



Fortaleza, Ceará
Centro de Eventos do Ceará

INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY

Optimizing renewable energy: advanced strategies for enhanced efficiency and sustainability

REVELANDO OS TRADE-OFFS AMBIENTAIS DO BIODIESEL: UMA AVALIAÇÃO COMPARATIVA DO CICLO DE VIDA EM ÔNIBUS URBANOS

Autores: Franciele Alves Barboza¹, Robson Ferreira da Cruz², Renan Siqueira Carpviki³, Joaquim Eugênio Abel Seabra⁴, Carla Kazue Nakao Cavaliero⁵, Marcela Cravo Ferreira⁶

¹Unicamp – fl171736@dac.unicamp.br; ²Unicamp – robson.cruz@bceconsulting.com.br; ³Unicamp – r186497@dac.unicamp.br; ⁴Unicamp – jseabra@fem.unicamp.br; ⁵Unicamp – cavalier@unicamp.br; ⁶Unicamp – mcraivo@unicamp.br

RESUMO

Este estudo apresenta uma Avaliação do Ciclo de Vida comparativa de ônibus urbanos movidos a Diesel S10 com três misturas: B7 (7% biodiesel), B15 (15% biodiesel) e B100 (100% biodiesel). Utilizando a abordagem “do poço à roda”, a análise abrange as etapas de extração, produção, distribuição e uso dos combustíveis, bem como a produção e manutenção dos veículos. Os métodos CML-IA e ReCiPe 2016 (Midpoint e Endpoint) foram aplicados para quantificar os impactos ambientais. Os resultados indicam que o B100 reduz de forma expressiva o potencial de Aquecimento Global, mas apresenta maiores impactos em Eutrofização, Depleção Abiótica e Ecotoxicidade. A análise de sensibilidade em função da lotação dos veículos revelou maior variabilidade para o B100. Conclui-se que a escolha do combustível ideal dependerá da priorização das categorias de impacto, fornecendo subsídios para a implementação de políticas de transporte sustentável.

Palavras-chave: Análise do ciclo de vida¹; Biodiesel²; Ônibus Urbano³; Diesel⁴.

1 INTRODUÇÃO

Este estudo insere-se no contexto de uma Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) de ônibus urbanos movidos a Diesel S10 B7, B15 e B100, destinado ao transporte público na cidade de Campinas, SP. A cidade passa por um processo de nova licitação do transporte público e o estabelecimento de parâmetros que avaliem as tecnologias disponíveis e seus devidos impactos auxiliam nas condições de contorno dos termos da licitação, no processo de tomada de decisão do poder público e na formulação de políticas públicas.

2 METODOLOGIA

Adotou-se a abordagem atribucional, seguindo os passos metodológicos preconizados pela norma ISO 14040, vide Figura 1:

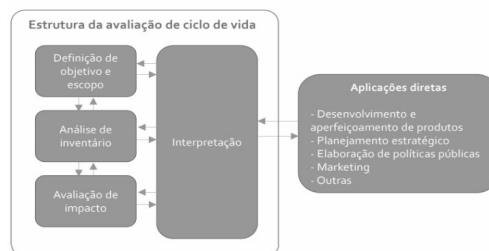


Figura 1: Passos para execução de uma ACV, conforme norma ISO 14040.

Fase de definição de objetivo e escopo

Objetivo

Conforme exposto anteriormente, este trabalho teve como objetivo comparar os impactos ambientais de ônibus urbanos movidos a Diesel S10 B7, B15 e B100, destinados ao transporte público na cidade de Campinas, no Estado de São Paulo. Esta análise se justifica, em um cenário que as autoridades de transporte municipais têm discutido estratégias para a implementação de novas



