ÍNDICE DE SUSTENTABILIDADE DO TRANSPORTE: UMA ANÁLISE MULTICRITÉRIO

TRANSPORT SUSTAINABILITY INDEX: AN APPLICATION MULTICRITERIA ANALYSIS

Rodrigo Rodrigues de Freitas [1,] *, Joyce Azevedo Caetano [2], Cintia Machado de Oliveira[3], Felipe do Carmo Amorim [4] e Marcio Antelio Neves da Silva [4]

[1] Programa de Engenharia de Produção, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca CEFET/RJ, Rio de Janeiro, Brasil

[2] Programa de Engenharia de Transporte COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro 20080-003, Brasil

[3] Departamento de Logística, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca CEFET/RJ, Rio de Janeiro, Brasil

[4] Departamento de Engenharia Mecânica, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca CEFET/RJ, Rio de Janeiro, Brasil

*** Correspondente: rodrigo.freitas@cefet-rj.br**

Resumo: O consumo de combustíveis fósseis, de modo irrestrito, impacta negativamente as dimensões econômicas, sociais e ambientais, preconizadas pela ótica sustentável. Para tanto, faz-se necessário o desenvolvimento e adoção de habilidades que viabilizem o acompanhamento e mitigação dos riscos ao meio. Em vista disso, propomos um método com múltiplas abordagens com ênfase em uma perspectiva tridimensional do consumo energético por motores a diesel, que representam um dos principais emissores de poluentes no transporte. Como metodologia, adotou-se a lógica difusa, em conjunto com um sistema de reconhecimento, a fim de atenuar as incertezas inerentes aos dados aplicados. O procedimento foi aplicado à cidade do Rio de Janeiro, Brasil, com informações coletadas a partir de sete praças de pedágio e um radar com contagem volumétrica. Os resultados indicam boa aderência do índice de sustentabilidade a casos reais, permitindo uma melhor observação das mudanças de critérios ambientais e uma fiscalização mais eficiente na aplicação das boas práticas, além de viabilizar a maior participação da sociedade como um todo.

Palavras-chave: Transporte Sustentável. Índice de Sustentabilidade. Sistema de Reconhecimento. Lógica Fuzzy. Diesel.

Abstract: Unrestricted consumption of fossil fuels negatively impacts the economic, social, and environmental aspects, observed from a sustainable perspective. Therefore, it is necessary to develop and adopt skills that enable the monitoring and mitigation of risks to the environment. Given this, we propose a method with multiple approaches emphasizing a three-dimensional perspective of energy consumption by diesel engines, which represent one of the main pollutants emitters in transport. As a methodology, fuzzy logic was adopted, together with a recognition system, to mitigate the uncertainties inherent to the applied data. The procedure was applied to the city of Rio de Janeiro, Brazil, with information collected from seven toll plazas and radar with volumetric counting. The results indicate good adherence of the sustainability index to real cases, allowing better observation of changes in environmental criteria and a more

efficient inspection in the application of good practices, in addition to enabling greater participation of society in the inspection and adoption of environmental criteria in transport.

Keywords: Sustainable transport. Sustainability index. Recognition system. Fuzzy logic. Diesel.

1. INTRODUÇÃO

O carecimento de serviços urbanos com eficácia e de qualidade procede, dentre os diversos fatores, do crescimento populacional e concentração dos espaços. Na mobilidade urbana, tal incremento reivindica um sistema de transportes que propicie o bem-estar social e a qualidade de vida, o que requer mudanças e inovação entre as partes interessadas (MCKINNON, 2010). Por definição, o transporte representa o deslocamento de pessoas e/ou cargas, de um lugar para outro no espaço, em determinado tempo (BALLOU, 2004; NOVAES, 2004; UELZE, 1978), com uma influência significativa em outras atividades. No entanto, esta dinâmica exige um alto consumo de energia e materiais que afetam as condições do meio. Quanto ao panorama brasileiro, a situação é ainda agravada pela deficiência de políticas públicas de transporte, com uma significativa participação de caminhões para a distribuição de mercadorias e bens, além da motorização individual (MMA, 2011).

De acordo com FERREIRA *et al.* (2018) o consumo anual de combustível energético primário no Brasil equivale a 204 MtCO2e, sendo o transporte de cargas responsável por 50% das emissões de gases do efeito estufa (GEE). Em 2019, o transporte de pessoas representou, aproximadamente, 20% da energia fóssil consumida no país, especialmente em áreas urbanas (IEMA, 2020). Cabe ressaltar que, por apresentarem maior eficiência energética se comparado à gasolina (HOLMEN; NIEMEIER, 2003), o diesel permanece como o combustível mais usado no setor de transporte brasileiro, com uma participação de 49% em 2019, podendo chegar a 51% em 2031 (MME, 2022). Este combustível, porém, é caracterizado por ser um dos principais emissores de dióxido de carbono (CO2), óxido de nitrogênio (NOX) e material particulado (MP), que contribuem diretamente para a degradação ambiental e possuem efeitos nocivos à saúde humana (TUTAK *et al.*, 2015). Os impactos provocados pela poluição atmosférica produzem um desequilíbrio que, dependendo da escala, podem ser irreversíveis (MCKINNON, 2010; WANG *et al.*, 2018).

