

## Veículos movidos a etanol como forma de contribuir para cidades sustentáveis

<sup>1</sup>João Marcelo Fernandes Gualberto de Galiza , <sup>2</sup>Daniel de Paula Diniz , <sup>3</sup>Monica Carvalho 

<sup>1</sup>Universidade Federal da Paraíba, Paraíba – Brasil, [joamarcelofgg@gmail.com](mailto:joamarcelofgg@gmail.com)

<sup>2</sup>Universidade Federal da Paraíba, Paraíba – Brasil, [danieldiniz@alumni.cear.ufpb.br](mailto:danieldiniz@alumni.cear.ufpb.br)

<sup>3</sup>Universidade Federal da Paraíba, Paraíba – Brasil, [monica@cear.ufpb.br](mailto:monica@cear.ufpb.br)

### RESUMO

O transporte rodoviário desempenha um papel central nas emissões de gases de efeito estufa (GEEs) no mundo, com uma notável e crescente contribuição. O objetivo deste trabalho é verificar a contribuição do etanol como combustível, em termos de emissões veiculares no Brasil. Assim, analisam-se as emissões de GEEs associadas à operação de um Renault Kwid Intense *flex* 1.0, comparando a operação com gasolina e etanol. Para tanto, aplica-se a metodologia da Avaliação de Ciclo de Vida para quantificar as emissões associadas à operação e manutenção do automóvel ao longo de 100.000 km no Brasil. Para o estudo, a periodicidade das manutenções foi a sugerida pela Renault, e considerou-se como consumo médio a gasolina 15,5 km/L e, para o etanol, 10,9 km/L. A pegada de carbono para ambos os veículos nas condições submetidas para toda a fase de uso e manutenção foi de 2129,95 kg CO<sub>2</sub>-eq para o veículo a gasolina e 1227,30 kg CO<sub>2</sub>-eq para o veículo a etanol. Observa-se que as emissões do veículo a etanol são 42,38% mais baixas e existe potencial para mitigação de mudanças climáticas associadas ao seu uso, contribuindo para vários Objetivos do Desenvolvimento Sustentável e, principalmente, para a sustentabilidade de cidades. **Objetivo:** Analisar as emissões de gases de efeito estufa (GEEs) de um veículo leve utilizando gasolina e etanol, avaliando o potencial de redução da pegada de carbono a partir do uso de biocombustíveis. **Referencial teórico:** Uma estratégia para a descarbonização pode ser o uso de etanol e biocombustíveis, que é uma maneira mais rápida e possui menos custos financeiros do que a eletrificação veicular. Em algumas situações, o uso de etanol pode ser mais eficiente na redução de emissões de poluentes do que veículos 100% elétricos. O Brasil se destaca por manter boa relação entre a qualidade da gasolina e as emissões de GEEs, com boa parte da frota de veículos brasileiros utilizando etanol atualmente, o que diminui significativamente a emissão de GEEs. **Método:** A Avaliação e Ciclo de Vida (ACV) é utilizada para calcular as emissões de GEEs do Renault Kwid Intense *flex* para as fases de uso e manutenção (reposição de peças e partes) do veículo, considerando o consumo de gasolina e etanol no Brasil. Emprega-se o método de avaliação de impacto ambiental IPCC 2021 GWP 100a, que quantifica as emissões de GEEs num período de 100 anos. O estudo considerou uma vida útil para ambos os veículos de 100.000 km. **Resultados e conclusão:** Pôde-se observar uma redução da pegada de carbono de 42,38% ao utilizar etanol ao invés da gasolina. Além disso, constata-se que a manutenção do veículo tem baixo impacto na pegada de carbono total ao longo do período de uso. **Implicações da pesquisa:** É possível verificar que o etanol tem um efeito mitigador no aquecimento global quando comparado ao uso de combustíveis fósseis, como a gasolina. **Originalidade/valor:** O estudo pode contribuir para o planejamento de políticas públicas e boas práticas na sociedade, visando a reduzir a pegada de carbono, melhorar a qualidade do ar, promover sistemas mais sustentáveis e descarbonizar as ações cotidianas.

