

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
DOUTORADO EM SISTEMAS DE GESTÃO SUSTENTÁVEIS

Victor Gomes Simão

**MODELO DE AVALIAÇÃO DA ECOEFICIÊNCIA DE VEÍCULO LEVE PARA TRANSPORTE
DE CARGA COM APOIO À DECISÃO**

Área de Concentração: Sistemas de Gestão da Sustentabilidade

Linha de Pesquisa: Tecnologias Aplicadas para Organizações Sustentáveis.

Projeto de Pesquisa: Evolução tecnológica e mitigação de impactos ambientais.

Palavras Chave: Transporte, Veículos Leves, Energia, Ecoeficiência.

Orientadores:

Oswaldo Luiz Gonçalves Quelhas, D.Sc.

Luís Alberto Duncan Rangel, D.Sc.

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

ESCOLA DE ENGENHARIA

Doutorado em Sistemas de Gestão Sustentáveis

VICTOR GOMES SIMÃO

**MODELO DE AVALIAÇÃO DA ECOEFICIÊNCIA DE VEÍCULO LEVE PARA TRANSPORTE
DE CARGA COM APOIO À DECISÃO**

Niterói - RJ

2020

Ficha catalográfica automática - SDC/BEE
Gerada com informações fornecidas pelo autor

S588m Simão, Victor Gomes
Modelo de Avaliação da Ecoeficiência de Veículo Leve
para Transporte de Carga com apoio à Decisão / Victor Gomes
Simão ; Osvaldo Luiz Gonçalves Quelhas, orientador ; Luís
Alberto Duncan Rangel, coorientador. Niterói, 2020.
187 p. : il.

Tese (doutorado)-Universidade Federal Fluminense, Niterói,
2020.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22409/PPSIG.2020.d.09118740707>

1. Transporte. 2. Ecoeficiência. 3. Energia. 4. Rotulagem
Ambiental. 5. Produção intelectual. I. Quelhas, Osvaldo Luiz
Gonçalves, orientador. II. Rangel, Luís Alberto Duncan,
coorientador. III. Universidade Federal Fluminense. Escola de
Engenharia. IV. Título.

CDD -

VICTOR GOMES SIMÃO

**MODELO DE AVALIAÇÃO DA ECOEFICIÊNCIA DE VEÍCULO LEVE PARA TRANSPORTE
DE CARGA COM APOIO À DECISÃO**

Tese apresentada ao Programa de Doutorado em Sistemas de Gestão Sustentáveis da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Sistemas de Gestão Sustentáveis.

Área de concentração: Sistemas de Gestão da Sustentabilidade

Orientadores:

Osvaldo Luiz Gonçalves Quelhas, D.Sc.

Luís Alberto Duncan Rangel, D.Sc.

Linha de pesquisa: Tecnologias aplicadas para organizações sustentáveis

Niterói - RJ

2020

VICTOR GOMES SIMÃO

**MODELO DE AVALIAÇÃO DA ECOEFICIÊNCIA DE VEÍCULO LEVE PARA TRANSPORTE
DE CARGA COM APOIO À DECISÃO**

Tese apresentada ao Programa de Doutorado em Sistemas de Gestão Sustentáveis da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Sistemas de Gestão Sustentáveis.

Área de concentração: Sistemas de Gestão da Sustentabilidade.

Aprovada em ____ de _____ de _____.

Prof. Osvaldo Luiz Gonçalves Quelhas, D.Sc.– UFF (Orientador)

Prof. Luís Alberto Duncan Rangel, D.Sc. – UFF (Orientador)

Prof^a. Stella Regina Reis da Costa, D.Sc. – UFF

Prof. Gilson Brito Alves Lima, D.Sc. – UFF

Prof^a. Janaina Macke, D.Sc. – UCS

Prof^a. Cristina Gomes de Souza, D.Sc. – CEFET RJ

Prof. Rafael Barbastefano, D.Sc. – CEFET RJ

“Se quiser chegar a ser alguém, devore os livros!”

(VALDEZ, Ramón; 1975)

AGRADECIMENTOS

A Deus, que tem sido tão misericordioso e generoso conosco, e por ter me possibilitado alcançar, de forma inabalável, mais essa conquista de vida. Muito obrigado, Senhor.