No aspecto ambiental, a adoção de combustíveis fósseis, de modo irrestrito, propicia mudanças climáticas, queda na qualidade do ar e do solo. Em termos sociais, os danos estão relacionados às doenças respiratórias e cardiovasculares, alergias e mortes prematuras (DAS *et al.*, 2022). Em 2012, as emissões relacionadas ao diesel foram reconhecidas como cancerígenas pela Organização Mundial da Saúde (GENG *et al.*, 2014) Economicamente, os prejuízos podem chegar na ordem de bilhões de dólares por ano, conforme aponta um estudo elaborado por (ESSEN et al., 2018), em parceria com a Aliança Europeia de Saúde Pública (EPHA)ET. Percebe-se então que as regulamentações e o desenvolvimento de habilidades se tornam gradativamente mais necessárias para mitigação e acompanhamento dos riscos ao meio ambiente (FREITAS *et al.*, 2021; WEI; GENG, 2016).

Portanto, a presente pesquisa se concentra em apresentar uma perspectiva tridimensional do aspecto do consumo energético por motores a diesel, com ênfase na lógica *fuzzy* como critério de avaliação. Como variáveis de entrada, considera-se o saldo de veículos, intensidade viajada e consumo de combustível em um estudo aplicado na cidade do Rio de Janeiro, Brasil. O objetivo está pautado na descrição de um sistema de reconhecimento com o uso do resultado triplo, de modo a reduzir as diferenças dos dados governamentais, por ano, combinado a uma análise dos esforços regionais para neutralizar os impactos oriundos das

emissões a diesel. Entende-se que o emprego de múltiplas abordagens permite a redução de incertezas nos resultados e ações mais direcionadas de previsão e controle (LIN *et al.*, 2022).

O restante deste artigo está estruturado conforme segue. A Seção 2 aponta a importância da lógica *fuzzy*, associada aos sistemas de reconhecimento, na criação de índices e métricas de monitoramento, com destaque para alguns estudos na literatura acerca do tema. A Seção 3 descreve o procedimento metodológico proposto. Na Seção 4 são apresentados os resultados e análises. Por fim, a Seção 5 esclarece as conclusões e recomendações para futuras pesquisas.

2. AVALIAÇÃO DE EMISSÕES COM LÓGICA FUZZY

Para ambientes com múltiplas decisões e resultados, os princípios da lógica *fuzzy* apresentam certa vantagem frente a demais sistemas fechados, dado que atuam com o conceito de verdade parcial (ZADEH, 1965). A abordagem difusa se torna pertinente em situações em que não há disponibilidade de um modelo convencional para mensuração ou em casos mais complexos, além de viabilizar a redução de incertezas e subjetividade (GALLAB *et al.*, 2019). No entanto, embora permita tratar da natureza imprecisa de algumas variáveis, seu uso não está limitado somente a estes casos, contemplando também aspectos conhecidos e precisos até certo ponto para tomadas de decisão e desenvolvimento de sistemas inteligentes (CRUZ-RIVERO *et al.*, 2022).

A maior crítica, quando há solicitação qualitativa na tomada de decisão, está relacionada a decisão humana, pois a definição da importância para cada variável de entrada está relacionada ao acúmulo de informações de cada decisor, neste caso, as decisões sofrem influência de fatores comportamentais relacionados à experiência, aos custos, à estratégia etc., de maneira que a lógica *fuzzy* reduz as sobreposições dos indicadores e atributos (FREITAS *et al.*, 2021). Na impossibilidade de classificação de alguns indicadores diante do julgamento humano, mesmo conhecendo as informações necessárias, a lógica *fuzzy* permite conhecer as variáveis linguísticas e as funções de pertinência para a tomada de decisões entre as respostas intermediárias.

Como diferencial, a presente pesquisa apresenta a adoção da lógica *fuzzy* em uma perspectiva tridimensional, em conjunto com o conceito de sistema de reconhecimento, para avaliação dos níveis de poluentes no transporte rodoviário por motores a diesel. Tal proposta permite compreender os impactos provenientes deste combustível bem como o padrão ao longo dos anos, além de propor uma métrica de referência para tomada de decisão, o que auxilia no controle e mitigação dos danos verificados.

3. METODOLOGIA

A proposta da pesquisa é desenvolver um índice de sustentabilidade que emprega dados regionalizados do saldo de veículos nos limites da cidade, intensidade viajada e consumo de diesel. O resultado tem o objetivo de suportar a tomada de decisão por gestores públicos em relação aos principais atributos de emissões de CO2 no transporte rodoviário com enfoque no consumo de diesel. O processo metodológico está dividido em duas abordagens: i) a primeira na caracterização dos dados no saldo de veículos nas fronteiras, intensidade viajada e consumo de diesel através da circulação no espaço e tempo específicos. Esses dados são específicos de cada das cidades, pois os modos e os tipos de transportes possuem características que dificultam a padronização.

3.1. Primeira Abordagem - definição de variáveis de entrada

Essa abordagem foi dividida em três dimensões distintas com dados de fontes diferentes. Esse processo evita erros e violações estatísticas como autocorrelação na formulação dos resultados.

