental justifique.
- Implementem práticas de manutenção preventiva e otimização de rotas para reduzir o consumo de combustível.

Essas práticas não apenas ajudam as empresas a contribuir para metas climáticas, como as do Acordo de Paris, mas também tornam suas operações mais transparentes, alinhando-se às expectativas de sustentabilidade de investidores e consumidores.

5 – CONCLUSÕES

Este estudo destaca a importância de monitorar continuamente as emissões de CO₂ no transporte terrestre, um setor que representa uma das principais fontes de gases de efeito estufa no Brasil. Diante da crescente demanda por práticas mais sustentáveis, adotar estratégias para reduzir a pegada de carbono é hoje uma necessidade para empresas que buscam se manter competitivas e responsáveis ambientalmente.

Nesse contexto, a transição gradual de combustíveis fósseis para alternativas mais limpas, como o transporte ferroviário e o biometano, apresenta um impacto positivo direto na redução das emissões de CO₂. Essas alternativas, além de oferecerem maior eficiência energética, emitem uma quantidade consideravelmente menor de poluentes, contribuindo para que empresas atendam a metas ambientais globais.

A ferramenta desenvolvida ao longo deste estudo demonstrou ser eficiente para estimar as emissões de CO₂, oferecendo uma visão clara e prática do impacto ambiental das operações logísticas. A possibilidade de calcular emissões por modal de transporte permite que as empresas identifiquem pontos críticos em suas operações e adotem

práticas mais sustentáveis, como a otimização de rotas, o uso de modais mais eficientes e a manutenção preventiva dos veículos. Com a comparação entre diferentes combustíveis e modais, gestores podem tomar decisões mais embasadas e conscientes, incentivando o uso de alternativas menos agressivas ao meio ambiente.

Pensando no futuro, a ferramenta pode ser expandida com novos recursos. Uma possibilidade é a integração de sensores de emissão diretamente nos veículos. Esses sensores, capazes de medir as emissões em tempo real, poderiam transmitir dados automaticamente para a plataforma de monitoramento. Dessa forma, os gestores teriam acesso a informações precisas e atualizadas, sem depender de dados inseridos manualmente. Além de melhorar a precisão, essa tecnologia permitiria que problemas fossem identificados rapidamente. Por exemplo, se um veículo estivesse emitindo CO₂ acima do normal devido a uma falha mecânica, os sensores poderiam alertar a equipe de manutenção para uma intervenção imediata, minimizando o impacto ambiental e melhorando a eficiência energética.

Outro caminho de expansão seria integrar dados externos, como previsões de tráfego, condições climáticas e preços de combustíveis. Com isso, a ferramenta poderia sugerir rotas mais eficientes, prever o consumo de combustível e identificar o momento ideal para manutenção dos veículos, ajudando os gestores a tomarem decisões ainda mais estratégicas e otimizadas. Assim, a ferramenta deixa de ser apenas um recurso de monitoramento e se torna um verdadeiro suporte para uma gestão mais sustentável do transporte.

Além disso, este estudo reforça o potencial dos modais menos poluentes, como o ferroviário, que, por sua eficiência energética, se apresenta como uma alternativa viável para reduzir emissões no transporte de cargas. Integrar diferentes modais – combinando o transporte rodoviário com o ferroviário, por exemplo – pode contribuir de forma substancial para a redução da pegada de carbono, especialmente em um país de grandes dimensões como o Brasil. A escolha do modal mais adequado, conforme sua eficiência em termos de emissões, é uma estratégia crucial para mitigar o impacto ambiental das atividades logísticas.

Para que o Brasil atinja suas metas climáticas, como aquelas previstas no Acordo de Paris, é necessário um esforço contínuo para desenvolver soluções inovadoras, como a ferramenta proposta neste estudo. Essas iniciativas devem ser apoiadas por políticas públicas que incentivem a transição para uma matriz energética mais limpa e a adoção de práticas logísticas sustentáveis. É fundamental contar com incentivos fiscais para o uso de combustíveis alternativos, modernização da infraestrutura logística e regulamentações claras que estimulem a sustentabilidade no setor de transporte.

Em resumo, avançar para uma logística mais sustentável exige não apenas novas tecnologias, mas também uma transformação estrutural que assegure a viabilidade e competitividade das soluções propostas. A colaboração entre o setor público e o privado será essencial para construir um ambiente que favoreça a redução das emissões de CO₂, contribuindo, assim, para um futuro mais responsável e sustentável.