Fortaleza, Ceará
Centro de Eventos do Ceará

INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY

Optimizing renewable energy: advanced strategies for enhanced efficiency and sustainability

tecnologias veiculares nas renovações de frota, em face ao período de renovação dos contratos de concessão do transporte. A escolha tecnológica exerce forte influência no equilíbrio econômico-financeiro da concessão, que define em grande medida a eventual subvenção financeira do poder público para custeio do sistema de transporte, o horizonte de reajuste de tarifas, a qualidade do transporte propriamente dito, a atualização tecnológica da frota e a resposta às metas de emissões de GEE preconizados nos planos municipais. Particularmente, a cidade de Campinas encontra-se neste cenário: caminha para a renovação da concessão de transporte e, portanto, tem discutido estrategicamente como endereçar as questões de qualidade de transporte, com a inserção de tecnologias veiculares que preconizam a mitigação das emissões locais e de CO₂, tendo modicidade nos preços da tarifa pública proposta à população campineira. Neste sentido, esta análise interessa ao poder público, pois qualifica o desempenho ambiental das configurações estudadas, mas também aos operadores de transporte, que são instrumentalizados com informações que qualificam as suas escolhas e permitem percepção mais abrangente dos impactos das tecnologias disponíveis na frota atual e/ou futura.

Fronteiras do sistema (Função e Sistema considerado)

O sistema analisado refere-se ao transporte coletivo urbano, com fronteira **Poço-à-Roda (Well-to-Wheel)**, abrangendo extração, produção, distribuição e uso do combustível. Também foram incluídos inventários de produção e manutenção do veículo, apenas para avaliar sua sensibilidade nos impactos, mas sem configurar a fronteira **Berço-à-Roda**.

Não foram considerados os bens de capital (máquinas, equipamentos e infraestrutura), por terem impactos menos relevantes frente aos processos operacionais. O

sistema é composto por ônibus a combustão ciclo Diesel, com pós-tratamento SCR e uso de ARLA 32, avaliando três cenários de combustível: **Diesel S10 B7 (7% biodiesel)**, **B15 (15% biodiesel)** e **B100 (100% biodiesel)**.

As Figuras 2 e 3 representam os sistemas de produto para BX (B7 e B15) e B100, respectivamente.

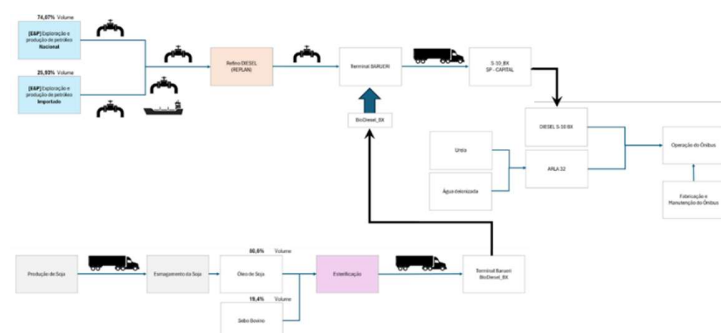


Figura 2: Sistema de Produto para o BX (B7 e B15).

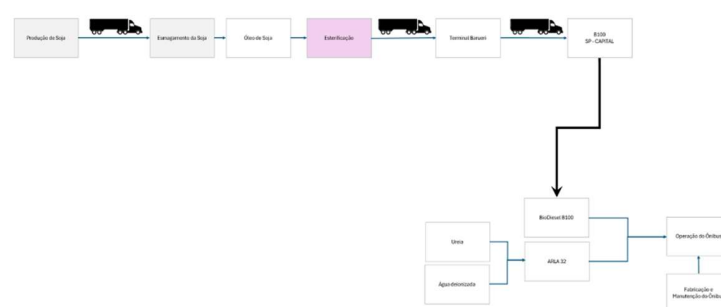


Figura 3: Sistema de Produto para o B100.

Unidade funcional e considerações dos processos principais

A unidade funcional adotada é de 1 km percorrido, tendo o sistema de produto BX (B7 e B15) a mistura de Diesel com Biodiesel de Soja + Sebo Bovino. Para o sistema de Produto B100, o Biodiesel é originado somente da Soja.