Saldo de veículos

Os dados sobre o saldo de veículos a diesel em circulação nos limites da cidade (SV) no espaço e tempo ($e.t$) são fundamentais para o alcance do resultado, pois o mesmo veículo pode ser contado diversas vezes. Na cidade do Rio de Janeiro foi mapeada a frota de veículos a diesel (FD), o saldo de veículos a diesel que entram (SDE) e saldo de veículos a diesel que saem (SDS) nas principais praças de pedágio e radares nas extremidades da cidade. Isso foi importante para mensurar o saldo de veículos a diesel ajustado ao fluxo (IVA) em circulação dentro da cidade através da taxa do fluxo de veículos a diesel (TxD). O resultado permite saber o quanto de combustível vendido foi consumido de fato dentro da cidade e o movimento pendular de veículos, demonstrados na Eq. 1 e 2. Com isso, observa-se as emissões diretas e indiretas do transporte. Parte das emissões de diesel são destinadas para fins de aquecimento e geração de eletricidade (MOSTAFAEIPOUR *et al.*, 2020).

$$TxD_{e.t} = [(SDS - SDE)/FD] \quad (1)$$

$$SV^A = SV \cdot (1 - TxD) \quad (2)$$

$$SV^A = [(SDS - SDE) \cdot (1 - TxD)] \quad (2.1)$$

Intensidade viajada

A segunda etapa é calcular a intensidade média viajada (IV), em km, pelos veículos a diesel na cidade ajustado de acordo com o fluxo de veículos a diesel (TxD). Os dados de intensidade viajada no transporte rodoviário de passageiros (IVP) e cargas (IVC) são demonstrados na Eq. 3. O resultado foi obtido através do desconto da taxa do fluxo de veículos a diesel em relação a intensidade viajada.

$$IV_{e.t} = (IVP + IVC) \cdot (1 - TxD) \quad (3)$$

Consumo de combustível

A terceira etapa é utilizada para medir o consumo de combustível a diesel em transporte rodoviário. O processo *top-down* pode ser utilizado, contudo, resultados mais precisos, necessariamente, são utilizados a partir de dados *bottom-up*. O consumo de diesel em transporte (CD) é o produto entre o volume total de diesel vendido (DS) descontado da taxa do fluxo de veículos a diesel.

$$CD_{e,t} = DS \cdot (1 - TxD) \quad (4)$$

Os resultados de cada dimensão possuem escalas diferentes, neste caso, normalizamos os dados de maneira comparar o saldo de veículos, intensidade viajada e consumo de

combustível na mesma escala, sempre comparando o momento atual entre os períodos de máxima (pior cenário) e mínima (melhor cenário). O resultado normalizado de cada período das dimensões corresponde às variáveis de entrada (VE) da lógica *fuzzy*, representada na Eq. 5. Os dados de entrada foram definidos no intervalo [1,5], esse processo foi útil para permitir a relação *fuzzy* no universo do discurso de maneira mais simplificada.

$$Norm_{VE} = 1 + \left[\left(\left(\frac{(VE_t - Min_{VE})}{(Max_{VE} - Min_{VE})}\right) \cdot 4\right)\right] \quad (5)$$

3.2. Segunda abordagem - aplicação da lógica fuzzy

O índice de sustentabilidade deve suportar as dimensões mais importantes em transportes, cada uma tem um peso em relação às operações, que neste caso, são tratados de maneira simétrica. A lógica *fuzzy* tradicional possui um custo computacional alto (WU, 2013), o modelo proposto deve ser utilizado nas rodovias limítrofes, logo ao invés de tratar cada indicador como um conjunto independente, optou-se por tratar como conjunto, cada dimensão de sustentabilidade em transporte, formando três variáveis de entrada para o processo de inferência. A tomada de decisão com três indicadores permite reduzir o custo na utilização e facilitar o conhecimento da população e dos gestores (FREITAS et al., 2021).

Método de fuzzificação, inferência e defuzzificação

A avaliação do índice de sustentabilidade em transporte foi conferida em três dimensões. Cada uma possui valores com características regionais que não podem ser padronizadas, contudo, o saldo de veículos, a intensidade viajada e consumo de diesel são as dimensões que apresentaram maior impacto na revisão da literatura, permitindo conhecer os efeitos das emissões de CO2 na atmosfera. O índice de sustentabilidade permite a sociedade acompanhar as mudanças de maneira simplificada. Como o modelo é simétrico, a melhoria de um indicador em detrimento de outro não permite altos ganhos em sustentabilidade.

As variáveis clássicas formadas pelas dimensões d_i são transformadas em conjunto dos termos linguísticos de uma variável linguística ($di \subseteq U$), usando uma função de pertinência μd_i: $U \rightarrow [0,1]$. Portanto, os conjuntos μw_i = 1, 2,..., n em U são obtidos pelos processos de fuzzificação de acordo com a Eq. 6, sendo que $\mu w(d_i)$ representa o grau em que o elemento d_i pertence ao conjunto *fuzzy* $\mu(w)$. A formação em um único termo formado pelo conjunto das perguntas de cada aspecto foi necessária para reduzir o custo de processamento dos dados. $Norm_i = v$ é o resultado de cada dimensão em e.t como variáveis de entrada. As variáveis de entrada do universo do discurso $U_i = (u_1, u_2,...,u_i)$ para obter as variáveis de saída fuzzificadas $W_i = (w_1, w_2,..., w_i)$, definidas no intervalo [0,10], caracterizando a função de pertinência em μ_i: $UxW \rightarrow [0,1]$, conforme a Eq. 6.