**Palavras-chave:** Cidades Sustentáveis. Pegada de Carbono. Etanol. Avaliação de Ciclo de Vida.

### Ethanol-powered vehicles as a way to contribute to sustainable cities

**Purpose:** The research analyzes the greenhouse gas (GHG) emissions of a light vehicle using gasoline and ethanol, assessing the potential for reducing the carbon footprint through the use of biofuels. **Method/design/approach:** The Life Cycle Assessment (LCA) is used to calculate the GHG emissions of the Renault Kwid Intense flex-fuel car for the vehicle's use and maintenance phases (replacement of parts and pieces), considering the consumption of gasoline and ethanol in Brazil. The IPCC 2021 GWP 100a environmental impact assessment method is used, which quantifies GHG emissions over a 100-year period. The study considered a useful life for both vehicles of 100,000 km. **Results and conclusion:** A carbon footprint reduction of 42.38% can be observed when using ethanol instead of gasoline. In addition, it can be seen that vehicle maintenance has a low impact on the total carbon footprint over the period of use. **Research implications:** It can be highlighted that ethanol has a mitigating effect on global warming when compared to the use of

fossil fuels, such as gasoline. **Originality/value:** The study can contribute to the planning of public policies and good practices in society that aim to reduce the carbon footprint, improve air quality, promote more sustainable systems and decarbonize everyday actions.

**Keywords:** Sustainable cities. Carbon Footprint. Ethanol. Life Cycle Assessment.



## 1. INTRODUÇÃO

Desde a década de 1970, as emissões associadas ao setor de transportes cresceram 120% - sendo que 80% dos combustíveis usados na mobilidade urbana são fósseis (Barczak; Duarte, 2012). À medida que conceitos de sustentabilidade ambiental, social e de governança corporativa vão avançando, evolui também a preocupação com energia (combustíveis) para transporte. A busca por eficiência energética e menores emissões locais e globais são objetivos a serem alcançados. A motorização da mobilidade urbana surge, portanto, como um dos principais emissores de gases de efeito estufa (GEEs).

As emissões de GEEs são uma preocupação atual, no que se refere ao desenvolvimento social e econômico, especialmente em grandes cidades. Segundo Machado (2019), a volatilidade dos preços e incerteza sobre o abastecimento de petróleo contribuem para uma maior oferta de fontes de energia renováveis que reduzam as emissões de GEE. Assim o etanol aparece como uma opção renovável, e pode ser usado de diferentes maneiras como combustível para veículos, seja na forma anidra (adicionado à gasolina) ou hidratado (para a utilização direta em teores próximos a 94%) (Machado, 2019).

Segundo a associação mundial de combustíveis renováveis, os Estados Unidos é o maior produtor mundial anual de etanol combustível, com 55% do volume mundial produzido - já o Brasil aparece em segundo com 27% do volume mundial produzido (RFA, 2020). A energia produzida a partir da cana-de-açúcar vem experimentando um crescimento expressivo na matriz energética brasileira, principalmente devido ao consumo de etanol. De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética, a biomassa da cana-de-açúcar foi a principal fonte primária de energia renovável no Brasil, contribuindo com 16,9% da oferta interna de energia, superando a média mundial, que gira em torno de 14% a 15% (EPE, 2024).

No Brasil, 48% de sua gasolina automotiva é substituída por etanol, seja por meio da mistura de 27,5% de etanol anidro na gasolina ou pelo uso direto de etanol em veículos *flex* (que representam mais de 86% da frota total de veículos) (Nastari, 2021). Ainda que muitos países e grandes montadoras de automóveis venham escolhendo a eletrificação veicular como estratégia para redução de emissões, o etanol pode ter um papel importante na mobilidade sustentável.