Escopos

Geográfico

Considerada a exploração e produção de Diesel, Soja e Sebo Bovino segundo o perfil nacional. Refino na



Fortaleza, Ceará
Centro de Eventos do Ceará

INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY

Optimizing renewable energy: advanced strategies for enhanced efficiency and sustainability

REPLAN. Produção, Manutenção e Uso do veículo no Estado de São Paulo. Para o Diesel, considerou-se 74% de volume produzido nacionalmente e 26% de produto importado. Para o BX (B7 e B15), 91% em volume de Biodiesel de Soja e 9% de Sebo Bovino.

Temporal

Dados extraídos de fontes secundárias, datadas entre 1990-2019. Logo, a análise não contempla os efeitos da pandemia e guerra da Ucrânia na sociedade.

Escopo Tecnológico

- Ônibus à combustão interna ciclo Diesel, com SCR + ARLA 32 (5% do volume de combustível)
- Tecnologia de Emissão: EURO V
- Chassi Mercedes-Benz OH 1621L
- Carroceria CAIO
- 12 metros de comprimento, com massa total de 11.800 kg (sem passageiros)
- Condição de operação referência: 50% de lotação, com os seguintes consumos:
- S10 B7: 2,17 km/l
- S10 B15: 2,16 km/l
- B100: 2,04 km/l
- Vida útil do veículo estimada em 1.180.000 km

Procedimentos de alocação

Para a análise foram considerados:

- Exploração e produção do petróleo e gás natural nacionais (perfil Bacia de Campos) em base energética: 99,97% para o petróleo e 0,03% para o gás natural;
- Refino de petróleo e geração de seus derivados (perfil REPLAN) em base volumétrica:
- Diesel: 51%
- Gasolina A: 24%
- Coque: 7%
- GLP: 6%

- Óleo combustível, Querosene de Aviação, Asfalto, Nafta, Querosene Iluminante representam os 12% finais
- Exploração e produção de glicerídeos da soja em base mássica:
 - Óleo de Soja: 18%
 - Farelo de Soja: 81%
 - Lecitina de Soja: 1%
- Transesterificação do óleo de soja e do sebo bovino em base mássica:
 - Biodiesel: 90%
 - Glicerina: 6%
 - Sabão: 4%

Software de Modelagem e Métodos de AICV

A modelagem foi realizada com o software OpenLCA (com datasets na versão 2.4.5), utilizando os métodos:

- CML-IA baseline
- ReCiPe 2016 Midpoint (H)
- ReCiPe 2016 Endpoint (H)

Categoria de Impactos

As categorias de impacto consideradas foram:

- CML-IA baseline:
Depleção Abiótica, Depleção Abiótica (combustíveis fósseis), Acidificação, Eutrofização, Ecotoxicidade de Água Doce, Aquecimento Global (GWP 100a), Toxicidade Humana, Ecotoxicidade de Água Marinha, Depleção da Camada de Ozônio, Oxidação Fotoquímica, Ecotoxicidade Terrestre.
- ReCiPe 2016 Midpoint (H):
Formação de Material Particulado, Depleção Fóssil, Ecotoxicidade de Água Doce, Eutrofização de Água Doce, Aquecimento Global, Toxicidade Humana Carcinogênica, Toxicidade Humana Não-Carcinogênica, Radiação Ionizante, Uso da Terra, Ecotoxicidade Marinha, Eutrofização Marinha, Depleção Mineral, Formação de Ozônio (Saúde Humana), Formação de



Fortaleza, Ceará
Centro de Eventos do Ceará

INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY

Optimizing renewable energy: advanced strategies for enhanced efficiency and sustainability

Ozônio (Ecossistema Terrestre), Depleção do Ozônio Estratosférico, Acidificação Terrestre, Ecotoxicidade Terrestre, Consumo de Água.

