

APLICAÇÃO DE MODELAGEM E SIMULAÇÃO PARA CÁLCULO DE PEGADA DE CARBONO E PROJEÇÃO DE CARBONO EVITADO EM TRANSPORTE PÚBLICO

Juliano Eduardo da Silva – jjuliano.essilva@gmail.com
Edson de Oliveira Pamplona – pamplona@unifei.edu.br
Giancarlo Aquila – giancarlo.aquila@yahoo.com

Palavras-chave: Carbono Evitado, Mercado de Carbono, Pegada de Carbono, Transporte Público, Métricas de Sustentabilidade.

1. INTRODUÇÃO

O aquecimento global é uma pauta climática preocupante que tem sido amplamente discutida nas últimas décadas, sendo questão abordada em amplitude mundial desde a Conferência de Estocolmo ocorrida em 16 de junho de 1972, na Suécia, e em associação reverberando em estudos científicos desenvolvidos pela comunidade acadêmica, onde em 1988, observa-se um marco, com a formação do IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), que foi criado com o objetivo de avaliar e sintetizar as informações científicas relacionadas às mudanças climáticas.

O uso de créditos de carbono como uma forma de apoiar os esforços de mitigação, foi aprovado na COP21 em Paris, em 2015. No entanto, as regras e diretrizes para a utilização de créditos de carbono no âmbito do acordo de Paris estão sendo desenvolvidas através de tratados e legislações específicas, inerentes a cada região ou país.

Com a promulgação da Lei nº 15.042/2024, que institui o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE), o Brasil deu um passo decisivo rumo à consolidação de um mercado regulado de carbono. Essa legislação estabelece diretrizes para a quantificação, registro e negociação de créditos de carbono, criando um ambiente normativo que exige, cada vez mais, rigor técnico na mensuração de emissões evitadas e removidas.

Observou-se, nesse contexto, após análise dos metadados bibliográficos e amparando-se também nas leis que regulamentam o mercado de carbono no país e no exterior, elencada, dessa forma como o problema principal deste estudo, a real necessidade do desenvolvimento de agendas e práticas ambientais atreladas a legislações vigentes, que contribuam para a redução da dificuldade na padronização de métricas de sustentabilidade robustas, transparentes e auditáveis, capazes de dar suporte ao cálculo preciso da geração de créditos de carbono por carbono evitado, como forma de contribuir com a diminuição do aquecimento global.

Nesse contexto o objetivo geral desta pesquisa, será o desenvolvimento de um modelo de simulação utilizando-se do FlexSim, baseado em linhas de ônibus de transporte público da cidade de Volta Redonda/RJ, visando a elaboração de uma métrica de sustentabilidade aplicada no contexto da mobilidade urbana de baixo carbono, apoiando o processo de identificação de uma nova ferramenta que contribua para a redução de emissões de GEE (Gases do efeito Estufa).

A pesquisa se justifica, ao tratar de um tema relevante, pois ao abordar temas relacionados com o aquecimento global e sustentabilidade, obterá impacto significativo na sociedade, contribuindo para a proliferação de práticas e políticas que melhorem a qualidade de vida e o bem-estar das comunidades e seus indivíduos.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Referencial teórico

No âmbito das ações para mitigar os efeitos bem como o aumento do aquecimento global destaca-se o mercado de carbono (*Carbon Market*), Osborne e Garza (2018), Demirci e Ozturk (2015), Torres e Ferman (2016), criado na COP3, realizada no Japão em 1997, onde foi assinado o Protocolo de Kyoto, uma estrutura econômica e financeira na qual as emissões de gases de efeito estufa são compradas, vendidas e negociadas como *commodities*, denominados créditos de carbono, Velvizhi *et al.* (2023), Gosh *et al.* (2022), Low e Lin (2015), que podem quantificados pela remoção direta de carbono, que envolvem a captura e o sequestro do CO₂ já

presente na atmosfera ou associado a ações que impedem a ocorrência de emissões futuras.

Os créditos de carbono, Velvizhi *et al.* (2023)**Erro! Fonte de referência não encontrada.**, Gosh *et al.* (2022)**Erro! Fonte de referência não encontrada.**, Low e Lin (2015)**Erro! Fonte de referência não encontrada.**, também conhecidos como créditos de carbono ou unidades de redução de emissões, são instrumentos financeiros e ambientais criados como parte de esforços para combater as mudanças climáticas e reduzir as emissões de gases de efeito estufa.