$$\mu_{v_i}(u, w) = \vee\, \mu_{u_i}(u, v) \wedge \mu_{w_i}(v, w) \quad (6)$$

O resultado atribui à função de pertinência o objetivo de avaliar o melhor equilíbrio dos termos linguísticos. O termo “emissão baixa” é uma função decrescente (*fd*) como demostrado na Eq. 7, os termos “emissão aceitável”, “emissão moderada” e “emissão alta” são funções triangulares (*ftr*) na Eq. 8, o termo “emissão extrema” é função crescente (*fc*) na Eq. 9. As variáveis de saída *W* são classificadas em cinco gradações: “excelente”, “muito bom”, “bom”, “regular” e “péssimo”. Como a avaliação dos requisitos possuem o mesmo objetivo, o universo do discurso tem o mesmo peso w_i para todas as dimensões. Os blocos de entrada foram

intitulados como estimador de média, logo permite a aplicação de dados como conjunto *fuzzy singletons*.

$$fd(x,a,c) = min\left(1, max\left(0, \left(\frac{c-x}{c-a}\right)\right)\right) \quad (7)$$

$$ftr(x,a,b,c) = min\left(max\left(0, \left(\frac{x-a}{b-a}\right)\right), max\left(0, \left(\frac{c-x}{c-b}\right)\right)\right) \quad (8)$$

$$fc(x,a,c) = min\left(1, max\left(0, \left(\frac{x-a}{c-a}\right)\right)\right) \quad (9)$$

$U_n =$

Emissão baixa (x) = ƒd(u;1;2),	1 se u = 1 0 se u ≠ 1
Emissão aceitável (x) = ƒtr(u;1;2;3),	1 se u = 2 0 se u ≠ 2
Emissão moderada (x) = ƒtr(u;2;3;4),	1 se u = 3 0 se u ≠ 3
Emissão alta (x) = ƒtr(u;3;4;5),	1 se u = 4 0 se u ≠ 4
Emissão extrema (x) = ƒc(u;4;5),	1 se u = 5 0 se u ≠ 5

$W =$

- Excelente = fd(w,1;3)
- Muito bom = ftr(w,1;3;5)
- Bom = ftr(w,3;5;7)
- Regular = ftr(w,5;7;9)
- Péssimo = fc(w,7;9)

As regras de inferência foram distribuídas em quatro blocos (B), seguindo em saldo de veículos, BSV^A; intensidade viajada, BIV; consumo de diesel, BCD. Esse processo compreende as variáveis de entradas. O BR, compreende bloco de resultado derivado do processo de defuzzificação para valor *crisp*. Os três blocos com as declarações condicionais [SE], [É] e [ENTÃO] estruturam as regras de interação para as variáveis linguísticas em cada dimensão. A

média entre as dimensões formam o resultado das variáveis de saída [ENTÃO], classificadas da seguinte forma:

[SE], (< 0,3 = E), [É] Excelente;
[SE] (≥ 0,3 < 0,5 = MB), [É] Muito Bom;
[SE] (≥ 0,5 < 0,7 = B), [É] Bom;
[SE] (≥ 0,7 < 0,9 = R), [É] Regular;
[SE] (≥ 0,9 = P), [É] Péssimo.

No processo de inferência foram realizadas as operações para todas as regras λ_i por meio da Eq. 10, os valores de saída formaram as variáveis *fuzzy* conforme Eq. 11. O conjunto *fuzzy* de saída $\mu_i''(w)$ é a soma de cada resultado $\mu_i''(w)$, pois esse processo ocorre para todas as regras, apresentadas na Eq. 12.

$$\lambda_i = \mu_{SV^a,IV,CD}(u_i) \wedge \mu_{VD,DV,CD}(v_i) \tag{10}$$

$$\mu_i'(w) = min\,[\lambda_i, \mu_i(w)] \tag{11}$$

$$\mu"(w) = max[u_1'w, u_2'w, u_3'w, \ldots u_i'w] \tag{12}$$

O centro de gravidade foi utilizado como método de defuzzificação, (LI, 2006; YUAN *et al*., 2011) mostrou-se ótimo para determinar os pontos médios e racionalizar os erros de distribuição. W^0é o índice de sustentabilidade em transporte, resultado da interação das três dimensões para cada *e.t* analisados na Eq. 13.

$$W_{e.t}^0 = \sum_i \mu"(w_i)w_i \Big/ \sum_i \mu"(w_i) \tag{13}$$

O *Rating R* foi importante para facilitar a aplicação e melhorar a aceitação na avaliação dentre empresas, clientes e governo. A lógica *fuzzy* triangular permite saídas de resultado mais rápidas, ao contrário do trapezoidal, em que ocorre mudanças de maneira mais lenta, justamente pela sua maior amplitude no desenho do conjunto *fuzzy*, menos adequado para modelos com sobreposições. Logo, a Eq. 14 define os valores de cada rating através da diferença da razão do valor máximo W^0 do período analisado em relação ao número de classificações *n*.

$$R_{e.t} = (max/n) \tag{14}$$

A forma de avaliação ocorre ao longo de tempo, uma vez que o registro das emissões nas atividades de transporte *ex-ante*, e *ex-post* dos dados, consiste na observação da funcionalidade tradicional por um período temporal. Logo, após o mapeamento, a comparação por períodos é denominada de business-as-usual (BAU). Esse método permite aos gerentes aplicar as boas práticas de melhoria e desenvolver habilidades para antecipar os riscos ambientais, garantindo a formulação de ideias proativas na preparação de estratégias e alocação ótima dos recursos.