6 – REFERÊNCIAS

BRANCO, José Eduardo Holler; BONATO, Daniela Bacchi Bartolomeu; ALVES JÚNIOR, Paulo Nocera; CAIXETA FILHO, José Vicente. **Ações e políticas para redução da emissão de CO₂ no transporte de cargas do Brasil.** <https://doi.org/10.58922/transportes.v31i2.2415>. Acesso em: 15 de setembro de 2024.

BRASIL ESCOLA. **Biocombustíveis.** Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/geografia/biocombustiveis.htm>. Acesso em: 7 dez. 2024.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. *Acordo de Paris.* Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris.html>. Acesso em: 7 dez. 2024.

CNN Brasil. ACADEMIA IN1. **Qlik Sense: o que é, como funciona e quais as vantagens.** Disponível em: <https://blog.academiain1.com.br/qlik-sense-o-que-e-como-funciona-e-quais-avantages/#:~:text=O%20que%20%C3%A9%20o%20Qlik%20Sense%3F%20O%20Qlik,instant%C3%A2neo%2C%20entregando%20conhecimento%20acerca%20das%20Oportunidades%20de%20neg%C3%B3cio>. Acesso em: 25 out. 2024.

FORBES. **Ambipar lança app para compra de créditos de carbono por pessoa física.** Disponível em: <https://www.google.com/amp/s/forbes.com.br/brand-voice/2022/01/ambipar-lanca-app-para-compra-de-creditos-de-carbono-por-pessoa-fisica/%3famp>. Acesso em: 26 set. 2024.

G1. **Empresas e governos estrangeiros vão comprar quase R\$ 1 bilhão em créditos de carbono na Amazônia brasileira.** Disponível em: <https://www.google.com/amp/s/g1.globo.com/google/amp/jornal-nacional/noticia/2024/09/24/empresas-e-governos-estrangeiros-va-comprar-quase-r-1-bilhao-em-creditos-de-carbono-na-amazonia-brasileira.ghtml>. Acesso em: 26 set. 2024.

G1. **O Brasil precisa reduzir em 92% as emissões de gases de efeito estufa até 2035, diz Observatório do Clima.** <https://g1.globo.com/meio-ambiente/noticia/2024/08/26/brasil-precisa-reduzir-em-92percent-emissoes-de-gases-de-efeito-estufa-ate-2035-diz-observatorio>. Acesso em: 15 de setembro de 2024.

MANUAL DA QUÍMICA. *Combustíveis fósseis e combustão.* Disponível em: <https://www.manualdaquimica.com/combustiveis/combustiveis-fosseis.htm>. Acesso em: 7 dez. 2024.

Mercado de carbono: conheça empresas que pretendem compensar suas emissões. Disponível em:

<https://www.cnnbrasil.com.br/economia/macroeconomia/mercado-de-carbono-conheca-empresas-que-pretendem-compensar-suas-emissoes/>. Acesso em: 26 set. 2024.

PLANETA CAMPO. **Pegada de carbono: o que é e como medir os impactos.** Disponível em: <https://planetacampo.canalrural.com.br/carbono-zero/pegada-de-carbono-o-que-e-como-medir-impactos/>. Acesso em: 7 dez. 2024.

SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Crédito de carbono e mudanças climáticas: o que você tem a ver com isso.** Disponível em: <https://semil.sp.gov.br/educacaoambiental/2024/07/credito-de-carbono-e-mudancas-climaticas-o-que-voce-tem-a-ver-com-isso/>. Acesso em: 26 set. 2024.

SMART FREIGHT CENTER. **Nova norma ISO 14083: uma metodologia reconhecida globalmente para calcular emissões de GEE.** <https://www.inteligente.org/pt/sobre-sfc/noticias/não-eu-140-padrão-a-glob-recomendo-metodologia-para-calculo-gh-e>. Acesso em: 25 out. 2024.

SMART FREIGHT CENTRE. **Conselho Global de Emissões de Logística Estrutura para Contabilidade e Relatórios de Emissões de Logística.** <http://www.smartfreightcentre.org/glec>. Acesso em: 22 de maio de 2024.

SMART FREIGHT CENTRE. **Conselho Global de Emissões de Logística Estrutura para Contabilidade e Relatórios de Emissões de Logística.** Disponível em: <http://www.smartfreightcentre.org/glec>. Acesso em: 22 maio 2024.

SMART FREIGHT CENTRE. **GLEC Framework: calculate & report.** Disponível em: <https://smartfreightcentre.org/en/our-programs/global-logistics-emissions-council/calculate-report-glec-framework/>. Acesso em: 25 out. 2024.

WWF BRASIL. **Mudanças Climáticas.** https://www.wwf.org.br/natureza_brasileira/reducao_de_impactos2/clima/mudancas_climaticas. Acesso em: 15 de setembro de 2024.