Aos meus pais Arminda e João Antonio, pelo valioso ensinamento moral, apoio, incentivo, confiança e amor incondicionais sempre depositados. À minha irmã Milena pelo apoio no visual gráfico e pelos votos de incentivo sempre presentes, mesmo virtualmente. Às minhas filhas Maria Luiza e Cecília, pelo amor e alegria que irradiam no nosso lar. À minha esposa Sirlei Luiza, pelo amor e compreensão inabaláveis que me deram a tranquilidade e a perseverança necessárias para a condução desta pesquisa.

A todos os professores que tive ao longo da minha jornada acadêmica na Universidade Federal Fluminense, que, nos últimos 20 anos, iluminaram de maneira especial minha formação e me incentivaram a buscar o conhecimento científico necessário para a minha escalada profissional.

Aos meus orientadores Osvaldo Quelhas e Luís Duncan, pelo exemplo, permanente estímulo e dedicação. Sou muito grato pelas trocas sempre construtivas e oportunas.

Aos professores que participaram das bancas de avaliação, pela dedicação de tempo e críticas essenciais para o refinamento desta pesquisa.

Aos meus colegas de pesquisas e parceiros em publicações, em especial à Noemi Bonina, Fabio Ribeiro, Marcelo Arese, Alexandre Denizot, Rodrigo Caiado e Alberto Santos, pelo compartilhamento de conhecimentos e experiências e, sobretudo, pelo companheirismo que tornou a caminhada mais leve e a persistência constante.

Ao escritor, poeta e amigo Gustavo Goulart, que revisou meu texto, cuja preocupação, olhar atento, carinho e conselhos me fizeram um profissional e pessoa melhor.

Ao amigo Claudio Mariano Rodrigues Costa (*in memoriam*), pela parceria e amizade, que iluminaram e nos deixaram só boas lembranças dos melhores momentos de descontração mental ao longo desta caminhada.

Aos meus colegas do Inmetro, sempre muito atenciosos, por proporcionarem sempre novas reflexões críticas sobre o estudo e pelas contribuições que muito enriqueceram o resultado final deste trabalho.

A todos os profissionais que se dispuseram a participar da pesquisa, respondendo ao meu questionário, agradeço pela colaboração fundamental e imprescindível à consecução deste trabalho.

A todos, meus mais sinceros agradecimentos!

RESUMO

Propósito: esta pesquisa foi conduzida com o propósito de desenvolver um modelo para apoio à decisão em processos de avaliação de veículos leves para o transporte de cargas, por meio de indicadores de Ecoeficiência, aplicados ao Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular.

Metodologia: composta por quatro macro etapas sendo a primeira a identificação das diferentes fontes energéticas utilizadas para transporte rodoviário e o levantamento de seus aspectos ambientais, por intermédio da revisão da literatura disponível. A segunda etapa se constitui na aplicação da metodologia de Avaliação da Ecoeficiência, baseada na norma ISO 14045, a fim de identificar e mapear aspectos da sustentabilidade que relacionam o desempenho ambiental em relação ao valor econômico de alternativas de transporte. A terceira etapa traz uma pesquisa *survey*, conduzida para validar a proposta da segunda etapa. Por fim, é aplicada uma metodologia de apoio à decisão para avaliar e quantificar a Ecoeficiência das alternativas de transporte, a partir dos impactos identificados, associados à função transporte.

Achados: ao final desta pesquisa foram obtidos dados bastante sólidos que possibilitam a definição de indicadores de Ecoeficiência que permitem comparar opções de transporte voltadas para a eficiência energética, com foco na prevenção das emissões e da dependência de combustíveis fósseis, considerando os devidos fatores de utilidade relacionados.

Limitações: as principais limitações presentes na pesquisa são inerentes aos métodos escolhidos, uma vez que a aplicação da Ecoeficiência para transportes pode ficar obsoleta, devido ao rápido avanço tecnológico na área. Além disso, a Avaliação de Ecoeficiência depende de dados atualizados e disponibilizados pelos órgãos de regulamentação específica no tema.

Aplicações: as principais aplicações deste trabalho estão voltadas ao apoio à implementação e à gestão de políticas públicas de transporte, alinhadas com os conceitos de sustentabilidade, bem como para apoio à tomada de decisão na escolha de alternativas de veículos leves para transporte de cargas, auxiliando diretamente na gestão de frotas dedicadas ao transporte.