4. APLICAÇÃO E AVALIAÇÃO

Os dados de campo foram extraídos de sete praças de pedágio e um radar com contagem volumétrica em cinco cidades limítrofes do Rio de Janeiro, em ambos os sentidos. O

período da coleta de dados compreende de 2001 a 2020. A Figura 1 destaca a localidade do saldo de veículos que saem e que entram na cidade, delimitando a pesquisa. A região analisada possui uma área de 1.200,329 km^2, estimativa populacional de 6,8 milhões de habitantes, com densidade de 5,6 mil hab/km^2 (IBGE, 2019).

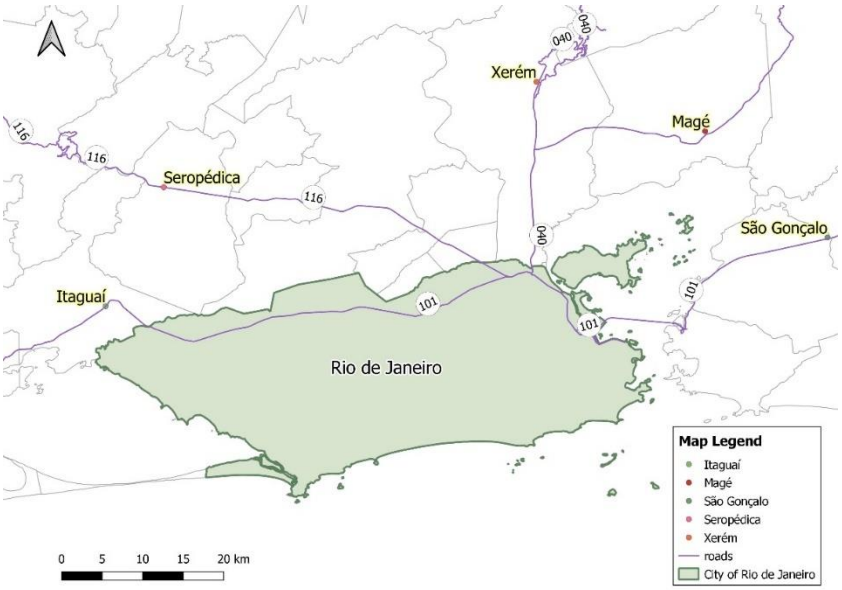


Figura 1 – Localização dos pedágios e radar da extração dos dados. Fonte: Elaboração própria. *Itaguaí possui radar com contagem volumétrica as demais cidades pedágios.

4.1. Análise de Variáveis de Entrada

Na primeira abordagem, o saldo de veículos demonstrou que em média saíram 8,13% mais veículos do que entraram na cidade. Para cada ano, a TxD apresentou pouco oscilação, contudo no ano de 2010, o volume de veículos que deixou a cidade foi de 27,81%, linha tracejada na Figura 2. Essa mudança foi proveniente dos efeitos de uma refinaria de petróleo após a cidade de São Gonçalo, em que grande parte dos caminhões se deslocavam para fora dos limites da cidade. Para a mesma intensidade de veículos era necessário um consumo de combustível maior, a partir desse período foi instituído o PROCONVE – P6 (Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores), similar ao "Euro 4" com objetivo de reduzir emissão de poluentes dos veículos automotores, promover o desenvolvimento tecnológico nacional e as características do combustível, e estabelecer condições de avaliação dos resultados alcançados (ANFAVEA, 2020). A partir de 2012, houve quedas constantes no consumo de combustível em relação a intensidade, e a partir de 2022 iniciou-se o PROCONVE – P8, similar ao "Euro 6", em ambos os casos melhorou a eficiência dos motores, reduzindo o consumo de combustível.

O saldo de veículos apresentou uma tendência de crescimento em 2018, deslocando parte das emissões para outras regiões. Tendo em vista que mais veículos saem do entram na cidade, a interação crescente apresenta maiores riscos para as emissões. A TxD para abatimentos no fluxo de veículos foi importante para descontar as emissões de CO_2 que não são provenientes do diesel vendidos dentro da cidade. O impacto das emissões de diesel de outras fontes que não o transporte rodoviário é de aproximadamente 2%, considerados na modelagem.

A intensidade viajada por veículos de carga e passageiros a diesel apresentou o mesmo decrescimento em 2010, com recuperação nos anos seguintes. Esse indicador é significativo para mensurar o material particulado emitido do combustível, pneus, freios e pavimento, ainda que políticas de desenvolvimento ao incentivo de veículos elétricos, não eliminaria o material

particulado. A quilometragem viajada apresenta uma forte relação com a atividade econômica e as emissões de CO2, desta maneira, a interação entre os outros indicadores potencializa os efeitos das emissões.