A indústria automobilística ao longo do tempo evoluiu com base na fabricação de veículos destinados ao uso privado e movidos por combustíveis fósseis (Nichi, 2023). Porém, o Brasil possui em sua matriz energética uma parcela expressiva de energia renovável, principalmente se considerarmos a política da produção do etanol para o abastecimento de automóveis privados (Boareto, 2008). O trabalho de Silva (2024) ressaltou que a transição para combustíveis alternativos tem um potencial significativo para mitigar emissões, e sua simulação demonstrou que a substituição de 80% dos veículos a gasolina por veículos a etanol resultou em uma diminuição de aproximadamente 78% nas emissões. Incorporar etanol em uma matriz de transporte sustentável pode ser parte de um plano maior para promover uma mobilidade urbana mais limpa. Isso pode incluir o uso de veículos movidos a etanol, assim como a integração com outras formas de transporte sustentável, como bicicletas e

---

transporte público eficiente. Utilizar etanol contribui para a diversificação das fontes de energia e para a redução da dependência de recursos não renováveis, o que é uma característica importante de uma cidade sustentável. Além de potencialmente reduzir as emissões de GEE, o etanol pode contribuir para a diminuição da poluição do ar e da água, especialmente quando comparado aos combustíveis fósseis que liberam uma variedade de poluentes. A produção de etanol também pode estimular o desenvolvimento econômico local, criando empregos na agricultura e na indústria de biocombustíveis. Cidades sustentáveis frequentemente buscam formas de fortalecer a economia local de maneira que também beneficie o meio ambiente.

O objetivo deste estudo é quantificar as emissões de GEE associadas a um veículo leve movido a gasolina e comparar com sua operação e manutenção a etanol, para verificar o potencial de mitigação de mudanças climáticas. O propósito mais amplo é contribuir para o debate sobre cidades inteligentes e sustentáveis, já que uma potencial redução de emissões atmosféricas é um benefício para todos os cidadãos.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

Uma das principais estratégias para a descarbonização não é somente por meio da eletrificação dos veículos, mas também com o uso de etanol e biocombustíveis (Glensor; Muñoz B., 2019). Para as empresas envolvidas na descarbonização, a eletrificação terá um papel importante – porém, a maneira mais rápida e com menos custos financeiros é utilizar etanol e biomassa (UNICA, 2023). Há evidências de que o uso de etanol pode ser mais eficiente na redução de emissão de CO<sub>2</sub> que os carros 100% elétricos (Benvenuti *et al.*, 2023).

O Brasil se destaca por manter uma das mais favoráveis relações entre a qualidade da gasolina e as emissões de gases, sendo considerada uma das mais ambientalmente limpas do mundo e por boa parte da frota de veículos brasileiros utilizar etanol, o que diminui significativamente a emissão de GEEs (Kovarsky, 2020).

A União Europeia (UE) aprovou a decisão de proibir a comercialização de carros a combustão a partir de 2035 (Abnett, 2022). A medida implica que, a partir dessa data, não serão mais disponibilizados no mercado veículos movidos por combustíveis fósseis, como gasolina e diesel. Essa nova regulamentação abre espaço para a adoção de alternativas, incluindo combustíveis sintéticos e biocombustíveis, ambos neutros em termos de emissões de CO<sub>2</sub>.

Conforme estabelecido na Lei nº 12.490/2011, biocombustíveis são substâncias derivadas de biomassa renovável, tal como biodiesel, etanol e outras substâncias estabelecidas em regulamento da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), que podem ser empregadas diretamente ou mediante alterações em motores a combustão interna ou para outro tipo de geração de energia, podendo substituir parcial ou totalmente combustíveis de origem fóssil (Brasil, 2011). Os biocombustíveis mais conhecidos são etanol, biomassa, biometano e biodiesel, sendo produzidos a partir de cana-de-açúcar, milho, soja, semente de girassol, madeira, celulose e outras fontes.

Os combustíveis mais consumidos no Brasil são o óleo diesel e a gasolina, no grupo de combustíveis fósseis, e o etanol e o biodiesel, como biocombustíveis (ANP, 2024). Encontram-se no mercado brasileiro duas variantes de gasolina: A e C. Enquanto a gasolina C é enriquecida com etanol pelos distribuidores antes de chegar aos postos de combustíveis, podendo ser ainda comum ou aditivada, a aditivada contém detergentes e dispersantes em sua formulação, possuindo maior octanagem. Já a gasolina A é comercializada sem adição de etanol e é fornecida exclusivamente pelos produtores (ANP, 2013).