- ReCiPe 2016 Endpoint (H):

Formação de Material Particulado, Depleção Fóssil, Ecotoxicidade de Água Doce, Eutrofização de Água Doce, Aquecimento Global (Ecossistema de Água Doce), Aquecimento Global (Saúde Humana), Aquecimento Global (Ecossistemas Terrestres), Toxicidade Humana Carcinogênica, Toxicidade Humana Não-Carcinogênica, Radiação Ionizante, Uso da Terra, Ecotoxicidade Marinha, Eutrofização Marinha, Depleção Mineral, Formação de Ozônio (Saúde Humana), Formação de Ozônio (Ecossistema Terrestre), Depleção do Ozônio Estratosférico, Acidificação Terrestre, Ecotoxicidade Terrestre, Consumo de Água (Ecossistemas aquáticos), Consumo de Água (Saúde Humana), Consumo de Água (Ecossistema Terrestre).

Fase de análise de inventário (ICV)

Os inventários foram compilados através de fontes secundárias listadas nas referências, sendo, portanto, um conjunto de informações que contemplam os requisitos apresentados na Fase de Definição de Objetivo e Escopo. Para os dois sistemas de produto considerados, tem-se os seguintes processos:

Sistema de Produto BX (B7 e B15):

- Exploração, Produção, Transporte e Distribuição do B7
- Exploração, Produção, Transporte e Distribuição do B15
- Produção e Distribuição do ARLA 32
- Uso do B7
- Uso do B15
- Produção do Veículo
- Manutenção

Sistema de Produto B100:

- Produção, Transporte e Distribuição do B100
- Produção e Distribuição do ARLA 32
- Uso do B100
- Produção do Veículo
- Manutenção

Portanto, os inventários comuns aos dois sistemas de produto são: Produção e Distribuição de ARLA 32, Produção e Manutenção do Veículo. Além dos efeitos dos procedimentos de alocação, os inventários refletem as premissas de distâncias vinculadas aos processos de transporte e distribuição. Considerando os inventários compilados, o detalhamento destes aspectos está além do escopo pretendido neste texto e a rastreabilidade destas informações se dá pelas referências indicadas. Os inventários listados estão apresentados nos anexos.

Fase de avaliação de impacto (AICV)

Método CML-IA

A tabela 1 e o gráfico 1 apresentam os impactos para o B7, B15 e B100 na condição de referência (Lotação de 50%).

Categoria de Impacto	Unidade	B7	B15	B100
Dep. Abiotica	kg Sb eq.	2,91E-07	3,59E-07	1,10E-06
Dep. Fóssil	MJ	2,81E+01	2,64E+01	7,72E+00
Aquec. Global	kg CO2 eq.	1,67E+00	1,57E+00	4,69E-01
Dep. Cam. Ozônio	kg CFC-11 eq.	9,72E-08	9,21E-08	4,14E-08
Tox. Humana	kg 1.4-DB eq.	1,27E-01	1,26E-01	1,22E-01
Ec. Água Doce	kg 1.4-DB eq.	6,87E-03	7,57E-03	1,54E-02
Ec. Marinha	kg 1.4-DB eq.	4,28E+02	4,27E+02	4,18E+02
Ec. Terrestre	kg 1.4-DB eq.	5,14E-04	5,36E-04	7,80E-04
O. Fotoquímica	kg C2H4 eq.	1,69E-04	1,65E-04	1,25E-04
Acidificação	kg SO2 eq.	4,10E-03	4,12E-03	4,20E-03
Eutrofização	kg PO4 ³⁻ eq.	5,63E-04	5,65E-04	6,46E-04

Tabela 1: Impactos para o B7, B15 e B100, 50% Lotação, UF (Unidade Funcional) de 1km percorrido, CML-IA.



