

REDUÇÃO DE EMISSÕES DE CO₂ POR USO DE BIODIESEL NA FROTA DE ÔNIBUS URBANA DO RIO DE JANEIRO

REDUCCIÓN DE EMISIONES DE CO₂ POR EL USO DE BIODIESEL EM LA FLOTA DE AUOBUSES URBANA DE RÍO DE JANEIRO

REDUCTION OF CO₂ EMISSIONS DUE TO THE USE OF BIODIESEL IN THE RIO DE JANEIRO URBAN BUS FLEET

Aurélio Lamare Soares Murta*
rev.tema@gmail.com

Marcos Aurélio Vasconcelos de Freitas**
mfreitas@ivig.coppe.ufrj.br

Maria da Penha Araujo Murta***
penha.murta@yahoo.com.br

*Universidade Federal Fluminense (UFF), Rio de Janeiro, Brasil

**Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, Brasil

***Universidade Castelo Branco (UCB), Rio de Janeiro, Brasil

Resumo

Por vários anos, o uso do petróleo para mover veículos, transportar pessoas, gerar energia e outras atividades necessárias à vida social, tornou o mundo muito dependente desse insumo. Entre os combustíveis alternativos estudados, temos o biodiesel, combustível obtido por meio do processo de transesterificação de óleos vegetais ou gorduras animais, que se tornou um potencial substituto do diesel de petróleo. Entre as vantagens do uso desse combustível, destacam-se: ser renovável, reduzir a dependência do país em relação ao petróleo e ter taxas menores de emissões de gases de efeito estufa do que a petrodiesel. Entre esses gases, destaca-se o CO₂, que contribui para o aquecimento global e será o alvo deste estudo. Com base nos cálculos realizados considerando o consumo de petrodiesel no Rio de Janeiro, pretende-se quantificar as emissões de seu uso até 2030 na frota de ônibus urbanos da cidade do Rio de Janeiro e, em paralelo, calcular o potencial de redução de emissões com o uso de biodiesel nos percentuais estabelecidos pelo governo brasileiro no mesmo.

PALAVRAS CHAVE: Biodiesel; Transporte Público Rodoviário; Emissões de CO₂; Gases de efeito estufa.

Resumen

Desde hace varios años, el uso del petróleo para mover vehículos, transportar personas, generar energía y otras actividades necesarias para la vida social, hizo que el mundo fuera muy dependiente de este insumo. Entre los combustibles alternativos estudiados se encuentra el biodiésel, combustible obtenido mediante el proceso de transesterificación de aceites vegetales o grasas animales, que se ha convertido en un potencial sustituto del diésel de petróleo. Entre las ventajas de utilizar este combustible destacan: ser renovable, reducir la dependencia del país del petróleo y tener menores índices de emisión de gases de efecto invernadero que el petrodiesel. Entre estos gases destaca el CO₂, que contribuye al calentamiento global y será objeto de este estudio. Con base en los cálculos realizados considerando el consumo de petrodiesel en Río de Janeiro, se pretende cuantificar las emisiones por su uso hasta 2030 en la flota de buses urbanos

de la ciudad de Río de Janeiro y, paralelamente, calcular el potencial de reducción de emisiones con el uso de biodiesel en los porcentajes establecidos por el gobierno brasileño en el mismo.

PALABRAS CLAVE: Biodiésel; Transporte Público por Carretera; Emisiones de CO₂; Gases de invernadero.

Abstract

For several years, the use of oil to move vehicles, transport people, generate energy and other activities necessary for social life, has made the world very dependent on this input. Among the alternative fuels studied, we have the biodiesel, a fuel obtained through the transesterification process of vegetable oils or animal fats, which has become a potential substitute for petroleum diesel. Among the advantages of using this fuel, the following stand out: being renewable, reducing the country's dependence on oil, and having lower rates of greenhouse gas emissions than petrodiesel. Among those gases stands out the CO₂, which contributes to the global warming and will be the target of this study. Based on the calculations made taking into account the consumption of petrodiesel in Rio de Janeiro, it is intended to quantify the emissions from its use up to 2030 in the fleet of urban buses of the city of Rio de Janeiro and, in parallel, calculate the potential to reduce emissions with the use of biodiesel in the percentages established by the Brazilian Government in the same.

KEYWORDS: Biodiesel; Road Public Transportation; CO₂ Emissions; Greenhouse Gases.

1. Introdução

O desenvolvimento de motores de combustão interna ocorreu no final do século 18, que teve um desenvolvimento lento, mas constante nos primeiros 100 anos. Em 1892, a Rudolph Diesel recebeu a patente do motor de ignição por compressão que foi alimentado por pó de carvão, mas o projeto original não obteve sucesso (MA E HANNA, 1999).

Em 1859, o óleo foi descoberto na Pensilvânia, sendo usado principalmente para a produção de querosene. Rudolph Diesel usou vários derivados de petróleo em seus experimentos, sucedendo em seu primeiro protótipo do motor de ignição por compressão em 1895. Em Paris, no ano de 1900, um inventor usou o óleo de amendoim como combustível para seu motor, em Paris no ano de 1900, um inventor usava óleo de amendoim como combustível para seu motor, que foi uma das primeiras versões do motor a diesel usado em motores a diesel (ALTIN, CETINKAYA E YUCESU, 2001).

Aproveitando o baixo preço do petróleo que durou até o final do século 20, os motores diesel e diesel evoluíram gradualmente. Existem poucas referências a outra fonte de combustível para motores antes dos anos 70. Nas décadas de 1930 e 1940, por exemplo, outras fontes de energia, como o óleo vegetal, foram usadas como combustível apenas em emergências. Embora essa participação no biodiesel, os óleos vegetais e seus derivados tenham sido renovados devido ao aumento do preço do petróleo e também à preocupação ambiental (PINTO et al., 2001).

O Brasil se destaca entre os países interessados na produção de combustíveis alternativos ao diesel de petróleo devido ao seu alto potencial de produção de biodiesel. Biodiesel gerado através da transesterificação de óleos ou gorduras de sebo bovino ou óleos vegetais brutos, como óleo de amendoim, óleo de girassol, óleo de mamona, óleo de soja e outras culturas regionais brasileiras, além de óleo de fritura. O biodiesel é usado como parte de uma mistura com o petrodiesel, ele pode ser usado

em equipamentos industriais, máquinas agrícolas, construção civil, unidades de energia descentralizadas e veículos utilizados para o transporte de carga e passageiros.

Segundo (IEA, 2017), o transporte representa aproximadamente 50% do consumo de derivados de petróleo no mundo. No Brasil, esse número salta para aproximadamente 82,4% do consumo final de energia da petrodiesel, sendo o principal produto de petróleo importado pelo país. Deste percentual, 97% são utilizados apenas para o transporte de passageiros e cargas rodoviárias (BEN, 2017). O transporte rodoviário é o principal meio de transporte no país, respondendo por 61% de todos os embarques de carga (CNT, 2017).