A gasolina é um combustível líquido derivado do petróleo, produzido por meio de processos de refinamento e craqueamento, e consiste em uma mistura de hidrocarbonetos. Já o óleo diesel é outro combustível líquido derivado do petróleo, composto principalmente por hidrocarbonetos de cadeia mais longa em comparação com a gasolina, e pode conter em menor quantidade nitrogênio, enxofre e oxigênio (Petrobrás, 2023).

O etanol é um biocombustível produzido por meio da fermentação de amido e outros açúcares, sendo a cana-de-açúcar uma das principais fontes, é obtido também a partir de milho, mandioca, beterraba, batata e outros. O biodiesel também é um biocombustível, sendo derivado de biomassa renovável que passa por reação de transesterificação (converte o óleo ou gordura em ésteres de ácidos graxos) que constitui o biodiesel. Suas principais fontes incluem soja, mamona, canola, palma, girassol, óleos vegetais e resíduos de gorduras animais.

O Brasil foi o primeiro país a usar o etanol/álcool em larga escala como combustível de automóvel. Essa conquista remonta a 1975, quando foi lançado o Programa Nacional do Álcool (ProÁlcool) (Dias, 2012). O principal objetivo desse programa foi a produção de etanol anidro para a adição à gasolina, representando inicialmente uma parcela entre 10% e 22% da mistura. Tal medida foi adotada devido a quase completa dependência do país em relação à importação de gasolina, especialmente em um cenário de aumento dos preços no mercado internacional. Atualmente, a proporção de etanol anidro na gasolina brasileira é de 27,5% (E27). Embora seja insuficiente para redução do efeito estufa, essa estratégia tem desempenhado um papel fundamental na redução das emissões poluentes originadas pelo setor de transporte (Vianna *et al.*, 2009).

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo de caso aqui representado selecionou o automóvel Kwid 1.0 12V SCE *flex* Intense manual, durante o analisando seu desempenho ao longo de 100.000 km percorridos. A Tabela 1 mostra a ficha técnica dos modelos.

Modelo	Kwid Intense <i>flex</i>	
	Etanol	Gasolina
Câmbio	Manual	Manual
Autonomia Média (km)	414	589
Tanque (L)	38	38
Potência Máxima	71 cv – 5500 rpm	68 cv – 5500 rpm

Tabela 1 - Ficha técnica básica dos modelos Kwid utilizados no estudo.

Fonte: Renault (2024).

Para o estudo, a periodicidade das manutenções foi a sugerida pela Renault, sendo realizada a cada 10.000 km e efetuada pela concessionária. Todos os itens e a frequência de reparos utilizados durante o período analisado estão apresentados na Tabela 2.

Componente	Frequência de troca
Lubrificação	10.000 km
Troca de filtro de óleo	10.000 km
Troca de filtro de combustível	10.000 km
Troca de filtro de habitáculo	10.000 km
Troca de filtro de ar	10.000 km
Anel	10.000 km
Vela	20.000 km

Correia	50.000 km
Fluido de freios	10.000 km
Líquido de arrefecimento	30.000 km
Bateria 12 V	50.000 km
Conjunto de pneus	60.000 km

Tabela 2 - Troca de itens na revisão e extras.

Fonte: Renault (2024).

Para o presente estudo foi utilizado como consumo médio a gasolina 15,5 km/L e para o etanol, 10,9 km/L, considerando o transporte 50% em rodovia e 50% na cidade. Os consumos associados são 15,3 e 15,7 km/L, respectivamente, para o veículo a gasolina durante as condições de cidade e rodovia. Para o etanol, os consumos associados são 10,8 e 11,0 km/L, respectivamente, durante as condições de cidade e rodovia (Renault, 2024).