Fortaleza, Ceará
Centro de Eventos do Ceará

INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY

Optimizing renewable energy: advanced strategies for enhanced efficiency and sustainability

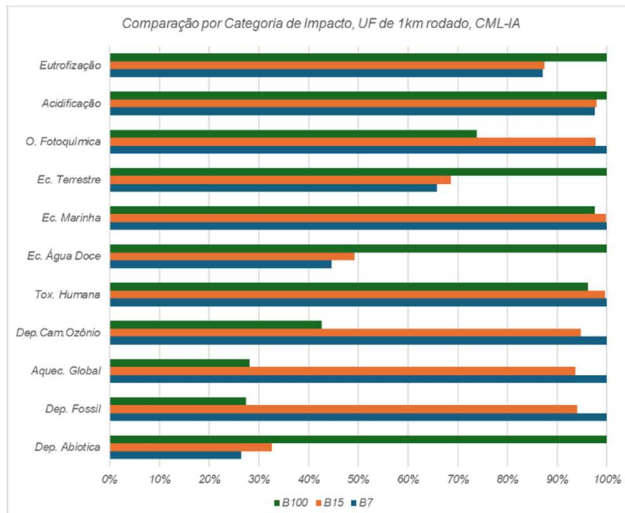


Gráfico 1: Impactos para o B7, B15 e B100, 50% de Lotação, UF de 1km percorrido, CML-IA.

Da mesma forma, os gráficos 2, 3 e 4 apresentam a análise de contribuição para o B7, B15 e B100 respectivamente, na mesma condição.

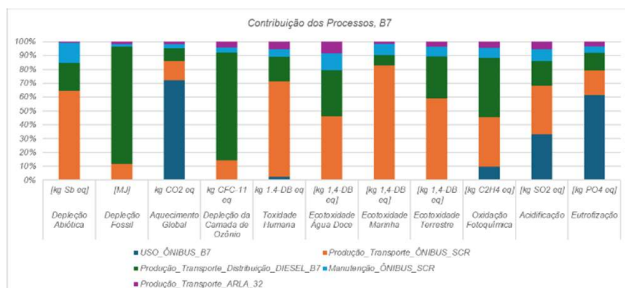


Gráfico 2: Análise de Contribuição do B7.

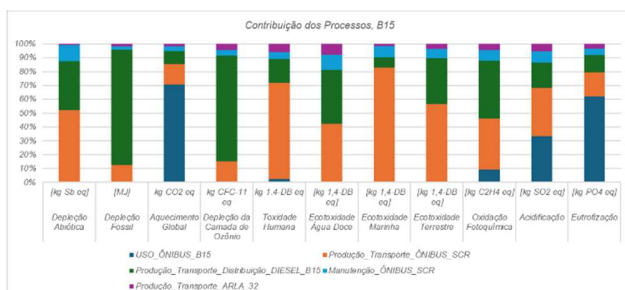


Gráfico 3: Análise de Contribuição do B15.

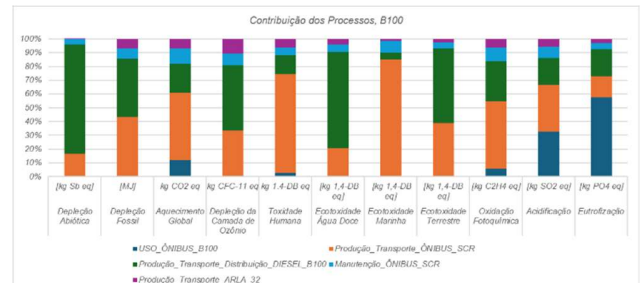


Gráfico 4: Análise de Contribuição do B100.

Com base na variação do consumo apresentada na Tabela 2, realizou-se a análise de sensibilidade em relação à Lotação, vide gráficos 5, 6 e 7.

Consumo [km/l]			
Condição	B7	B15	B100
0% Lotação	2,42	2,40	2,27
50% Lotação	2,17	2,16	2,04
100% Lotação	1,81	1,80	1,70

Tabela 2: Consumos para o B7, B15 e B100, em 3 condições de lotação.