Cerca de 87% das viagens de passageiros em meios coletivos de transporte no Brasil foram feitas por ônibus a diesel em 2014. Considerando as emissões de CO₂, os veículos usados pelas pessoas emitem 29,3 milhões de toneladas de poluentes por ano em suas viagens. A maioria (60%) é emitida por automóveis, seguida por ônibus (34%), segundo (ANTP, 2016).

No transporte público de passageiros, essa situação é ainda mais dependente do transporte rodoviário, uma vez que a maioria das grandes cidades brasileiras não possui sistemas alternativos de transporte com suficiente capilaridade para atender à população. Como consequência, as maiores cidades brasileiras apresentam altas taxas de gases poluentes e altas concentrações de CO₂ provenientes do uso de diesel para transporte.

Segundo o INEA (2016), na Região Metropolitana do Rio de Janeiro, no ano de 2015, 77% das emissões atmosféricas foram provenientes de fontes veiculares, incluindo a frota de transporte público de passageiros, e a cada ano esta taxa aumenta.

O Brasil encontrou no biodiesel uma alternativa energética ao diesel de petróleo reduzindo as emissões de CO₂ e o impacto ambiental, já que o biodiesel é uma fonte de energia renovável, reduzindo também a dependência do óleo diesel e aumentando a segurança energética no país.

2. Transporte público e rodoviário

2.1. Transporte público e rodoviário no Brasil

No Brasil, espera-se que o mercado automotivo continue a se expandir pelos próximos vinte anos, agravando problemas ambientais, como o aumento das emissões de gases de efeito estufa e problemas de infraestrutura, como condições das rodovias, mobilidade urbana e transporte de cargas (CNT, 2017).

A maioria dos gases causadores do efeito estufa provém das indústrias que necessitam de energia para a produção industrial e da queima do combustível necessário para o transporte de passageiros e carga rodoviária.

No Brasil, 61,1% das cargas são transportadas por rodovias, mostrando uma grande dependência da economia brasileira desse modal. Nas últimas décadas o país vem sofrendo com problemas de infraestrutura, pois não consegue manter as estradas em boas condições devido ao tamanho da malha rodoviária e ao grande número de veículos nas estradas, afetando a logística de transporte de cargas e passageiros. Sabendo disso, o principal desafio em termos de infraestrutura é alcançar maior eficiência por meio da integração intermodal (CNT, 2017).

Segundo a ANP (2018), esses problemas prejudicaram diversos setores econômicos, como agricultura, pecuária e mineração, complicando assim todo o sistema de transporte e comercialização de bens

produzidos. As estradas não devem ser a principal alternativa para o transporte de longa distância, muito comum em um país com dimensões continentais e características geográficas como o Brasil. A fim de reduzir o consumo de energia e as emissões de gases de efeito estufa, bem como reduzir os custos de empresas e indústrias com o transporte de seus bens e produtos, é necessário investir na criação de um sistema mais equilibrado, com maior participação de ferrovias e hidrovias no transporte logístico.

Em 2012, o PNLT (2012) já descrevia a necessidade do país de reduzir o volume de carga transportada por rodovia e investir em meios de transporte com menor impacto no meio ambiente. Segundo o PNLT, a estratégia para eliminar o gargalo encontrado nas rodovias brasileiras, o país precisa ampliar a participação das ferrovias no sistema de transporte de 25% para 32% e as hidrovias de 13% para 29% nos próximos 15 a 20 anos. O transporte através de oleodutos e transporte aéreo também deve aumentar sua participação para chegar a 5% e 1%, respectivamente, reduzindo assim a participação das estradas de 61,1% para 33%.

No entanto, dada a importância das estradas no país, sendo utilizada para o transporte de cargas e passageiros. Além disso, governos do passado eliminaram a infraestrutura de outras formas de transporte, incentivando a expansão e o uso de estradas.

No Brasil, o sistema de transporte tem a participação de estradas, ferrovias e hidrovias expressivamente diferentes de outros países de dimensões geográficas semelhantes. De acordo com o que foi mencionado anteriormente, o percentual de cargas transportadas pelas rodovias no Brasil é extremamente alto em relação aos demais meios de transporte.

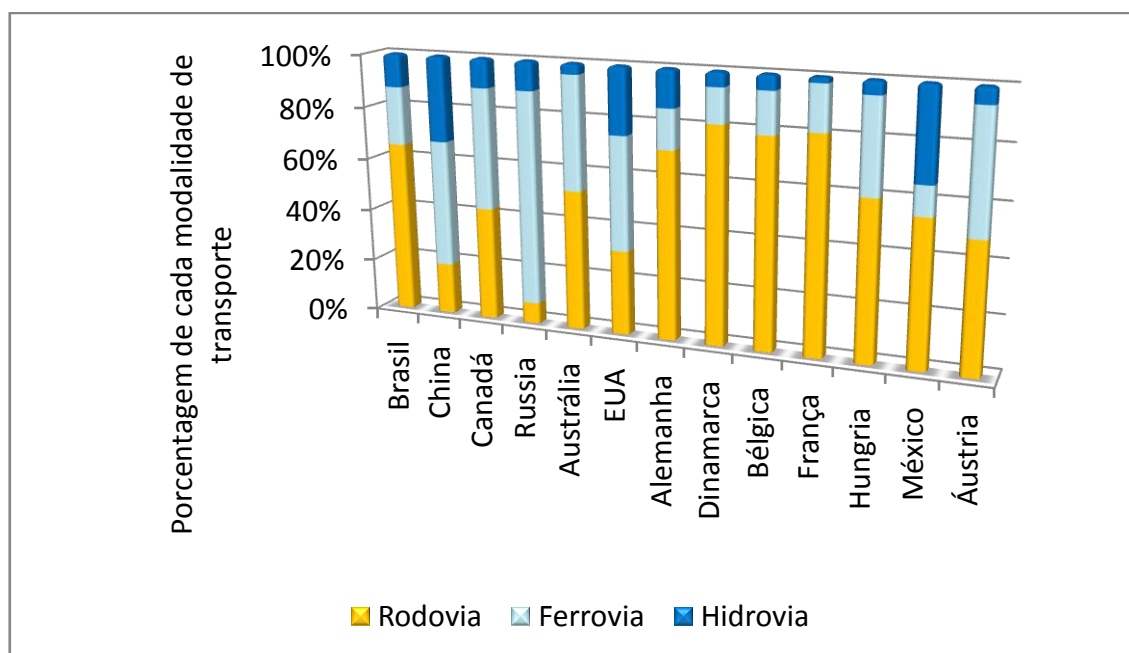
A figura 1 mostra a participação de diferentes países no transporte de cargas por estradas, ferrovias e hidrovias. Pode-se observar que em países com grandes territórios, com exceção do Brasil, a rodovia tem um papel menor no sistema de transporte, a preferência são as ferrovias.