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma técnica de gestão ambiental internacionalmente aceita e normatizada, possuindo seus princípios e estrutura definidos por meio das normas ABNT NBR ISO 14040:2014 e seus requisitos e orientações pela norma ABNT NBR ISO 14044:2014 (ABNT, 2014a; ABNT, 2014b). Em termos de estrutura, a ACV é composta por quatro fases iterativas: definição do objetivo e escopo, análise do inventário, avaliação de impactos e a fase de interpretação.

Para a quantificação dos impactos ambientais foi utilizado o *software* Simapro v.9.6.0.1 (Pré Sustainability, 2024), base de dados Ecoinvent v3.8 (Ecoinvent Centre, 2023). Para a quantificação dos impactos ambientais, devido a preocupações com as mudanças climáticas, selecionou-se o método IPCC 2021 GWP 100a (IPCC, 2024), que agrupa as emissões de gases de efeito estufa numa métrica comum, em CO<sub>2</sub>-eq, ao longo de 100 anos.

O inventário para a fase de uso e manutenção foi estabelecido conforme demonstrado na Tabela 3, considerando uma unidade funcional de 100 mil quilômetros.

Fluxos de entrada	Unidade funcional (100.000 km)	Unidade	Material
<b>Consumo de Combustível</b>			
Kwid Intense <i>flex</i> Etanol	9174,31 - 7238,53	L - kg	Etanol mono-hidratado (10,9 km/L)
Kwid Intense <i>flex</i> Gasolina	6451,61 - 4767,58	L - kg	Gasolina E27 (15,5 km/L)
<b>Consumo de materiais</b>			
Lubrificação	8,00 - 7,20	L - kg	Óleo sintético
Filtro de óleo	1,70	kg	Aço inoxidável
Filtro de combustível	1,00	kg	Aço blindado
Filtro de habitáculo	4,00	kg	Papel de celulose
Filtro de ar	2,07	kg	Papel de celulose
Anel	0,02	kg	Aço galvanizado
Velas	0,20	kg	Níquel
Correias	0,23	kg	Borracha
Fluido de freios	5,00 - 3,09	L - kg	Glicóis + aditivos
Líquido de arrefecimento	2,40 - 2,52	L - kg	Etilenoglicol + aditivos
Bateria 12 V	26,00	kg	69% Pb 8% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
Pneu	26,00	kg	Borracha

Tabela 3 - Inventário de recursos utilizados durante a vida útil dos veículos.

Fonte: Elaborada pelos autores (2024).

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 4 especifica as pegadas de carbono para os itens do consumo de materiais, obtida como resultado da montagem do inventário no *software* de ACV, usando a base de dados especificada e aplicando-se o método de quantificação de GEE.

Fluxos de saída	Pegada de carbono (kg CO <sub>2</sub> -eq/kg)	Unidade funcional (kg CO <sub>2</sub> -eq/100.000 km)
Lubrificação	1,37	9,75
Filtro de óleo	5,20	8,85
Filtro de combustível	2,16	2,16
Filtro de habitáculo	2,92	11,70
Filtro de ar	2,92	6,05
Anel	1,68	0,03
Velas	17,15	3,43
Correias	2,72	0,63
Fluido de freios	2,30	7,11
Líquido de arrefecimento	2,02	5,10
Bateria 12 V	1,73	44,95
Pneu	2,72	70,73

Tabela 4 - Resultados da Análise de Inventário - Consumo de Materiais.

Fonte: Elaborada pelos autores (2024).

A substituição de pneus contribuiu com 41,49% e a troca da bateria contribuiu com 26,36% das emissões, sendo os principais fatores que influenciam as emissões associadas ao consumo de materiais durante o período de uso. A produção de pneus vem sendo o foco de pesquisas direcionadas à redução de seu impacto ambiental (e.g., Katarzyna *et al.*, 2020; Dong *et al.*, 2021), devido ao intenso uso de eletricidade, na faixa de 34,85–37,34 kWh por pneu. O trabalho de Shanbag e Manjare (2020) verificou que a utilização de bagaço de cana para geração de energia poderia resultar em uma redução de até 10% no consumo de eletricidade nas fábricas de pneus, reduzindo assim a pegada de carbono do produto (pneu).