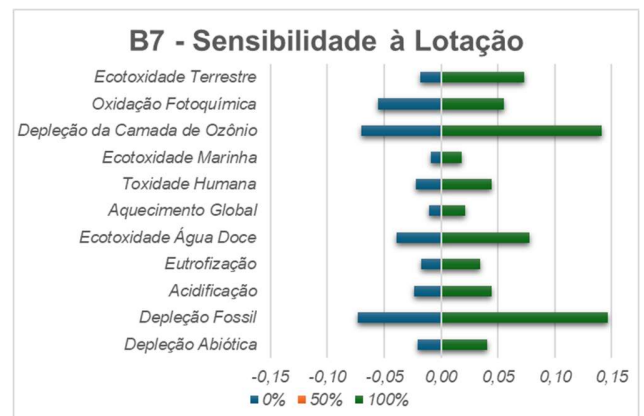
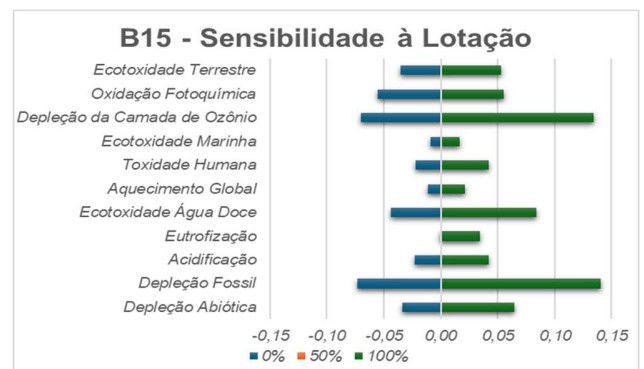


Gráfico 5: Sensibilidade à Lotação do B7.





Fortaleza, Ceará
Centro de Eventos do Ceará

INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY

Optimizing renewable energy: advanced strategies for enhanced efficiency and sustainability

Gráfico 6: Sensibilidade à Lotação do B15.

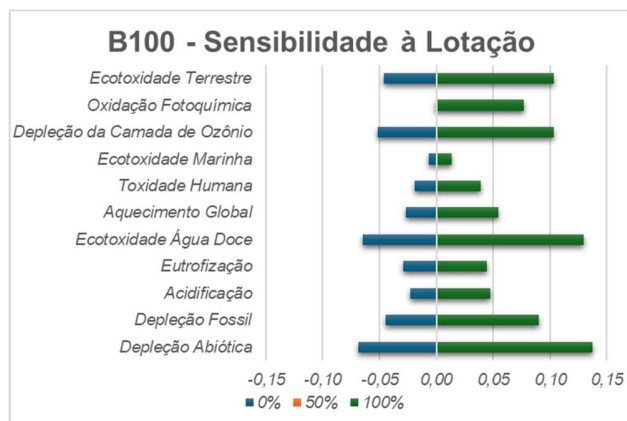


Gráfico 7: Sensibilidade à Lotação do B100.

Os impactos estimados pelos métodos ReCiPe 2016 Midpoint (H) e Endpoint (H) estão nos anexos 10 e 11.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Método CML-IA

O estudo mostra que nenhum combustível (B7, B15 e B100) é ambientalmente superior em todas as categorias. O B7 e o B15, com maior teor fóssil, tiveram maiores impactos em oxidação fotoquímica, toxicidade humana, ecotoxicidade marinha, depleção de ozônio, aquecimento global e depleção abiótica fóssil. Já o B100 se destacou em eutrofização, acidificação e ecotoxicidades terrestre e de água doce. O B15 apresentou, em média, 5% menos impactos que o B7, indicando benefício do maior teor de biodiesel, mas teve maior impacto em depleção abiótica na etapa de produção e transporte.