Também podemos ver no gráfico que países com o menor território usam principalmente estradas como o principal meio de transporte, o mesmo é visto no Brasil, até mesmo a estrada não é o meio mais eficiente para um país maior.

Estas circunstâncias podem resultar do baixo valor do frete rodoviário, tornando impraticável o transporte multimodal, desencorajando a utilização de outros modos de transporte. Tendo em conta os custos incorridos no transporte de mercadorias, o valor aplicado ao frete é muito baixo, o que prejudica a eficiência do setor e impede a expansão de outros meios de transporte, como hidrovias e ferrovias, afetando negativamente a sociedade como um todo.

Como resultado, podemos ver que o maior obstáculo para o sistema de transporte no Brasil é o desequilíbrio entre o transporte rodoviário e outros modos. Enquanto países com dimensões continentais como China, Canadá, Rússia e Estados Unidos utilizam principalmente ferrovias e hidrovias para o transporte. Segundo a CNT (2018), cerca de 61,1% da carga total foi transportada por rodovia em 2011, totalizando 1,2 bilhão de toneladas, um aumento de 5,1% em relação a 2009.

Figura 1 - O uso de diferentes modos de transporte em outros países (tonelada x km)



Fonte: Adaptado da CNT (2018) e COPPEAD / UFRJ (2004)

As ferrovias, além de mais seguras, são capazes de transportar cargas maiores e mais pesadas quando comparadas ao transporte rodoviário. No entanto, o transporte rodoviário é a maneira preferida de transportar pequenas cargas, onde o remetente só precisa encher um caminhão antes de transportar a carga, ao contrário das ferrovias, onde, antes do transporte, um vagão inteiro deve ser preenchido. As entregas rodoviárias são razoavelmente mais rápidas e mais confiáveis para remessas LTL (menos de caminhão) (MURTA E FREITAS, 2018).

Portanto, o transporte rodoviário é a melhor opção para transportar produtos industriais de alto ou médio valor e pequeno volume em curtas distâncias. No entanto, devido ao baixo preço do frete rodoviário e à falta de investimentos em outros meios de transporte no Brasil, as estradas continuam sendo os principais meios de transporte para commodities, como soja, derivados de petróleo e cimento.

Segundo Araújo (2013), a preferência pelo transporte rodoviário no Brasil é resultado das baixas taxas de frete pagas, que não cobrem o custo real da atividade. Para tentar minimizar esta diferença, os operadores de transporte tentam obter mais contratos ao custo da rápida depreciação dos veículos utilizados para esse fim.

Murta e Freitas (2018) afirmam que as estradas são o segundo meio de transporte mais consumidor de combustível, perdendo apenas para o transporte aéreo. Consequentemente, o grande uso do transporte rodoviário contribui significativamente para o alto consumo de diesel no Brasil.

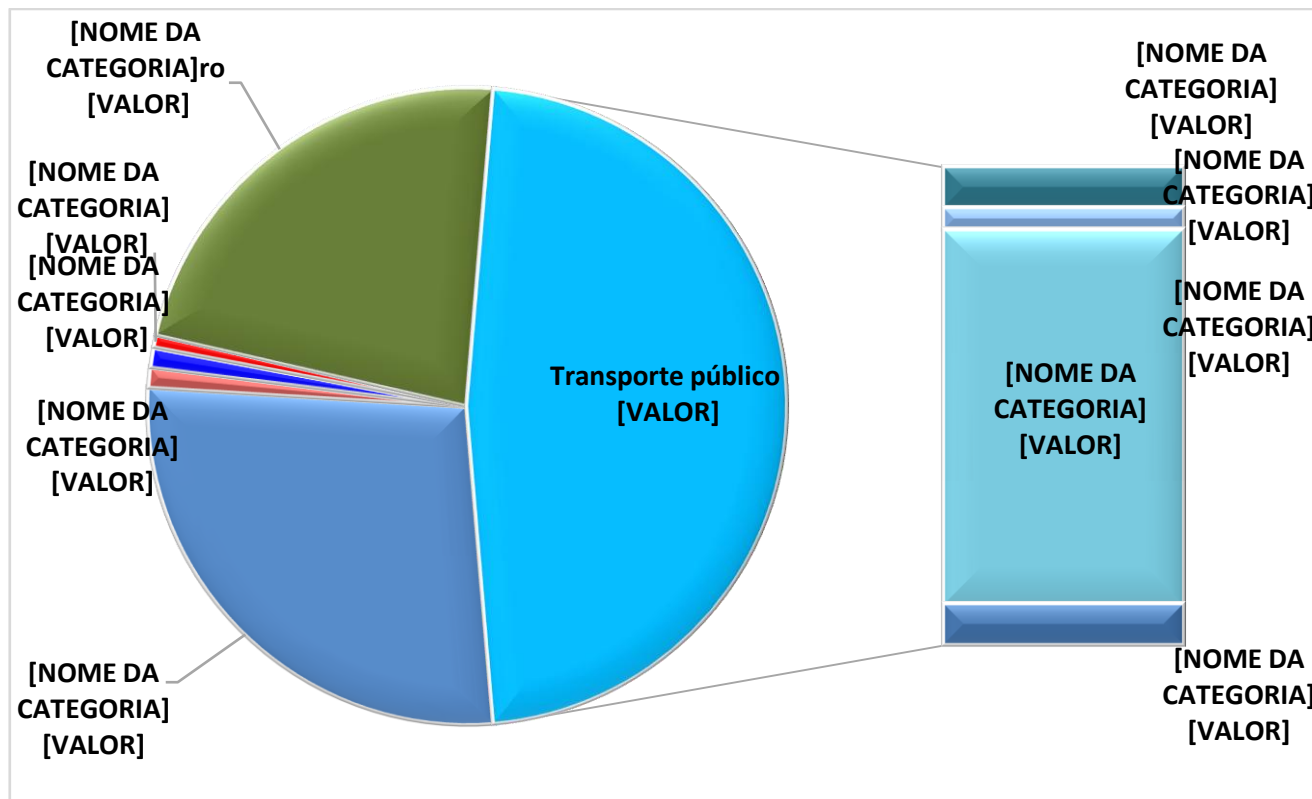
2.2. Transporte público e rodoviário no Rio de Janeiro

Devido à grande dimensão geográfica e integração com as cidades que compõem a região metropolitana, a população da cidade do Rio de Janeiro precisa realizar grandes deslocamentos diários para realizar suas atividades diárias.

Estes movimentos são principalmente realizados pelo sistema público de transporte de passageiros, seguido pelo deslocamento por meio de veículos particulares e outros meios de transporte. Vale

ressaltar que o sistema de ônibus urbano responde por cerca de 37,1% de todas as viagens realizadas nas cidades, seguido pelo transporte individual com 22,74%, o que demanda grandes quantidades de combustíveis fósseis para o seu funcionamento, como pode ser visto na figura 2.