Originalidade: aborda a avaliação de Ecoeficiência para comparar opções de veículos para transporte de carga. Propõe desenvolver um modelo que pode ser usado, criando parâmetros para balizar a tomada de decisão na área de transportes, tendo como base os conceitos do *triple bottom line* e a interdisciplinaridade das dimensões nele intrínsecas.

Palavras-Chave: Transporte, Veículos Leves, Energia, Ecoeficiência, Rotulagem Ambiental.

ABSTRACT

Purpose: This research was developed with the purpose of developing a system to support the decision in the evaluation processes of light vehicles for cargo transportation, through Eco-efficiency indicators, within the scope of the Brazilian Vehicle Labeling Program.

Methodology: composed of four macro steps, the first being the identification of the different energy sources used for road transport and the survey of their environmental aspects, through the review of the available literature. The second stage is the application of the Eco-efficiency Assessment methodology, based on the ISO 14045 standard, in order to identify and map aspects of sustainability that relate environmental performance to the economic value of transport alternatives. The third stage brings a survey research, conducted to validate the proposal of the second stage. Finally, a decision support methodology is applied to assess and quantify the eco-efficiency of transport alternatives, based on the identified impacts associated with the transport function.

Findings: at the end of this research, very solid data were obtained that enable the definition of eco-efficiency indicators that allow comparing transport options aimed at energy efficiency, with a focus on preventing emissions and dependence on fossil fuels, considering the appropriate related utility factors.

Limitations: the main limitations present in the research are inherent to the chosen methods, since the application of Eco-efficiency for transport may become obsolete, due to the rapid technological advancement in the area. In addition, the Eco-Efficiency Assessment depends on updated data and made available by specific regulatory bodies on the topic.

Applications: the main applications of this work are aimed at supporting the implementation and management of public transport policies, aligned with the concepts of sustainability, as well as supporting decision making in the choice of light vehicle alternatives for cargo transportation, directly assisting in the fleet management dedicated to transport.

Originality: addresses the Eco-efficiency assessment to compare vehicle options for cargo transportation. It proposes to develop a model that can be used, creating parameters to guide decision making in transport sector, based on the concepts of the triple bottom line and the interdisciplinarity of the intrinsic dimensions.

Keywords: Transport, Light Vehicles, Energy, Eco-efficiency, Eco labeling.

Lista de Gráficos

| | | |
|-------------|---|-----|
| Gráfico 1: | Estrutura do consumo no setor de transportes; | 25 |
| Gráfico 2: | Número de publicações anuais relacionadas aos temas de pesquisa estudados; | 37 |
| Gráfico 3: | Respostas dos especialistas entrevistados em relação ao seu setor de atuação; | 129 |
| Gráfico 4: | Respostas dos entrevistados em relação ao tempo de experiência profissional; | 129 |
| Gráfico 5: | Respostas dos entrevistados em relação à pertinência do primeiro indicador; | 130 |
| Gráfico 6: | Respostas dos entrevistados em relação à relevância do primeiro indicador; | 130 |
| Gráfico 7: | Respostas dos entrevistados em relação à pertinência do segundo indicador; | 131 |
| Gráfico 8: | Respostas dos entrevistados em relação à relevância do segundo indicador; | 131 |
| Gráfico 9: | Respostas dos entrevistados em relação à pertinência do terceiro indicador; | 132 |
| Gráfico 10: | Respostas dos entrevistados em relação à relevância do terceiro indicador; | 132 |
| Gráfico 11: | Respostas dos entrevistados em relação à pertinência do quarto indicador; | 133 |
| Gráfico 12: | Respostas dos entrevistados em relação à relevância do quarto indicador; | 133 |
| Gráfico 13: | Respostas dos entrevistados em relação à importância relativa entre os quatro indicadores propostos | 134 |