A produção do ônibus foi relevante para várias categorias, especialmente toxicidade e ecotoxicidade, enquanto o uso do combustível se destacou em acidificação, eutrofização e aquecimento global (com

70% da contribuição para B7 e B15 nesta última). O processo de produção do combustível teve forte peso para B7 e B15, principalmente em ozônio e depleção fóssil, enquanto o B100 foi mais crítico em depleção abiótica.

Na análise de sensibilidade, a lotação máxima (100%) aumentou impactos em todas as categorias, mais do que a redução observada no caso de veículo vazio. O B100 mostrou maior sensibilidade à variação de ocupação em comparação a B7 e B15.

Método ReCiPe 2016 Midpoint (H)

O estudo desconsiderou as categorias Consumo de Água, Radiação Ionizante e Uso do Solo, por apresentarem impactos irrelevantes. A manutenção do ônibus e a produção do ARLA 32 tiveram baixa contribuição ($\approx 6\%$) em todos os combustíveis. A produção de combustível representou em média 22% dos impactos no B100 e 17% no B7/B15, contrariando a expectativa de menor impacto do biodiesel. Ainda assim, o B100 mostrou menores impactos que B7/B15 em ecotoxicidade terrestre, depleção de ozônio, toxicidade humana cancerígena, aquecimento global e uso de recursos fósseis.

A produção do ônibus foi responsável por cerca de 34% dos impactos, destacando-se em escassez de minerais, toxicidade humana, eutrofização e ecotoxicidade em água doce. Já o uso do combustível representou em média 22% dos impactos, com maior relevância em depleção do ozônio, formação de ozônio (ecossistemas e saúde humana) e aquecimento global, sobretudo para B7 e B15.

Método ReCiPe 2016 Endpoint (E)

O estudo desconsiderou as categorias Radiação Ionizante, Uso da Terra e Consumo de Água, por apresentarem impactos irrelevantes. O B100 apresentou



Fortaleza, Ceará
Centro de Eventos do Ceará

INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY

Optimizing renewable energy: advanced strategies for enhanced efficiency and sustainability

menores impactos em ecotoxicidade terrestre, depleção de ozônio, toxicidade humana carcinogênica, aquecimento global e escassez de recursos fósseis, reforçando sua relevância na descarbonização. Contudo, teve maiores impactos em eutrofização marinha, eutrofização de água doce e toxicidade humana não-carcinogênica, principalmente pela produção do combustível.

A manutenção do ônibus e a produção do ARLA 32 tiveram baixa influência ($\approx 6\%$). A produção do ônibus, comum a todos os cenários, foi responsável por 32% dos impactos, sobretudo em escassez de minerais e toxicidade carcinogênica. Já a produção e transporte do combustível representaram 18% dos impactos, com destaque para eutrofização marinha (B100) e escassez de recursos fósseis (B7/B15). O uso do combustível respondeu por 25% dos impactos, principalmente em depleção de ozônio, formação de ozônio (ecossistemas e saúde humana) e aquecimento global, com maior peso para B7 e B15.

4 CONCLUSÕES

A Avaliação de Ciclo de Vida comparativa demonstrou que a adoção de misturas com maior teor de biodiesel implica trade-offs ambientais relevantes. O combustível B100 apresentou redução consistente do potencial de aquecimento global e menor dependência de recursos fósseis, reforçando seu alinhamento a metas de descarbonização e segurança energética nacional. Em contrapartida, impactos elevados nas categorias de eutrofização, acidificação e ecotoxicidade sinalizam a necessidade de políticas agrícolas e rotas tecnológicas que minimizem emissões e efluentes na cadeia produtiva do biodiesel. Para as misturas B7 e B15, observou-se perfil ambiental muito próximo, com ganhos marginais