Figura 2: Características de deslocamento na cidade do Rio de Janeiro



Fonte: Prefeitura do Rio de Janeiro (2016)

Estadependência de cerca de 59,84% de todas as deslocações por veículos de transporterodoviáriocontribuisignificativamente para o agravamento da qualidade do ar e para o aumento das emissões de gases com efeito de estufa, especialmente o dióxido de carbono.

2.3. Consumo de combustível rodoviário

Com o crescimento da frota de veículos, outraramificação do mercado se desenvolveu: oscombustíveis. Entre 2003 e 2017 a petrodieselfoi o combustível mais consumido, emboratenhamostradoumaqueda no consumo que pode ser observada de 2015 a 2016 (ANP, 2018). O biodiesel começou a ser adicionado à petrodiesel em 2005, seuproduto mais importante.

A Petrodiesel é usada principalmente por caminhões, ônibus, veículos comerciais leves ou automotivos. Seu consumo começou a diminuir em 2010 (11,15%) e 2011 (6,14%), muito provavelmente devido ao uso de veículos inteligentes para o transporte de cargas e ao aumento da participação das vias aéreas no transporte de passageiros e carga. Durante todo esse período, o consumo de gasolina oscilou. Em 2006 diminuiu, crescendo novamente em 2007. Em 2009, diminuiu devido ao crescimento do consumo de etanol. Com a queda na oferta de etanol em 2011, o consumo de gasolina voltou a crescer. Por sua vez, o etanol também sofreu flutuações do tipo gasolina. Diminuiu até 2003, provavelmente devido à menor produção de veículos a etanol. No final de 2009, os veículos flex-fuel, capazes de funcionar com

gasolina e etanol, chegaram ao mercado brasileiro, fazendo subir os preços do etanol, reduzindo a demanda.

A produção da Petrodiesel cresceu 4,65% em 2013, um aumento significativo em relação a 2012, atingindo quase 59 bilhões de litros. De 2016 a 2018, o crescimento foi de quase 1%, com um consumo de 54,8 bilhões de litros (ANP, 2018).

A partir desses dados, a venda de veículos aumenta, assim como o consumo de combustível, contribuindo para o desenvolvimento econômico do país. No entanto, esta situação de crescente demanda e produção também envolve aspectos negativos, como o crescimento da poluição do ar emitida por esses veículos. Segundo o Ministério do Meio Ambiente, o setor de transportes tornou-se o maior poluidor dos centros urbanos devido ao deslocamento do transporte de cargas em todo o país.

Para o transporte público de passageiros, segundo a ANTP (2016), a população brasileira consome cerca de 13,6 milhões de TEP (Toneladas Equivalentes de Petróleo) por ano em seus movimentos. A maior parte dessa energia (71%) é gasta no uso de carros. O transporte público responde por 24% do consumo de energia. Lembrando que o carro responde por apenas 29% do total de viagens, essa modalidade consome 71% do total de energia consumida na mobilidade urbana.

O sistema de ônibus urbano da cidade do Rio de Janeiro tem experimentado aumentos significativos no consumo total de óleo diesel. Em 1990, o consumo total da frota era de cerca de 202 milhões de litros de diesel. Nos próximos dez anos, o consumo aumentou em média 4,40%, para cerca de 285 milhões. De 2000 a 2010 houve uma ligeira queda no consumo médio de cerca de 0,92% e de 2010 para 2016 houve novamente um aumento médio de cerca de 0,52%, segundo a Fetranpor (2018).

De acordo com a Fetranpor (2018), estima-se que entre 2010 e 2020 deverá ocorrer um aumento médio no consumo de diesel de cerca de 1,29% no sistema urbano de ônibus da cidade do Rio de Janeiro, na ausência de mudanças no perfil de mobilidade urbana do município.

2.4. Gás com efeito de estufa produzido por transporte

Em 2015 e 2017, o aumento de CO₂ na atmosfera foi de quase 3 ppm, atingindo uma concentração total de 402,8 ppm. No mesmo período, as emissões de CO₂ do combustível fóssil permaneceram aproximadamente constantes. Em 2015, as emissões de CO₂ foram menores, mas mais variáveis, devido à mudança no uso da terra, devido ao aumento do número de incêndios e ao desmatamento. As emissões de CO₂ (combustíveis fósseis, indústria e mudanças no uso da terra) cresceram 1,1% em 2015, para um total de 41,5 bilhões de toneladas, e diminuiram 2,1% em 2016 (PETERS et al., 2017).

Segundo a ONU (2020), 78% dos gases de efeito estufa emitidos para a atmosfera estão ligados à queima de combustíveis fósseis, incluindo atividades e indústrias relacionadas a transportes. A qualidade do ar influencia diretamente a saúde das pessoas, pois causa doenças respiratórias e diminui a qualidade de vida. Por exemplo, uma pessoa nascida em São Paulo tem uma expectativa de vida de 3,5 anos menor do que outra que vive em Curitiba. A queima de combustíveis fósseis também provoca perdas financeiras, reduzindo o interesse em investir no país (MME, 2018).

De acordo com o inventário nacional de emissões de gases de efeito estufa, no Brasil as atividades com os maiores níveis de emissão são desmatamento, agricultura e pecuária. A poluição do ar encontrada nos centros urbanos é causada por veículos leves (ou automotivos); e também está relacionado ao transporte rodoviário de mercadorias. No Brasil, como em outros países, a rede de transporte depende principalmente de estradas.

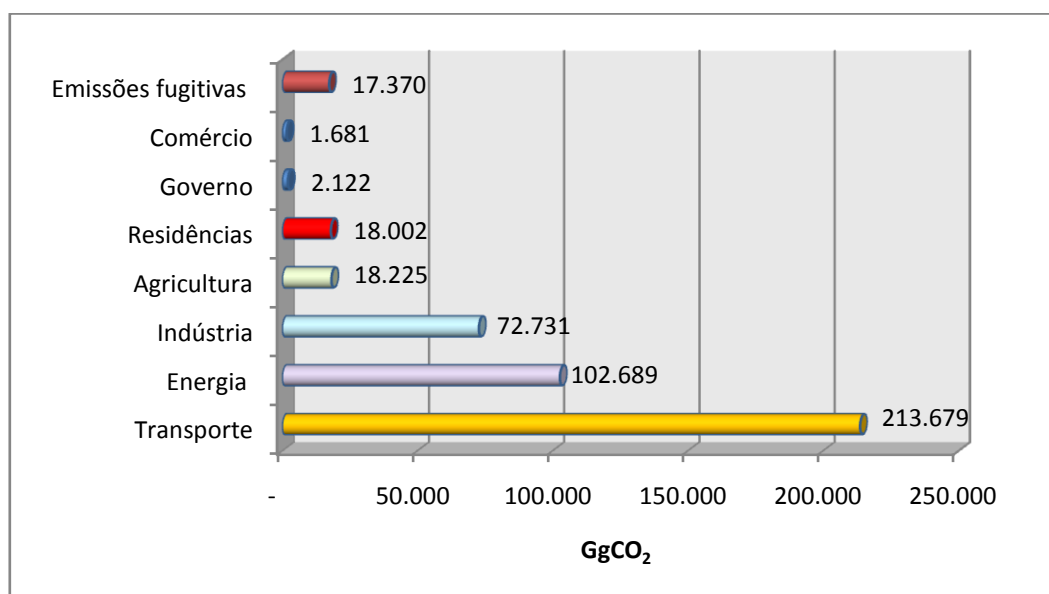
Segundo o SNEA (2019), se comparado a outros países, o Brasil tem baixa emissão de gases poluentes, nos últimos 40 anos o Brasil e a China aumentaram suas emissões de combustão de combustíveis. Embora as emissões brasileiras tenham aumentado de 91 para 360 Mt CO₂ por ano (300%) em 2019, as emissões chinesas aumentaram a uma taxa alarmante de 809 para aproximadamente 8.000 Mt de CO₂ (888%) nesse período.