O consumo de diesel para o transporte rodoviário foi de 2,5% do Brasil, e 45% do estado, respectivamente. Motores a diesel tem maior eficiência energética se comparados com os a gasolina, porém emitem mais CO2, óxido de nitrogênio (NOX) e material particulado (PM), contudo, para veículos de carga, pela utilização da força necessária para o deslocamento, faz-se necessário esse tipo de combustível (HOLMEN; NIEMEIER, 2003). Grandes carrocerias são proibidas no centróide com restrição de horários, logo requer um número maior de veículo urbano de carga – VUC, para suprir a demanda e manter o nível de serviço. A normalização dos dados na Figura 2 permitiu comparar a evolução do saldo, intensidade e consumo de veículos a diesel.

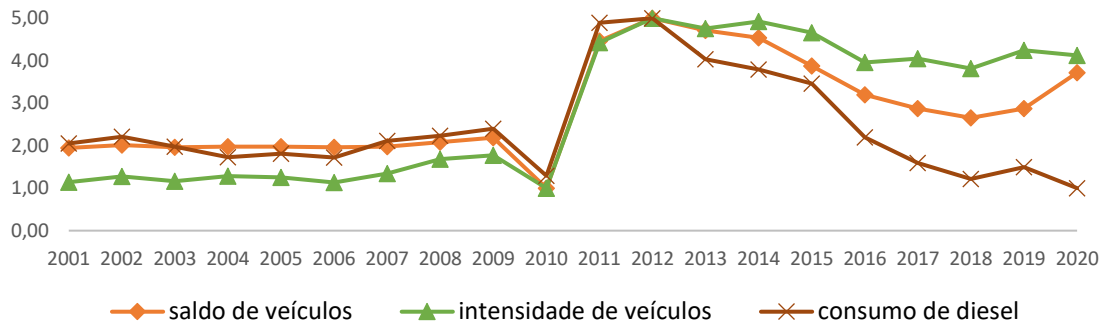


Figura 2 – Evolução das variáveis de entrada normalizadas [1,5]. Fonte: Elaboração própria.

4.2. Análise da aplicação fuzzy

As variáveis de entrada normalizadas, saldo de veículos, intensidade de veículos e consumo de diesel interagem formando para cada e.t os parâmetros de entrada [1,5] $U_i = (u_1, u_2,...,u_i)$ e saída [1,10] $W_i = (w_1, w_2,..., w_i)$ de acordo com as regras de subcritério e critério. A Tabela 1 demonstra os resultados W^0 (índice de sustentabilidade) para cada ano analisado, com dados normalizados do saldo, intensidade e consumo de veículos a diesel, como variável de entrada [1,5] U e variável de saída [1,10] W^0 como índice de sustentabilidade. E = excelente; MB = Muito bom; B = Bom; R = Regular; e P = Péssimo.

Tabela 1 – Índice de sustentabilidade em transporte e *rating*.

Ano	*Inputs*			*Outputs*	*Rating*
	Saldo	Intensidade	Consumo	W^0	
2001	1,95	1,14	2,05	2,93	MB
2002	2,02	1,27	2,21	3,06	MB
2003	1,97	1,16	1,98	2,96	MB
2004	1,98	1,29	1,73	2,61	MB
2005	1,98	1,25	1,81	2,73	MB
2006	1,96	1,14	1,72	2,60	MB
2007	1,97	1,34	2,11	2,95	MB
2008	2,08	1,68	2,24	3,24	MB
2009	2,19	1,77	2,40	3,52	MB
2010	1,00	1,00	1,30	1,16	E
2011	4,47	4,42	4,89	7,71	P
2012	5,00	5,00	5,00	8,94	P
2013	4,71	4,76	4,04	8,18	P

2014	4,54	4,92	3,79	7,84	P
2015	3,87	4,66	3,46	6,59	R
2016	3,20	3,96	2,19	5,46	R
2017	2,87	4,05	1,59	4,61	B
2018	2,66	3,82	1,21	4,26	B
2019	2,87	4,24	1,50	4,58	B
2020	3,72	4,12	1,00	5,00	B

Fonte: Elaboração própria.

A simulação dos dados foi realizada no *Matlab® R2022a*. O W^0 máximo no período selecionado foi de 8,94, logo, utilizando a Eq. 14, o valor de amplitude *crisp* para a rating foi de 1,79. Os dados foram classificados em cinco níveis: Excelente (E), <1,79; Muito Bom (MB), ≤3,58; Bom (B), ≤5,37; Regular (R), ≤7,16; Péssimo (P), <8,94. Percebe-se que até 2010, o índice de sustentabilidade apresentou resultados abaixo de 3,52. Com implantação do PROCONVE - P6 e deslocamento de parte de veículos para obra da refinaria de petróleo, houve uma grande redução nas três dimensões analisadas entre o período analisado, em que foram alcançados um índice de 1,16 e rating Excelente, porém até 2014, houve um aumento médio de 6,10% nas vendas de veículos a diesel, em que no mesmo período o rating foi rating Péssimo, com maiores interações nas atividades de fronteira, deslocamento e consumo de combustível. A partir de 2015, os níveis de interatividade entre as três dimensões foram reduzidos, aumentando o ganho ambiental proveniente da redução das emissões de CO2 e a eficiência no momento de transporte (t.km; p.km), uma vez que reduziria o número de viagens para o deslocamento.