O mercado de compensação de créditos de carbono, apresenta amplo crescimento nos últimos anos Osborne e Garza (2018)**Erro! Fonte de referência não encontrada.**, Gosh *et al.* (2022)**Erro! Fonte de referência não encontrada.**, Velvizhi *et al.* (2023)**Erro! Fonte de referência não encontrada.**. Desde sua aprovação na COP21**Erro! Fonte de referência não encontrada.**, quando inicialmente foram discutidas diretrizes para a compensação a nível governamental, ações e legislações específicas vem sendo criadas para que a compensação de carbono se torne aplicável e atrativa no âmbito das organizações, seja através do incentivo para o desenvolvimento de fontes de energias renováveis, bem como o incentivo a compra de créditos de carbono para compensação de atividades cuja emissão de CO² ultrapasse os limites permitidos.

O conceito de carbono evitado (*carbon avoided*) refere-se à quantidade estimada de emissões de gases de efeito estufa (GEE), principalmente dióxido de carbono (CO₂), que deixa de ser lançada na atmosfera em virtude da adoção de alternativas menos emissoras em comparação a um cenário de referência. Grisales e Caracuel (2021), Park e Jang (2021).

Diferentemente dos créditos gerados por remoção direta de carbono — que envolvem a captura e o sequestro do CO₂ já presente na atmosfera — o carbono evitado está associado a ações que impedem a ocorrência de emissões futuras, sendo amplamente aplicado em projetos de eficiência energética, mudança de matriz energética e substituição modal no transporte. Dremptic *et al.* (2020).

2.2 Metodologia

Como procedimento técnico, para desenvolvimento deste estudo será utilizada a modelagem e simulação. A modelagem pode ser definida como o processo sistemático de representação de um sistema real ou conceitual por meio de abstrações, geralmente expressas em forma matemática, lógica ou computacional, com o objetivo de compreender seu funcionamento, analisar comportamentos e prever resultados sob diferentes condições. Essa representação busca capturar as principais características e interações dos elementos do sistema, permitindo a formulação de hipóteses e a avaliação de cenários. Bertrand e Frasoo, *et. al* (2002), Oreskes (2003).

A simulação, por sua vez, consiste na execução prática do modelo elaborado, utilizando ferramentas computacionais ou métodos experimentais, a fim de reproduzir o comportamento do sistema em condições controladas. Esse procedimento possibilita testar alternativas, avaliar impactos e compreender dinâmicas complexas sem a necessidade de intervenções diretas no sistema real, o que reduz custos, tempo e riscos operacionais. Bertrand e Frasoo, *et. al* (2002), Barosz *et al.* (2020).

Em conjunto, a modelagem e a simulação constituem uma metodologia robusta para análise e tomada de decisão, permitindo que pesquisadores investiguem fenômenos, validem estratégias e otimizem processos, especialmente em contextos em que a experimentação direta é inviável ou limitada.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O presente estudo se consolidará através da aplicação da simulação como instrumento metodológico para representar a operação de linhas de ônibus urbano em Volta Redonda/RJ, considerando elementos como geração estocástica de passageiros, aleatoriedade de pontos de embarque e desembarque e variação de rotas.

Espera-se que a granularidade permitida pela simulação seja fundamental para que cada elemento do sistema — passageiro e trajeto — sejam tratados como uma entidade discreta e com rastreabilidade, possibilitando a utilização de atributos individuais e o cálculo detalhado das emissões de CO₂.

Além disso, a modelagem permitirá a incorporação de diferentes cenários operacionais, possibilitando a projeção do carbono evitado em função da substituição do transporte individual pelo transporte coletivo, utilizando métricas baseadas em distâncias percorridas.

Ainda sob forma de contribuição científica, o estudo proporcionará através da elaboração e publicação de artigos, ampliar o alcance das descobertas e contribuir para a literatura acadêmica, no âmbito nacional e internacional, colaborando com outros pesquisadores e instituições, alcançando contribuições significativas para a pesquisa e para o avanço da ciência.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considera-se que a capacidade de simular eventos futuros com base em parâmetros validados estatisticamente ressalta uma das principais vantagens da simulação: a possibilidade de prever o comportamento do sistema antes da implementação de mudanças reais, oferecendo suporte técnico e estratégico para tomada de decisão em políticas públicas e gestão ambiental urbana.