Essa diferença nas emissões dos dois países pode ser explicada por dois fatores. A primeira é a taxa de crescimento do seu PIB na última década. Nos últimos 40 anos, o Brasil manteve uma taxa média de crescimento de 3,83% ao ano, enquanto a China cresceu incríveis 9,04% ao ano.

O segundo fator que influencia a diferença na emissão dos dois países é a matriz energética, enquanto 46% da matriz brasileira é composta de energia renovável, a China usa apenas 0,5%. A maior parte da produção de energia da China vem do carvão, que é o maior potencial para emissões de gases de efeito estufa entre todas as fontes de energia.

Em 2011, de acordo com o BEN (2017) da quantidade total de emissões igual a (192,0 MtCO₂eq) do setor de transporte, 395,8 MtCO₂eq foram causados pela atividade humana. Mesmo com o crescimento da frota automotiva no país, a emissão de CO₂ foi de 0,16 kg CO₂ / US \$ em 2011, que é duas vezes menos intensiva em carbono do que a economia dos Estados Unidos, 1,4 vezes menor que a economia europeia e 2,8 Chinês. A figura 3 mostra as emissões de cada setor no Brasil.

Figura 3 - O total de emissões de CO₂ em cada setor no Brasil (2018)



Fonte: Adaptado do MME (2018)

Com base nos dados e informações que podemos ver na figura acima, devido à crescente frota brasileira de veículos, espera-se um aumento na demanda de energia e nas emissões de gases CO₂. A fim de manter as emissões sob controle sem afetar o crescimento do setor industrial, é necessário investir em fontes de energia renováveis, que têm menos potencial para a emissão de poluentes gasosos, em particular os biocombustíveis usados nos transportes e a biomassa que pode ser usado para geração de energia e fins industriais.

Os veículos usados individualmente no Brasil emitem 528 mil toneladas de poluentes locais por ano em seus deslocamentos. A maioria (59%) é emitida por automóveis, seguidos por ônibus (21%), segundo a ANTP (2018).

Como já mencionado, na Região Metropolitana do Rio de Janeiro, composta por 19 municípios, cerca de 77% das emissões atmosféricas são causadas pelo uso de veículos em geral, enquanto os 23% restantes são provenientes do setor petroquímico, naval, químico, alimentício e transformação de energia.

2.5. Uso e produção de biodiesel no Brasil

Os biocombustíveis podem ser usados para substituir total ou parcialmente combustíveis derivados de petróleo ou gás natural em motores e geradores de energia, são produzidos a partir de gordura animal ou óleo vegetal quimicamente reagido com álcool e podem ser adicionados ao petrodiesel em várias proporções. No Brasil, os principais biocombustíveis são o etanol extraído da cana-de-açúcar e do biodiesel (MURTA E FREITAS, 2018).

A participação do biodiesel na matriz energética brasileira vem crescendo a cada dia, apoiada na teoria de que é capaz de substituir o petrodiesel em todas as suas aplicações. Assim, o biodiesel foi introduzido em mercados específicos para garantir a eficiência de sua expansão.

Segundo Pereira et al. (2012), O consumo de biodiesel pode ser dividido em dois mercados: geração estacionária de energia e veículos automotores. O primeiro é para a geração de energia para fins específicos ou para atender locais remotos ou áreas onde ocorrem falhas de suprimento. A quantidade de energia gerada não é significativa, mas representa considerável economia nos custos de transporte e, mais importante, promove a cidadania e a inclusão social das comunidades locais.

O mercado automotivo é dividido em dois grupos, sendo o primeiro impulsionado por grandes consumidores com circulação geográfica limitada: empresas de transporte urbano, transporte ferroviário e aquaviário, entre outros. O segundo é a venda de combustível em estações regulares, relacionadas ao transporte de cargas interestaduais e de passageiros e consumidores em geral. É importante ressaltar que no Brasil o biodiesel é utilizado principalmente como combustível para veículos, deixando o uso para geração secundária de energia.

A Lei nº 1.107, de 2005, instituiu o Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB), com o objetivo de incentivar pequenos produtores e promover o desenvolvimento socioeconômico. Regras adicionais foram posteriormente incluídas no programa, indicando que uma mistura de 2% de biodiesel (B2, composto de 2% de biodiesel e 98 diesel) se tornaria obrigatória a partir de janeiro de 2008, um percentual que aumentou em julho de 2008 (para 3%) e julho de 2009 (para 4%). Estabeleceu-se originalmente que a mistura seria 5% de biodiesel em janeiro de 2013, mas este aumento entrou em vigor em janeiro de 2010. O governo também determinou que a porcentagem de biodiesel na mistura atingiria 6% em julho de 2014 e 7% entre novembro de 2014 e fevereiro de 2017. A partir de março de 2017, o lote passou a ser de 8% (MME, 2018).

Apesar do MME (2018), o percentual de biodiesel na mistura com diesel aumentará para 9% em 2018 e, no futuro, para 10% em 2019. Até 2025, a porcentagem em vigor deve ser de 15% e em 2030 aumentará 20%, o que exigirá maiores quantidades produtivas deste biocombustível.

Segundo estimativas da APROBIO (2016), a produção de biodiesel deverá atingir 18 bilhões de litros até 2030 e o consumo de diesel deverá atingir 90 bilhões de litros.

Em 2015, a Agência Nacional do Petróleo possuía 53 usinas de produção de biodiesel com licenças de operação, com capacidade total de produção de 20.366,10 m³ / dia.

Em reação à queima de combustível, o plantio de sementes oleaginosas e a produção de biodiesel são muito menos exigentes em termos de energia do que a queima de combustível, levando a balanços energéticos altamente positivos. A transformação do biodiesel em energia é feita em um ciclo fechado de carbono. O dióxido de carbono resultante da queima do combustível é absorvido pela fotossíntese (PEREIRA et al., 2012).