O índice de sustentabilidade é um instrumento que contribui na fiscalização das normas e condutas das empresas com o meio ambiente, aumentando a competitividade de forma global, pois as empresas através da mudança de comportamento, optam por tornarem mais eficiente em relação ao transporte. Os paradigmas de gestão da cadeia de suprimentos é tornar-se enxuta, resiliente e verde (GOVINDAN *et al.*, 2014; MARCHI; ZANONI, 2017), pois são processos considerados estratégicos, uma vez que existe uma lacuna na participação das empresas nas questões sociais e soluções conjuntas (BÜYÜKÖZKAN *et al*., 2018).

4.3. Resultados e discussões

Quanto à queda das emissões de CO2 mencionada anteriormente, a partir de 2015, um dos aspectos que pode ter favorecido este quadro corresponde à redução das viagens em transporte de carga e passageiro, que dispõem de motores a diesel, em função da intensificação no uso de serviços por aplicativo (COSTA, 2019). No entanto, é importante ressaltar que esta migração da demanda não reflete necessariamente menores taxas de emissões no setor de transportes como um todo, somente em termos de diesel, que é tema da pesquisa. O crescimento nas emissões de CO2 pode ainda ser ratificado pela mudança nos padrões de consumo e intensificação do comércio eletrônico, que amplia o número de entregas e, por sua vez, a quantidade de viagens realizadas pelo transporte de carga.

Considerando as emissões atuais e a meta governamental para 2030, a redução necessária dos níveis de CO2 se torna desafiadora. Dentre as ações requeridas pela cidade do Rio de Janeiro para descarbonização, destaca-se a participação de 20% da frota do serviço público de transporte de passageiros por veículos não emissores (PREFEITURA DA CIDADE DO RIO DE JANEIRO, 2021). No entanto, grande parte da frota ainda seria mantida com motores convencionais, não caracterizando uma mitigação expressiva dos poluentes. Outra proposta municipal está relacionada à revisão da legislação voltada ao transporte de cargas até 2026, de modo a restringir a circulação e operação de veículos emissores de gases do efeito estufa.

Em um cenário de redução ideal, as emissões deveriam convergir para um declínio contínuo, de modo a não exigir um esforço intenso de ações e medidas que viabilizem o objetivo proposto. Diante das mudanças climáticas e da percepção quanto aos níveis de poluentes gerados, pode-se afirmar que o estabelecimento de estratégias, a partir de um planejamento consolidado, se torna fundamental para adoção de práticas mais realistas. Do mesmo modo, as atividades relacionadas ao monitoramento e revisão periódica são grandes aliadas para confirmação ou rearranjo das políticas, o que propicia melhores resultados.

O índice de sustentabilidade permite uma melhor observação das mudanças de critérios ambientais e uma fiscalização mais eficiente no fluxo de informação na aplicação das boas práticas. A eficiência nesse modelo está direcionada à maior participação da sociedade. A visualização do comportamento empresarial por parte do consumidor, se torna permanente, pois o aumento da consciência ambiental, e consequentemente, as ações sociais aumentam a percepção da sociedade para as questões ambientais.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este artigo propôs uma perspectiva tridimensional do consumo energético por motores a diesel à luz da sustentabilidade e com ênfase na lógica difusa como critério de avaliação. O método proposto corresponde a um sistema de reconhecimento com o uso do resultado triplo para reduzir as incertezas sobre os dados anuais disponíveis. Tais sistemas, em conjunto com os princípios da lógica *fuzzy* permitem análises objetivas e próximas ao cenário real, contribuindo para tomadas de decisão mais assertivas. Como relevância desta pesquisa, pontua-se o desenvolvimento de um índice sustentável a nível municipal para o transporte rodoviário, considerando os principais atributos de emissões de CO2. Os testes para validação do modelo foram realizados a partir de um estudo aplicado na cidade do Rio de Janeiro, Brasil.

O resultado da aplicação permite constatar que a abordagem é adequada e satisfatória, demonstrando que é possível garantir um maior equilíbrio na distribuição das informações e atenuar as incertezas inerentes aos dados a partir da análise multicritério. Para mais, é possível notar que o índice de sustentabilidade em transporte se apresenta como um indicador relevante no processo de avaliação e aplicação de boas práticas, uma vez que a análise particular de somente uma das variáveis pode não representar, de maneira realista, os níveis de emissões, a exemplo do ano de 2020, em que o consumo de combustível apresentou menor valor, em contraste com a intensidade e saldo de veículos.

Como sugestão para pesquisas futuras, recomenda-se a adoção de uma base de dados em tempo real, que permita às empresas de transporte e entidades governamentais o acompanhamento simultâneo do índice como um tipo de sensor de sustentabilidade. Esta medida contribui para que as ações e estratégias sejam realizadas com agilidade e no período presente, ao invés de tratar das informações em uma série histórica. Por fim, propõe-se a aplicação do método em cidades de menor porte, a fim de identificar possíveis barreiras na implementação e coleta dos dados, ainda que anuais.

Referências

ANFAVEA. **Coletiva de Imprensa: A ANFAVEA defende o PROCONVE**. São Paulo, Brasil: Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores, 2020.

BALLOU, R. **Logística: Administración de la cadena de suministro**. [s.l.] Pearson educación, 2004.

BÜYÜKÖZKAN, G.; FEYZIOĞLU, O.; GÖÇER, F. Selection of sustainable urban transportation alternatives using an integrated intuitionistic fuzzy Choquet integral approach. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 58, p. 186–207, 1 jan. 2018.