Para o consumo de combustíveis, a pegada de carbono associada ao uso do etanol é de 0,146 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg de etanol, e para a gasolina a pegada de carbono é de 0,411 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg de gasolina. Ao longo dos 100.000 km considerados neste estudo, as emissões totalizam 1056,82 kg CO<sub>2</sub>-eq e 1959,47 kg CO<sub>2</sub>-eq para os veículos a etanol e gasolina, respectivamente.

O etanol se destaca com uma pegada de carbono mais baixa, sendo uma alternativa notável aos combustíveis fósseis. Em comparação com a gasolina brasileira, o etanol emite cerca de 46% menos carbono, substâncias nocivas ao meio ambiente, reforçando seu potencial como uma escolha mais ecológica. As emissões totais associadas à operação dos veículos estão mostradas na Tabela 5.

Modelo	Kwid Intense flex	
	Etanol (kg CO <sub>2</sub> -eq)	Gasolina (kg CO <sub>2</sub> -eq)
Uso	1056,82	1959,47
Manutenção	170,48	170,48
<b>Total</b>	<b>1227,30</b>	<b>2129,95</b>

Tabela 5 - Emissões para cada cenário ao longo de 100.000 km.

Fonte: Elaborada pelos autores (2024).

Observa-se que as emissões associadas ao veículo movido a etanol são 42,38% mais baixas e existe potencial para mitigação de mudanças climáticas associadas ao seu uso, contribuindo para vários

---

Objetivos do Desenvolvimento Sustentável e, principalmente, para a sustentabilidade de cidades. Ainda há a necessidade de investimentos em transporte sustentável para promover a Agenda 2030.

Segundo Rodrigues e Abreu (2023), a necessidade de diminuir as emissões introduziu definitivamente a análise ambiental, como a ACV mostrada neste trabalho, nas discussões sobre segurança energética e políticas públicas no mundo. O setor de transportes desempenha um papel crucial nas estratégias de mitigação e adaptação às mudanças climáticas, representando uma parcela significativa do consumo de energia, especialmente no Brasil, onde contribui com 65% do total (Nichi, 2023).

Portanto, o etanol pode desempenhar um papel importante em ajudar as cidades a alcançar seus objetivos de sustentabilidade, especialmente quando integrado em um sistema mais amplo de estratégias ambientais e de mobilidade. A utilização do etanol como combustível veicular em cidades consegue se alinhar com os objetivos das cidades inteligentes ao contribuir para a eficiência energética, a redução de emissões, a integração com tecnologias avançadas e a promoção da sustentabilidade e inovação.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo baseou-se em uma avaliação ambiental comparativa entre a utilização do Renault Kwid Intense *flex* 2024 com gasolina e etanol. Para a avaliação ambiental, foi utilizada a metodologia da Avaliação de Ciclo de Vida, quando a unidade funcional definida foi de 100.000 km e as fontes emissoras para os veículos estavam no abastecimento, no deslocamento e nas manutenções e trocas de peças realizadas em ambos os carros durante o período.

As emissões associadas ao uso dos veículos compreenderam a fase de consumo de materiais (manutenções), que foram iguais para ambos os veículos, totalizando 170,48 kg CO<sub>2</sub>-eq. Desse valor, a substituição de pneus contribuiu com 41,49% e a troca da bateria contribuiu com 26,36% das emissões.

Entretanto, o consumo de combustíveis foi o item mais impactante nas emissões globais dos veículos: ao longo dos 100.000 km considerados neste estudo, as emissões totalizam 1056,82 kg CO<sub>2</sub>-eq e 1959,47 kg CO<sub>2</sub>-eq para os veículos a etanol e gasolina, respectivamente. As emissões totais (somando manutenções e combustível) foram de 2129,95 kg CO<sub>2</sub>-eq para o veículo a gasolina e 1227,30 kg CO<sub>2</sub>-eq para o veículo a etanol.