Devido à sinergia entre o complexo oleaginoso e o etanol, a produção de etanol precisa ser intensificada. O etanol é utilizado na produção de biodiesel por transesterificação de etila, aumentando a demanda por etanol. Por isso, o mercado de biodiesel promove o desenvolvimento da indústria sucroalcooleira, gerando novos investimentos no setor.

Para aumentar a viabilidade econômica da produção de biodiesel, seus subprodutos (bagaço, farelo, glicerina e lecitina) precisam ser estudados e desenvolvidos.

Muitas usinas no Brasil são capazes de produzir biodiesel a partir de oleaginosas como amendoim, babaçu, girassol, mamona, palma e soja. Essas fontes de matéria-prima podem ser encontradas em várias regiões do Brasil. Segundo APROBIO (2016), no Brasil, o biodiesel é produzido principalmente a partir de óleo de soja (77%), sebo bovino (18%) e outros (5%).

As plantações são muito comuns na América do Sul, principalmente porque não precisam limpar novas áreas para o plantio. São amplamente utilizados na produção de biomassa como fonte de óleos vegetais, o que indica que a capacidade de produção de biodiesel pode ser ampliada sem agredir o meio ambiente.

O biodiesel está em grande demanda em áreas urbanas, rodovias, ferrovias, transporte hidroviário de cargas e passageiros, motores estacionários e geradores de energia. Quanto ao suprimento para atender a toda essa demanda, muitas oleaginosas não são utilizadas para a produção de biodiesel. Entre as diversas matérias-primas para a produção de biodiesel, o óleo de palma destaca-se pelo alto rendimento por hectare (PEREIRA et al., 2012).

Segundo a ANP (2018), iniciativas como o Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB), que visa aumentar a oferta de biodiesel no Brasil, incitam a uma maior demanda de mercado por biocombustíveis e estimulam investimentos privados no setor. O PNPB admite que o investimento econômico para difundir o uso do biodiesel no país está relacionado ao crescimento do mercado interno e à conquista do mercado internacional. Para que as empresas possam trabalhar com eficiência, as políticas públicas devem oferecer as condições necessárias para que as empresas trabalhem de maneira eficiente, promovendo a inclusão social e o desenvolvimento de todas as regiões, de acordo com o conceito mais amplo de sustentabilidade. Nesse sentido, o grande potencial do Brasil é divergente, considerando que sua participação de mercado ainda é pequena em comparação com a Alemanha e os Estados Unidos, conforme mostra a Tabela 1.

Tabela 1 – Produção mundial de biodiesel: MME

Produção de Biodiesel e Participação do Mercado Mundial			
Posição	Países	Ton (Milhões)	%
1	USA	4,113	14.4
2	Alemanha	3,352	11.7
3	Argentina	3,074	10.8
4	Indonésia	2,936	10.3
5	Brasil	2,567	9.0
6	França	2,360	8.3
7	Holanda	1,720	6.0
8	Espanha	1,212	4.2
9	Tailândia	1,009	3.5
10	Polônia	739	2.6
11	Malásia	696	2.4
12	Itália	580	2.0
13	China	400	1.4
14	Bélgica	374	1.3
15	Coréia do Sul	358	1.3
	Outros	3,059	10.7
	Mundo	28,549	100.0

Fonte: MME (2018)

3. Metodologia

Para o cálculo da redução de CO₂ emitida pelo uso do biodiesel no sistema rodoviário brasileiro, a metodologia Top Down foi elaborada pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 1996) autorizando a aplicação do consumo final de combustível de ônibus urbanos na cidade. do Rio de Janeiro (FETRANSPOR, 2018).

Para o cálculo das emissões de CO₂, é crucial atingir o nível de consumo de combustível. No inventário de emissões do IPCC, o consumo corresponde à quantidade de combustível consumida pelo país.

No entanto, a petrodiesel não será substituída pelo biodiesel de uma só vez, o biodiesel será adicionado à petrodiesel seguindo a legislação governamental descrita no item 5 deste artigo. Como consequência, o cálculo das emissões de carbono foi feito de acordo com os níveis de mistura de biodiesel com petrodiesel determinados para os anos estudados.

Uma vez descoberto o consumo, dividimos a aplicação metodológica em seis etapas: cálculo do consumo de energia, cálculo da quantidade de carbono, cálculo da quantidade fixa de carbono, cálculo das emissões líquidas de carbono, cálculo das emissões reais de carbono e cálculo das emissões de CO₂. Essas etapas são descritas a seguir e os resultados serão discutidos na próxima seção.

3.1. Cálculo de quantidades fixas de carbono

Quando os combustíveis não são usados para fins energéticos, parte do carbono permanece fixo ou armazenado. Neste estudo, o petrodiesel foi utilizado para fins energéticos, portanto, a quantidade de carbono fixo é zero. No biodiesel, a quantidade de carbono armazenado na biomassa é de 40%.

3.2. Cálculo das emissões líquidas de carbono

As emissões líquidas de carbono são o cálculo da massa entre o carbono no combustível menos a quantidade fixa de carbono dos usos não energéticos.

3.3. Cálculo das emissões reais de carbono

Quando um inventário de emissões está sendo desenvolvido, nem todo carbono no combustível é considerado oxidado, já que a combustão total quase nunca ocorre. Cerca de 1% do carbono não é oxidado, sendo incorporado em cinzas ou outros subprodutos. Consequentemente, as emissões reais de carbono são equivalentes a 99% das emissões líquidas de carbono.

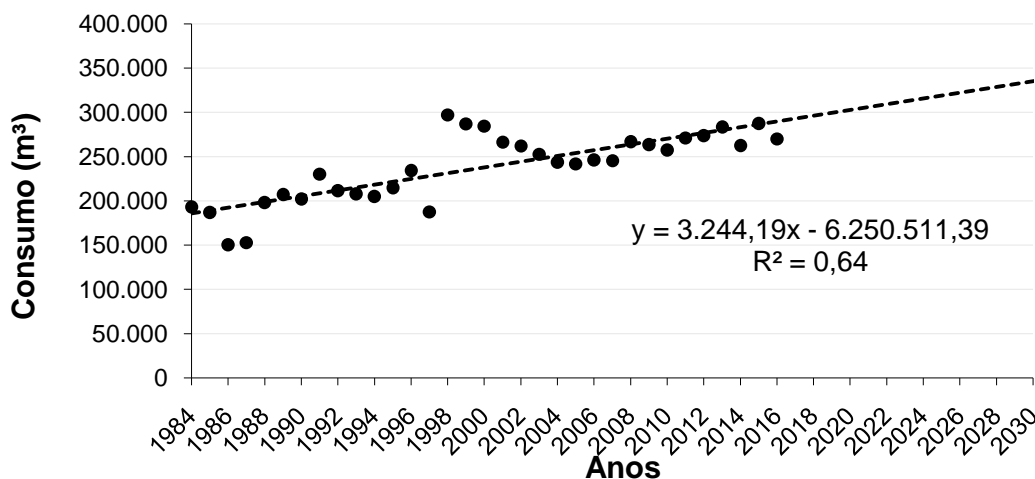
3.4. Cálculo das emissões reais de CO₂

Para calcular as emissões reais de CO₂, foi utilizado o nível real de emissões de carbono, levando em conta o teor de carbono da molécula: a cada 44 toneladas de CO₂, 12 toneladas são carbono. Portanto, as emissões de CO₂ são equivalentes a 44/12 emissões de carbono.