Lista de Tabelas

| | | |
|------------|--|-----|
| Tabela 1: | Consumo de energia no setor de transportes rodoviário no Brasil; | 26 |
| Tabela 2: | Resultado da pesquisa bibliográfico no Portal Capes; | 34 |
| Tabela 3: | Resultado da pesquisa bibliográfico no Portal Science Direct; | 35 |
| Tabela 4: | Periódicos acadêmicos que mais publicam trabalhos correlacionados aos temas de pesquisa estudados na bibliometria, segundo o Science Direct; | 36 |
| Tabela 5: | Periódicos acadêmicos que mais publicam trabalhos correlacionados aos temas de pesquisa estudados na bibliometria, segundo o Web of Science; | 37 |
| Tabela 6: | Cronologia de publicação dos artigos selecionados; | 38 |
| Tabela 7: | Fatores limites de emissão veicular estabelecidos pelo Proconve (g/km); | 53 |
| Tabela 8: | Participação das fontes energéticas no setor de transporte rodoviário; | 66 |
| Tabela 9: | Limites para classificação do consumo energético dos veículos participantes do PBEV 2019; | 115 |
| Tabela 10: | Seleção dos atributos para cálculo dos indicadores de Ecoeficiência; | 116 |
| Tabela 11: | Indicadores parciais de Ecoeficiência propostos; | 117 |
| Tabela 12: | Dados completos de consumo energético, emissões e capacidade de carga dos veículos comerciais, picapes e picapes compactas; | 119 |
| Tabela 13: | Resultado do cálculo dos indicadores de Ecoeficiência parciais; | 122 |
| Tabela 14: | Indicadores parciais normalizados e integrados; | 125 |
| Tabela 15: | Tabulação final das respostas obtidas nos questionários em percentual; | 136 |
| Tabela 16: | Somatório das pontuações obtidas para os atributos Pertinência e Relevância; | 136 |
| Tabela 17: | Tabulação das respostas obtidas para o atributo Importância; | 137 |
| Tabela 18: | Ordenação das alternativas segundo a percepção de cada avaliador e agregação final pelo método de Borda; | 138 |
| Tabela 19: | Ponderação atribuída a cada indicador parcial de Ecoeficiência; | 139 |
| Tabela 20: | Ponderação da soma dos indicadores parciais de Ecoeficiência; | 139 |
| Tabela 21: | Ordenação decrescente das alternativas segundo seus índices de Ecoeficiência, calculados pela soma ponderada; | 142 |
| Tabela 22: | Proposta de faixas para a classificação dos veículos segundo critérios de Ecoeficiência a partir da ponderação dos quatro indicadores. | 152 |

Lista de Figuras

| | |
|---|-----|
| Figura 1: Integração das políticas públicas para a sustentabilidade dos transportes; | 21 |
| Figura 2: Modelo da ENCE, utilizada pelos veículos participantes do PBEV 2017; | 62 |
| Figura 3: Análise de Ciclo de Vida para veículos; | 83 |
| Figura 4: Etapas da metodologia aplicada à pesquisa; | 101 |
| Figura 5: Framework para elaboração da pesquisa; | 104 |
| Figura 6: Framework para aplicação dos questionários; | 105 |
| Figura 7: Proposta de nova etiqueta incorporando o indicador de Ecoeficiência e capacidades de carga para veículos utilitários. | 151 |

Lista de Quadros

| | | |
|-----------|---|-----|
| Quadro 1: | Temas de pesquisa e respectivas palavras-chave; | 32 |
| Quadro 2: | Algoritmo usado para a pesquisa bibliométrica; | 33 |
| Quadro 3: | Resumo das definições sobre Ecoeficiência; | 41 |
| Quadro 4: | Tipos de rótulos ambientais e suas características; | 57 |
| Quadro 5: | Principais rótulos ambientais desenvolvidos nos países; | 58 |
| Quadro 6: | Resumo do levantamento de impactos das fontes energéticas utilizadas em sistemas de transporte; | 85 |
| Quadro 7: | Correlação entre as etapas da metodologia de Avaliação da Ecoeficiência, segundo a norma NBR ISO 14045, aplicadas à pesquisa. | 107 |

Lista de abreviaturas, siglas e símbolos

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas;

ABCV - Associação Brasileira de Ciclo de Vida;

ACV - Análise de Ciclo de Vida / Avaliação do Ciclo de Vida;

AEE - Avaliação da Ecoeficiência;

AENOR - Asociación Española de Normalización y Certificación;

AICV - Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida;

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica;

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis;

ABEIFA - Associação Brasileira das Empresas Importadoras e Fabricantes de Veículos Automotivos;