Portanto, a utilização da simulação neste estudo não apenas viabilizará a modelagem de um sistema real com alto grau de detalhamento e complexidade, como também fornecerá métricas operacionais confiáveis para o cálculo de emissões e de carbono evitado — elementos cada vez mais exigidos diante da regulamentação nacional do mercado de carbono.

Assim, a incorporação de metodologias padronizadas, validadas por protocolos internacionais como o GHG *Protocol* e integradas a ferramentas de simulação poderá oferecer o suporte técnico necessário para transformar dados operacionais em ativos ambientais mensuráveis, promovendo não apenas conformidade legal, mas também ganho ambiental e econômico.

AGRADECIMENTOS

A CAPES, Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, que através de apoio financeiro, permitiu que neste momento espaço/tempo, eu pudesse conduzir este estudo, com tempo e condição para dedicação a empreitada.

Agradecimento especial à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pelas inúmeras parcerias destinadas ao fomento de pesquisas e ao avanço da ciência.

REFERÊNCIAS

- Barosz, P.; Goida, G.; Kampa, A. (2020). **Efficiency Analysis of Manufacturing Line with Industrial Robots and Human Operators**. Applied Sciences, [S.L.], v. 10, n. 8, p. 2862, 21 abr. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/app10082862>.
- Bertrand, M. Fransoo, J.C. Will, J. (2022) - **Modelling and Simulation, Operations management research methodologies using quantitative modeling**. International Journal of Operations & production management. 22(2), 241-264. DOI: <https://doi.org/10.1108/01443570210414338>.
- Demirci, U. Ozturk, A. (2015). **Carbon markets as a financial instrument in the forestry sector in Turkey**. The international forestry review, Vol.17 (2), pp.141. DOI: <https://doi.org/10.1505/146554815815500606>.
- Drempetic, S. Klein, C. Zwergel, B. (2020). **The Influence of Firm Size on the ESG Score: Corporate Sustainability Ratings Under Review**. Journal of Business Ethics. Vol.167, p.333-360. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10551-019-04164-1>.
- Gosh, B. Papatashiou, S. Dar. V. Gravas, K. (2022). **Bubble in Carbon Credits during COVID-19: Financial Instability or Positive Impact (“Minsky” or “Social”)?** Journal of Risk and Financial Management, Vol.15, pp.367. DOI: <https://doi.org/10.3390/jrfm15080367>.
- Gisales, E. D. Caracuel, J. A. (2021). **Environmental, Social and Governance (ESG) Scores and Financial Performance of Multilatinas: Moderating Effects of Geographic International Diversification and Financial Slack**. Journal of Business Ethics. Vol.168, p.315-334. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10551-019-04177-w>.
- Low, K. F. K. & Lin, J. (2015). **Carbon Credits as EU Like It: Property, Immunity, TragiCO2medy?** Journal of Environmental Law. Vol. 27, p. 377-404. DOI: <https://doi.org/10.1093/jel/eqv020>.
- Osborne, T. & Garza, E. S. (2018). **Embedding Carbon Markets: Complicating Commodification of Ecosystem Services in Mexico's Forests**. Annals of the

American Association of Geographers, Vol.108 (1), p.88-105. DOI: <https://doi.org/10.1080/24694452.2017.1343657>.

Oreskes, N. (2003). **The role of quantitative models in science**. In: Canham, C.D., Cole, J.J., Lauenroth, W.K. (Eds.), *Models in Ecosystem Science*. Princeton University Press, Princeton, NJ, p. 13–31 (Chapter 2).

Park, S. R. & Jang, J. Y. (2021). **The Impact of ESG Management on Investment Decision: Institutional Investors' Perceptions of Country-Specific ESG Criteria**. *International Journal of Financial Studies*. Vol.09, pp.48. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijfs9030048>.

Torres, C., & Fermam, R. K. (2016). **Avaliação da competição no mercado de carbono: elaboração e validação de questionário**. *Revista Internacional De Ciências*, Vol. 6(2), p. 199–213. DOI: <https://doi.org/10.12957/ric.2016.23501>.

Velvizhi, G. Nair, R. Goswami, C., Arumugam, S. K., Shetti, N. P., Aminabhavi, P. M. (2023). **Carbon credit reduction: A techno-economic analysis of “drop-in” fuel production**. *Environmental Pollution*. Vol. 316, pp. 120507. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120507>.