4. Resultados

Utilizando dados coletados pela Fetranspor (2018), publicados anualmente, foi concebida uma projeção do consumo de petrodiesel em ônibus urbanos no Rio de Janeiro entre os anos de 2017-2030 em relação ao consumo real de 1984 a 2016. Para obter a tendência, foi utilizada uma regressão linear, como mostra a Figura 5:

Figura 4 - Tendência de crescimento do consumo de petrodiesel



Fonte: Adaptado de Fetranspor (2018)

Levando-se em conta os valores fornecidos pela regressão, estimaram-se os níveis de biodiesel e diesel levando em conta as regulamentações do governo brasileiro quanto aos percentuais de mistura e as datas em que entram em vigor. Portanto, levando em consideração o consumo volumétrico de combustíveis para os percentuais de 2%, 5%, 7%, 8%, 9%, 10%, 15% e 20% (para os períodos 2005-2007, 2008-2013, 2014-2016, 2017, 2018, 2019-2024, 2025-2029 e 2030) do total de petrodiesel consumido pela frota de ônibus

do Rio de Janeiro, aplicando a metodologia de cálculo Emissões de CO₂, chegamos aos resultados apresentados nas tabelas 2 e 3.

Tabela 2 - Resultados do uso da metodologia para emissões de CO₂ do petrodiesel

Ano	Consumo de Petrodiesel (m ³)	Energia Consumida (TJ)	Quantidade de carbono (GgC)	Quantidade de carbono fixo (GgC)	Emissões líquidas de carbono (GgC)	Emissões reais de carbono (GgC)	Emissões reais de CO ₂ (GgC)
2005	4.842	172	3	0,00	3	3	13
2006	4.924	175	4	0,00	4	3	13
2007	4.916	175	4	0,00	4	3	13
2008	13.348	474	10	0,00	10	9	35
2009	13.180	468	9	0,00	9	9	34
2010	12.879	457	9	0,00	9	9	34
2011	13.570	482	10	0,00	10	10	35
2012	13.683	486	10	0,00	10	10	36
2013	14.174	503	10	0,00	10	10	37
2014	18.378	653	13	0,00	13	13	48
2015	20.130	715	14	0,00	14	14	52
2016	18.923	672	14	0,00	14	13	49
2017	23.442	832	17	0,00	17	17	61
2018	26.664	947	19	0,00	19	19	69
2019	29.951	1.063	21	0,00	21	21	78
2020	30.275	1.075	22	0,00	22	21	79
2021	30.600	1.086	22	0,00	22	22	80
2022	30.924	1.098	22	0,00	22	22	81
2023	31.248	1.110	22	0,00	22	22	81
2024	31.573	1.121	23	0,00	23	22	82
2025	47.846	1.699	34	0,00	34	34	125
2026	48.333	1.716	35	0,00	35	34	126
2027	48.819	1.733	35	0,00	35	35	127
2028	49.306	1.751	35	0,00	35	35	128
2029	49.793	1.768	36	0,00	36	35	130
2030	67.039	2.380	48	0,00	48	48	175

Fonte: O autor (2018)

Tabela 3 - Resultado do uso da metodologia para as emissões de CO₂ do biodiesel

Ano	Consumo de Petrodiesel (m ³)	Energia Consumida (TJ)	Quantidade de carbono (GgC)	Quantidade de carbono fixo (GgC)	Emissões líquidas de carbono (GgC)	Emissões reais de carbono (GgC)	Emissões reais de CO ₂ (GgC)
2005	5.380	178	4	1	2	2	8
2006	5.471	181	4	1	2	2	8
2007	5.462	181	4	1	2	2	8
2008	14.831	492	10	4	6	6	21
2009	14.645	486	10	4	6	6	21
2010	14.310	475	9	4	6	6	21
2011	15.077	500	10	4	6	6	22
2012	15.204	504	10	4	6	6	22
2013	15.749	522	10	4	6	6	23
2014	20.420	677	13	5	8	8	29
2015	22.367	742	15	6	9	9	32
2016	21.025	697	14	6	8	8	30
2017	26.046	864	17	7	10	10	37
2018	29.626	982	20	8	12	12	43
2019	33.279	1.104	22	9	13	13	48
2020	33.639	1.116	22	9	13	13	48
2021	34.000	1.127	22	9	13	13	49
2022	34.360	1.139	23	9	14	13	49
2023	34.721	1.151	23	9	14	14	50
2024	35.081	1.163	23	9	14	14	50
2025	53.162	1.763	35	14	21	21	76
2026	53.703	1.781	35	14	21	21	77
2027	54.244	1.799	36	14	21	21	78
2028	54.784	1.817	36	14	22	21	79
2029	55.325	1.835	36	15	22	22	79
2030	74.488	2.470	49	20	29	29	107

Fonte: O autor (2018)

Dos cálculos acima, obteve-se um resultado total de 1.819.215 toneladas de CO₂ emitidas para consumo de petrodiesel e 1.114.595 toneladas para consumo de biodiesel, conforme mostra a Tabela 4 abaixo:

Tabela 4 - Redução de emissões através do uso de biodiesel

Anos	Ton. CO ₂		
	Emissões de Petrodiesel	Emissões de Biodiesel	Emissões Evitadas
2005 - 2012	398.196	243.967	154.230
2013 - 2025	1.421.018	870.628	550.390
2005 - 2025	1.819.215	1.114.595	704.620

Fonte: O autor (2018)

Tendo em conta que a frota rodoviária irá aumentar gradualmente o consumo de biodiesel, um total de 704.620 toneladas de CO₂ deverá deixar de ser emitido, as emissões de gásóleo reduziria em 38,73%.

7. Considerações Finais e Recomendações

O uso de petrodiesel como fonte de energia vem se expandindo globalmente, e o Brasil não é diferente, aumentando as emissões de gases de efeito estufa. Essa expansão é intolerável a longo prazo, levando em conta questões ambientais, econômicas e sociais. Na vanguarda do uso de energias renováveis, no Brasil o percentual de uso chega a 46%, enquanto no resto do mundo esse percentual representa apenas 12,9% (PEREIRA et al., 2012).

O sistema de transporte, especialmente os ônibus urbanos, continua extremamente dependente do petrodiesel. Os governos estão trabalhando com empresas para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e o impacto ambiental da atividade. O Brasil progrediu no estabelecimento de políticas públicas para aumentar o uso de fontes renováveis sem prejudicar o crescimento econômico, além de contribuir para as mudanças climáticas, especialmente no campo energético.