ANFAVEA - Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores;

BEN - Balanço Energético Nacional;

CGIEE - Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética;

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente;

CONPET - Programa Nacional da Racionalização do Uso dos Derivados do Petróleo e do Gás Natural;

CEC - Consumo Energético Combinado;

CENPES - Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Miguez de Mello;

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo;

COP - Conferência das Partes sobre Mudanças Climáticas;

DENATRAN - Departamento Nacional de Trânsito;

EEA - *European Environmental Agency*;

ENCE - Etiqueta Nacional de Conservação da Energia;

EPA - *Environmental Protection Agency*;

EPE - Empresa de Pesquisa Energética;

GEE - Gases causadores de efeito estufa;

IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente;

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística;

IBICT - Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia;

ICV - Inventário de Ciclo de Vida;

IEA - *International Energy Agency*;

ILCD - *International reference life cycle data system*;

iNDCs - *Intended Nationally Determined Contribution*;

INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia;

IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change*;

IPHE - *International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy*;

ISO - *International Organization for Standardization*;

JAMA - Associação de Construtores Japoneses de Automóveis;

KAMA - Associação de Construtores Coreanos de Automóveis;

LCA - *Life Cycle Assessment / Life Cycle Analysis*;

MCDM - *Multicriteria Decision Making*;

MDIC - Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior;

MDL - Mecanismo de Desenvolvimento Limpo;

MMA - Ministério do Meio Ambiente;

MME - Ministério de Minas e Energia;

OECD - Organization for Economic Co-operation and Development;

PBEV - Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular;

PNUMA - Comitê Brasileiro do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente;

PPSIG - Programa de Pós Graduação em Sistemas de Gestão Sustentáveis;

PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica;

PROCONVE – Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores;

PRONAR – Programa Nacional de Controle de Qualidade do Ar;

SICV Brasil – Sistema Brasileiro de Inventários de Ciclo de Vida;

UFF - Universidade Federal Fluminense;

UNEP - *United Nations Environmental Program;*

UNFCCC - *United Nations Framework Convention on Climate Changes;*

UNSD - *United Nations Statistics Division;*

WBCSD - *World Business Council for Sustainable Development;*

WICE - *World Industry Council for the Environment;*

WWF - *World Wide Fund for Nature.*

Sumário

| | | |
|---------|--|-----|
| 1. | Introdução..... | 19 |
| 1.1. | Contextualização do Tema..... | 19 |
| 1.2. | Situação Problema desta Pesquisa..... | 23 |
| 1.3. | Questão de Pesquisa..... | 26 |
| 1.4. | Objetivo Geral..... | 27 |
| 1.5. | Objetivos Específicos..... | 27 |
| 1.6. | Delimitação da Pesquisa..... | 28 |
| 1.7. | Demonstração de aderência ao Programa PPSIG e à natureza interdisciplinar desta pesquisa: Decisões em Sistemas Gestão Sustentáveis..... | 28 |
| 2. | Referencial Teórico..... | 32 |
| 2.1. | Análise Bibliométrica..... | 32 |
| 2.2. | Ecoeficiência..... | 39 |
| 2.3. | Impactos ambientais relacionados ao setor de transporte..... | 46 |
| 2.4. | Políticas Públicas e Arcabouço regulatório brasileiro sobre emissões veiculares..... | 51 |
| 2.5. | Rotulagem Ambiental..... | 55 |
| 2.6. | Etiquetagem de Eficiência Energética..... | 60 |
| 2.7. | Gás Natural Veicular..... | 65 |
| 2.8. | Biocombustíveis..... | 67 |
| 2.9. | O Hidrogênio como fonte energética..... | 70 |
| 2.10. | Veículos Elétricos..... | 74 |
| 2.11. | Análise de Ciclo de Vida..... | 80 |
| 2.12. | Teoria de Sistemas e a Complexidade Dinâmica..... | 87 |
| 2.13. | O Processo Decisório..... | 90 |
| 2.13.1. | Decisão em Grupo..... | 94 |
| 2.13.2. | Métodos Ordiniais..... | 95 |
| 2.13.3. | O Método de Condorcet..... | 95 |
| 2.13.4. | O Método de Copeland..... | 96 |
| 2.13.5. | O Método de Borda..... | 96 |
| 3. | Metodologia de Pesquisa..... | 101 |
| 4. | Modelo para Avaliação da Ecoeficiência aplicada ao Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular | 106 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 4.1. | Determinação de Impactos Econômicos | 109 |
| 4.2 | Determinação de Impactos Ambientais | 110 |
| 4.3 | Caracterização dos Impactos Ambientais | 111 |
| 4.4 | Medição de Emissões de Poluentes e Consumo Energético | 112 |
| 4.5 | Definição do escopo e sistema de produto a ser avaliado | 113 |
| 4.5.1 | Valor do sistema de produto..... | 113 |
| 4.5.2 | Escolha dos Indicadores de Ecoeficiência | 114 |
| 4.5.3 | Consumo Energético Combinado..... | 114 |
| 4.6 | Cálculo do indicador de valor do sistema de produto..... | 116 |
| 4.7 | Quantificação da Ecoeficiência | 121 |
| 4.8 | Normalização, ponderação e integração dos indicadores | 124 |
| 4.9 | Ponderação dos indicadores pelos especialistas | 127 |
| 4.10 | Interpretação | 141 |
| 4.11 | Análise de Sensibilidade | 144 |
| 4.12 | Análise e Discussão dos Resultados | 145 |
| 4.13 | Relato e Divulgação dos Resultados..... | 150 |
| 5. | Conclusões da Pesquisa | 154 |
| 5.1 | Propostas para pesquisas futuras | 159 |
| | Referências | 162 |