Observa-se que as emissões do veículo a etanol são 42,38% menores, evidenciando seu potencial para mitigar as mudanças climáticas. Em cidades inteligentes e sustentáveis, esse potencial pode ser ampliado por meio de processos mais eficientes de fermentação e do aproveitamento de resíduos agrícolas, alinhando-se com os princípios da inovação sustentável. Além disso, a mobilidade urbana pode ser significativamente aprimorada com sistemas de transporte integrados e eficientes. O etanol, quando combinado com veículos elétricos, híbridos e movidos a biocombustíveis, compõe uma estratégia de transporte que promove uma mobilidade mais limpa e eficiente.

Para estudos futuros, recomenda-se realizar análises incluindo a operação do Renault Kwid E-Tech, veículo elétrico. Além disso, sugere-se ampliar a avaliação ambiental para incluir outras categorias de impacto, como indicadores de qualidade do ar, uso de recursos naturais e geração de resíduos.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório de Avaliação Ambiental e Energética (LAvAE) da UFPB e ao apoio financeiro do CNPq, por meio da bolsa de produtividade 309452/2021-0, bolsa de doutorado 141303/2021-2, e projeto 424173/2021-2.

## REFERÊNCIAS

ABNETT, Kate. União Europeia aprova proibição de novos carros a combustão a partir de 2035. **CNN Brasil**, 27 out. 2022. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/economia/uniao-europeia-aprova-proibicao-de-novos-carros-a-combustao-a-partir-de-2035/>. Acesso em: 15 fev. 2024

ABNT. **NBR ISO 14040**: Gestão Ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. Rio de Janeiro: ABNT, 2014a.

ABNT. **NBR ISO 14044**: Gestão Ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. Rio de Janeiro: ABNT, 2014b.

ANP. **Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis 2023**. Brasília, DF, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/anuario-estatistico/anuario-estatistico-2023>. Acesso em: 15 fev 2024.

ANP. **Resolução nº 40, de 25 de outubro de 2013**. Brasília, DF: ANP, 2013. Disponível em: <https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-40-2013->. Acesso em: 15 fev. 2024.

BARCZAK, Rafael; DUARTE, Fábio. Impactos ambientais da mobilidade urbana: cinco categorias de medidas mitigadoras. Urbe. **Revista Brasileira de Gestão Urbana**, Curitiba, v. 4, n. 1, p. 13-32, jun. 2012.

BENVENUTTI, L. M. M. *et al.* Electric versus ethanol? a fleet-based well-to-wheel system dynamic model for passenger vehicles. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, [s. l.] v. 115, p. 103604, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103604>

BOARETO, Renato. A política de mobilidade urbana e a construção de cidades sustentáveis. **Revista dos Transportes Públicos-ANTP**, Brasília, DF, ano 30/31, p. 141-160, 2008.

BRASIL. **Lei nº 12.490, de 16 de setembro de 2011**. Altera as Leis nºs 9.478, de 6 de agosto de 1997, e 9.847, de 26 de outubro de 1999 [...]. Brasília, DF: Presidência da República, 2011. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2011-2014/2011/Lei/L12490.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2011/Lei/L12490.htm). Acesso em: 15 fev. 2024.

DIAS, J. d. S. O uso do etanol como combustível no brasil vai completar um século! **Agroenergia em Revista**, Brasília, DF, ano 3, n. 5, p. 12-13, dez. 2012.

DONG, Yahong *et al.* Life cycle assessment of vehicle tires: A systematic review. **Cleaner Environmental Systems**, v. 2, p. 100033, Jun. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2021.100033>

ECOINVENT CENTRE. **Ecoinvent database version 3.8 Swiss Centre for Life Cycle Inventories**. Zurich: EcoInvent Centre, 2023.

---

EPE. **Balanco Energético Nacional (ano-base 2023)**. Rio de Janeiro, 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2023>. Acesso em: 9 jan. 2024.