COSTA, M. G. **Análise da intensidade de carbono no transporte rodoviário no Brasil**. Rio de Janeiro: Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2019.

CRUZ-RIVERO, L. et al. Functional Evaluation Using Fuzzy FMEA for a Non-Invasive Measurer for Methane and Carbone Dioxide. **Symmetry**, v. 14, n. 2, p. 421, 20 fev. 2022.

DAS, B. et al. Emission factors and emission inventory of diesel vehicles in Nepal. **Science of The Total Environment**, v. 812, p. 152539, 15 mar. 2022.

ESSEN, H. V. et al. **Health impacts and costs of diesel emissions in the EU**. [s.l.] Delft: CE Delft, 2018.

FERREIRA, A. L. et al. **Emissões dos setores de energia, processos industriais e uso de produtos. Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG)**. [s.l.] Instituto de Energia e IEMA - Meio Ambiente, Observatório do Clima, Brasil, 2018. Disponível em: <https://energiaeambiente.org.br/produto/emissoes-dos-setores-de-energia-e-processos-industrias-documento-de-analise-2018>. Acesso em: 7 set. 2022.

FREITAS, R. R. DE; D'AGOSTO, M. DE A.; MARUJO, L. G. Methodological Proposal for Recognition Systems in Sustainable Freight Transport. **Sustainability**, v. 13, n. 13, p. 7511, jan. 2021.

GALLAB, M. et al. Risk Assessment of Maintenance activities using Fuzzy Logic. **Procedia Computer Science**, v. 148, p. 226–235, 2019.

GENG, P. et al. Reduction of PM emissions from a heavy-duty diesel engine with diesel/methanol dual fuel. **Fuel**, v. 123, p. 1–11, 1 maio 2014.

GOVINDAN, K. et al. Impact of supply chain management practices on sustainability. **Journal of Cleaner Production**, Special Volume: Making Progress Towards More Sustainable Societies through Lean and Green Initiatives. v. 85, p. 212–225, 15 dez. 2014.

HOLMEN, B. A.; NIEMEIER, D. A. Air Quality. Em: A. HENSHER, D.; J. BUTTON, K. (Eds.). **Handbook of Transport and the Environment**. [s.l.] Emerald Group Publishing Limited, 2003. v. 4p. 61–79.

IBGE. **Estimativas da população residente com data de referência 1º de julho de 2019**. Brasil: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Diretoria de Pesquisas, Coordenação de População e Indicadores Sociais, Ministério da Economia, 2019.

IEMA. **Annual Report 2020**. Brasil: Instituto de Meio Ambiente e ReInstituto de Energia e Meio Ambiente, 2020.

LI, H. Probability representations of fuzzy systems. **Science in China Series F**, v. 49, n. 3, p. 339–363, 1 jun. 2006.

LIN, G. et al. Performance Optimisation of Public Transport Networks Using AHP-Dependent Multi-Aspiration-Level Goal Programming. **Energies**, v. 15, n. 17, p. 6479, jan. 2022.

MARCHI, B.; ZANONI, S. Supply Chain Management for Improved Energy Efficiency: Review and Opportunities. **Energies**, v. 10, n. 10, p. 1618, out. 2017.

MCKINNON, A. Green Logistics: The Carbon Agenda. **Green Logistics**, p. 9, 2010.

MMA. **Primeiro Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários: Relatório Final**. Brasil: Ministério do Meio Ambiente, 2011.

MME. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2031**. [s.l.] Ministério de Minas e Energia, 2022.

MOSTAFAEIPOUR, A. et al. A new conceptual model for CO2 reduction in hot and dry urban areas: a case study of Mashhad in Iran. **International Journal of Global Warming**, v. 21, n. 4, p. 325–355, jan. 2020.

NOVAES, A. G. **Logística**. Campus: Rio de Janeiro, Brasil: [s.n.].

PREFEITURA DA CIDADE DO RIO DE JANEIRO. **Plano de Desenvolvimento Sustentável e Ação Climática da Cidade do Rio de Janeiro**. Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro, , 2021.

TUTAK, W. et al. Alcohol–diesel fuel combustion in the compression ignition engine. **Fuel**, v. 154, p. 196–206, 15 ago. 2015.

UELZE, R. **Gerência de transporte e frotas: na operação de equipamentos e movimentação de cargas**. [s.l.] Livraria Pioneira, 1978.

WANG, Y. et al. Influencing Factors and Decoupling Elasticity of China's Transportation Carbon Emissions. **Energies**, v. 11, n. 5, p. 1157, maio 2018.

WEI, L.; GENG, P. A review on natural gas/diesel dual fuel combustion, emissions and performance. **Fuel Processing Technology**, v. 142, p. 264–278, fev. 2016.

WU, D. Approaches for Reducing the Computational Cost of Interval Type-2 Fuzzy Logic Systems: Overview and Comparisons. **IEEE Transactions on Fuzzy Systems**, v. 21, n. 1, p. 80–99, fev. 2013.

YUAN, X.; LIU, Z.; STANLEY LEE, E. Center-of-gravity fuzzy systems based on normal fuzzy implications. **Computers & Mathematics with Applications**, v. 61, n. 9, p. 2879–2898, 1 maio 2011.

ZADEH, L. A. Fuzzy sets. **Information and Control**, v. 8, n. 3, p. 338–353, jun. 1965.