O principal ponto discutido neste artigo é o uso do biocombustível como forma de reduzir as emissões de gases de efeito estufa e mitigar os impactos ambientais causados pelo transporte de ônibus urbanos no Rio de Janeiro.

Levando-se em conta os cálculos apresentados neste trabalho, quando o biodiesel é adicionado ao petrodiesel, as emissões de CO₂ diminuem aproximadamente 39%, levando em consideração os percentuais de consumo analisados.

No final de 2017, o Brasil passou a utilizar 8% de biodiesel em seu mix de diesel se tornando o país com o maior percentual de mistura biodiesel-diesel no mundo.

Como resultado, a substituição do petrodiesel pelo biodiesel leva a uma redução significativa na emissão de gases causadores do efeito estufa. No entanto, mais do que reduzir a emissão de gases de efeito estufa em níveis seguros, também são necessárias políticas públicas voltadas para a expansão do transporte multimodal, a reestruturação da malha viária, a regulação e a supervisão de transportes e o financiamento de infraestrutura.

Além disso, são necessárias políticas sustentáveis de transporte para incentivar investimentos em meios de transporte não poluentes (com ou sem emissões de gases de efeito estufa), para melhorar o planejamento rodoviário, reduzindo o tempo de transporte de frete e passageiros para as empresas (custos de transporte) e economia de energia, que está diretamente relacionada à emissão de gases de efeito estufa.

Como possível trabalho futuro, recomenda-se a realização de cálculos dos níveis de emissão das diferentes oleaginosas encontradas no Brasil que são utilizadas na produção de biodiesel, a fim de verificar possíveis diferenças entre essas sementes. Além disso, a análise do sistema de transporte como um todo.

REFERÊNCIAS

ALTIN, R.; CETINKAYA, S.; YUCESU, H.S., O potencial de usar combustíveis de óleo vegetal como combustível para motores diesel. *Conversa de energia*. Gerir. 42, 529-538, 2001.

ANP - AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. *Estatística sobre o consumo de óleo diesel no Brasil e como importação*. ANP: Rio de Janeiro. 2018.

ANTP - ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES PÚBLICOS. *Sistema de informações da mobilidade urbana*. 2016. Disponível em: <http://www.antp.org.br>. Acesso em 20 de maio de 2020.

APROBIO - ASSOCIAÇÃO DOS PRODUTORES DE BODIESEL. *Cenários para o biodiesel em 2030*. 2016. Disponível em: <http://aprobio.com.br/>. Acesso em 24 de maio de 2020.

ARAÚJO, M.P.S. *Análise dos Fretes Praticados pelos Transportadores Rodoviários de Carga*. **Dissertação**. Mestrado em Engenharia de Transportes, Departamento de Ciência e Tecnologia, Instituto Militar de Engenharia (IME), Rio de Janeiro. Dezembro de 2013.

BEN - BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL. *Relatório de Emissões*. 2017. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/>. Acesso em 05 de junho de 2020.

CNT - CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES. *Boletim estatístico 2017*. 2017. Disponível em: <http://www.cnt.org.br/Paginas>. Acesso em 02 de novembro de 2020.

COPPEAD / UFRJ - COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA EM ADMINISTRAÇÃO - UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO. *Transporte de Carga no Brasil, Ameaças e Oportunidades para o Desenvolvimento do País - Diagnóstico e Plano de Ação*, Rio de Janeiro. 2004.

FETRANSPOR - FEDERAÇÃO DAS EMPRESAS DE TRANSPORTES DE PASSAGEIROS DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO. *Relatório de Transportes Urbanos 2018*. PMRJ: 2018. Disponível em: www.fetranspor.com.br. Acesso em 09 de janeiro de 2021.

IEA - AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA. *Emissões de CO₂ provenientes da combustão de combustíveis*. 2017. Disponível em: <http://www.iea.org/>. Acesso em 10 de janeiro de 2021.

INEA - INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE. *Relatório da Qualidade do Ar do Estado do Rio de Janeiro*. 2016. Disponível em: <http://www.inea.rj.gov.br/>. Acesso em 03 de julho de 2018.

IPCC - PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE A MUDANÇA CLIMÁTICA, 1996. *Manual de Referência de Inventário de Gases*, capítulo 6. MMA: Brasília. 1996.

MA, F.; HANNA, M.A.. Produção de biodiesel: uma revisão, *Bioresour. Technol.* 70, 1-15. 1999.

MME - MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. *Dados estatísticos*, Brasília, 2018. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/mme>. Acesso em 02 de fevereiro de 2019.

MURTA, A.L.S., FREITAS, M.A. V., Emissões de CO₂ evitadas com o uso de biodiesel no sistema rodoviário brasileiro. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 2018.

PEREIRA, M. G., Camacho, C. F., Freitas, M.A.V., Silva, N.F.. O mercado de energia renovável no Brasil: status atual e potencial. *Energia Renovável Sustentável Rev.* 16, 3786–3802, 2012.

PETERS, P. G.; LE QUÉRÉ, C.; ANDREW, R. M.; CANADELL, J. G., FRIEDLINGSTEIN, Pierre; ILYINA, T.; JACKSON, R. B., KORSBAKKEN, J. I.; MCKINLEY, G. A.; SITCH, S.; TANS, P. Para a verificação em tempo real das emissões de CO₂. *Journal Nature Climate Change*, 848 - 850, 2017.

PINTO, R.R.C. et. al.. *Caracterização do Biodiesel para uso automotivo*. **Anais** do Seminário AEA de Biodiesel, São Paulo, 2001.

PNLT - PLANO NACIONAL DE LOGÍSTICA DE TRANSPORTES. Ministério dos Transportes. 2012. Disponível em: <http://www2.transportes.gov.br/bit/01-inicial/pnlt.html>. Acesso em 03 de julho de 2018.

PREFEITURA MUNICIPAL DO RIO DE JANEIRO. *Relatório Transporte Coletivo*, 2016. Disponível em: <http://www.rio.rj.gov.br>. Acesso em 10 de junho de 2018.

SNEA - SINDICATO NACIONAL DAS EMPRESAS AEROVIÁRIAS. *Mercado Doméstico: Transporte Aéreo de Passageiros*, 2019. Disponível em: <http://www.snea.com.br/>. Acesso em 04 de abril de 2020.

ONU - Nações Unidas. *PNUD - Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento*. Disponível em: <http://www.onu-brasil.org.br/>. Acesso em 05 de maio de 2021.

Recebido em: 01.11.2022

Aceito em: 21.10.2022

Endereço para correspondência:

Nome Aurélio Lamare Soares Murta

email rev.tema@gmail.com



Esta obra está licenciada sob uma [Licença Creative Commons Attribution 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)