GLENSOR, Kain; MUÑOZ B., María Rosa. Life-Cycle Assessment of Brazilian Transport Biofuel and Electrification Pathways. **Sustainability**, [s. l.], v. 11, n. 22, 6332, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/su11226332>

IPCC. Climate change 2021: The physical science basis. **Agenda**, Geneva, v. 6, n. 07, p. 280, 2021.

KATARZYNA, P. *et al.* LCA as a tool for the environmental management of car tire manufacturing. **Applied Sciences**, [s. l.], v. 10, n. 20, p. 7015, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10207015>

KOVARSKY, P. Etanol: uma solução brasileira sim, e das boas. **Brasil Energia**, Rio de Janeiro, 01 ago. 2020. Disponível em: [www.editorabrasilenergia.com.br/etanol-uma-solucao-brasileira-sim-e-das-boas](http://www.editorabrasilenergia.com.br/etanol-uma-solucao-brasileira-sim-e-das-boas). Acesso em: 9 jan. 2024.

MACHADO, Henrique Moreira Fruh. **Estudo de viabilidade econômica e socioambiental do etanol super-hidratado como combustível para mobilidade e geração de energia**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2019.

NASTARI, Plínio Mário. Papel do etanol na mobilidade sustentável do futuro. **AgroANALYSIS**, São Paulo, v. 41, n. 10, p. 16-17, 2021.

NICHI, Jaqueline. O desafio da mobilidade sustentável em cidades inteligentes: o caso da cidade de São Paulo. *In*: VIDAL, Leonardo de Carvalho; OLIVEIRA, Gilmar Gonçalves de; REIS, Wallace Pereira Neves dos (org.). **Smart cities e smart factory: insights sobre tendências e padrões**. São Paulo: Editora Científica Digital, 2023. *E-book*. p. 87-106. Disponível em: <https://www.editoracientifica.com.br/books/chapter/o-desafio-da-mobilidade-sustentavel-em-cidades-inteligentes-o-caso-da-cidade-de-sao-paulo>. Acesso em: 9 jan. 2024.

PETROBRÁS. **Óleo diesel**: informações técnicas. Rio de Janeiro, 2023. Disponível em: <https://petrobras.com.br/quem-somos/oleo-diesel>. Acesso em: 5 fev. 2024.

SIMAPRO. **Pré Sustainability**. Amersfoort, 2024. Disponível em: <https://simapro.com/>.

RENAULT. **Renault KWID**: ficha técnica – Renault. 2024. Disponível em: <https://www.renault.com.br/veiculos-de-passeio/kwid/ficha-tecnica.html>. Acesso em: 27 nov. 2024.

RFA. **World Fuel Ethanol Production by Region**. Ellisville, 2020. Disponível em: <https://ethanolrfa.org/markets-and-statistics/annual-ethanol-production>. Acesso em: 7 ago. 2024.

RODRIGUES, Luciano; ABREU, Ricardo Simões. O papel da bioenergia na mobilidade sustentável de baixo carbono. **AgroANALYSIS**, São Paulo, v. 43, n. 6, p. 19-21, 2023.

SHANBAG, A.; MANJARE, S. Life cycle assessment of tyre manufacturing process. **Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems**, Zagreb, v. 8, n. 1, p. 22-34, 2020. DOI: <https://doi.org/10.13044/j.sdewes.d7.0260>

SILVA, Edwin Francisco Ferreira. **Modelo numérico dos consumos energéticos e emissões de CO2 como apoio aos planos de mobilidade**. 2024. Tese (Doutorado em transportes) – Universidade de Brasília, Brasília, 2024.

UNICA. **Indústria vê etanol como principal rota para descarbonização**. [S. l.]2023. Disponível em: <https://unica.com.br/noticias/industria-ve-etanol-como-principal-rota-para-descarbonizacao/>. Acesso em: 9 jan. 2024.

VIANNA, J. *et al.* O papel do etanol na mitigação das emissões de poluentes no meio urbano. *In*: JORNADA LUSO-BRASILEIRA DE ENSINO E TECNOLOGIA EM ENGENHARIA–JBLE, 2., 2009, Porto. **Anais** [...]. Porto: Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2009.