do B15 em ecossistemas aquáticos e depleção abiótica; contudo, ambas permanecem mais intensivas em GEE quando comparadas ao B100. A análise de sensibilidade evidenciou que a lotação do veículo exerce influência maior do que as diferenças entre B7 e B15, e que o B100 é mais suscetível a variações de carga, reforçando a importância de uma operação otimizada de frota. Do ponto de vista operacional, o processo de produção do ônibus e o consumo em uso responderam por frações substanciais dos impactos, indicando que estratégias de extensão de vida útil e eficiência energética podem gerar reduções absolutas mais relevantes do que a simples troca de combustível. Em síntese, não existe um “combustível único” que maximize todos os benefícios ambientais. A escolha deve ser hierarquizada segundo os objetivos da política pública: prioridade a mitigação de GEE favorece o B100; ênfase na proteção de ecossistemas aquáticos e terrestres recomenda misturas intermediárias ou medidas de controle no ciclo agrícola. Estudos futuros devem explorar rotas de biodiesel de segunda geração, inventários regionais mais atualizados e o efeito de créditos de carbono, a fim de refinar a tomada de decisão no âmbito do transporte coletivo urbano.

REFERÊNCIAS

ANP. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis Painel Dinâmico de Produtores de Biodiesel. Brasília. Disponível em: https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/analise-de-impacto-regulatorio-air/arquivos-dispensa/sci_2169493.pdf. Acesso 19/11/2024

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.
ABNT NBR ISO 14040 – Gestão Ambiental - Avaliação



Fortaleza, Ceará
Centro de Eventos do Ceará

INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY

Optimizing renewable energy: advanced strategies for enhanced efficiency and sustainability

do ciclo de vida - Princípios e estruturas. Acesso 19/11/2024

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. *Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB)*. Brasília: MME, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mme>. Acesso em: 18 nov. 2024. Acesso 04/11/2024

CAVALETT, O.; ORTEGA, E. Integrated environmental assessment of biodiesel production from soybean in Brazil. *Journal of Cleaner Production*, v.18, p.55-70, 2010. Acesso 15/11/2024

CHAGAS, M. F. Atualização do banco de dados Ecoinvent para a utilização no software SimaPro. In: *Jornada de Seminários dos Estagiários (15)*. Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol, 2011. Acesso 02/11/2024

CHAN, W. N. Quantificação e redução de emissões de gases do efeito estufa em uma refinaria de petróleo. Dissertação (Mestrado): Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006. Acesso 12/11/2024

CHAVES, Maria Cecília de Carvalho; GOMES, Carlos Francisco Simões. Avaliação de biocombustíveis utilizando o apoio multicritério à decisão. *Production*, v. 24, p. 495-507, 2014. Acesso 09/11/2024

CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (São Paulo). Emissões

veiculares no estado de São Paulo 2015. 2016. Disponível em:

<<http://veicular.cetesb.sp.gov.br/relatorios-e-publicacoes/>>. Acesso 19/11/2024

DA SILVA, C. R. U.. Perspectivas de longo prazo sobre o perfil ambiental do etanol de cana-de-açúcar no Brasil. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013. Acesso 11/11/2024

SUGAWARA, E. T.. Comparação dos desempenhos ambientais do B5 etílico de soja e de óleo diesel, por meio da avaliação do ciclo de vida (ACV). 2012. 238 p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Química, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3137/tde-16072013-122953/pt-br.php>>. Acesso 19/11/2024

FALCO, Daniela Godoy. Avaliação do desempenho ambiental do transporte coletivo urbano no estado de São Paulo: uma abordagem de ciclo de vida do ônibus a diesel e elétrico à bateria. **Universidade estadual de Campinas, Faculdade de engenharia mecânica**, 2017. Acesso 19/11/2024

THEODORA.COM. Nigeria Pipelines Map: Crude Oil (petroleum) pipelines. [Online]. Disponível em: <www.theodora.com/pipelines>. 2013. Acesso 19/11/2024

VARGAS, J. E. V.. Análise da competitividade ambiental de veículos elétricos no Brasil