Apêndices

| | | |
|--------------|---|-----|
| Apêndice I | Questionário para fins de pesquisa acadêmica | 172 |
| Apêndice II | Respostas abertas obtidas para a 13ª questão do questionário | 177 |
| Apêndice III | Cartilha: Ecoeficiência no transporte de cargas: uma aplicação no programa brasileiro de etiquetagem veicular | 179 |
| Apêndice IV | Relatório sobre a Produção Técnica do Doutorado em Sistemas de Gestão Sustentáveis | 209 |
| Apêndice V | Carta de Declaração do Inmetro, reconhecendo o valor de inovação da proposta apresentada nesta pesquisa. | 222 |

1. Introdução

1.1. Contextualização do Tema

A civilização humana depende de forma crucial de fontes de energia para sua sobrevivência, para a realização das suas atividades econômicas, sociais, produtivas e principalmente para o transporte de bens e deslocamento pessoal, além de ser um dos mais importantes elementos na vida das pessoas, em termos bioquímicos.

A energia é um pilar da sociedade, pois por meio de processos de conversão de energia os seres humanos se mantêm vivos, sendo, portanto fundamental ao seu desenvolvimento, ter uma matriz energética sólida e confiável também pode assegurar a manutenção do desenvolvimento dessa e das próximas gerações (RANGEL *et al.*, 2017).

Antes do século XVIII, as atividades sociais e econômicas de produção e prestação de serviços se baseavam no trabalho obtido a partir da força humana, somado à tração animal, pela utilização direta da força da água, vento, ou pela queima da biomassa vegetal (LEITE, 2007).

A revolução industrial trouxe grandes progressos no domínio da energia proveniente da queima do carvão em máquinas movidas a vapor. Estas, inicialmente, só se prestavam ao uso industrial e, no caso dos transportes, à tração ferroviária e de embarcações, devido principalmente à alta relação peso/potência e da necessidade de armazenamento de grande volume de combustível (D'AGOSTO, 2015).

Nos países de vanguarda da revolução industrial, a lenha perdeu sua importância perante o carvão mineral, enquanto principal combustível, e a industrialização prosperou em países detentores de boas reservas de carvão, que dominou de forma absoluta o panorama energético e alimentou o desenvolvimento industrial do século XIX. Desde então, a disponibilidade de reservas de fontes energéticas está ligada intimamente às inovações no domínio da transformação e da utilização da energia (LEITE, 2007).

Somente com o desenvolvimento do motor de combustão interna, por Jean Lenoir e aperfeiçoado por August Otto e por Rudolf Diesel, na década de 1860, que os combustíveis líquidos derivados de petróleo ganharam o mundo e permitiram o nascimento, a consolidação e o progresso do transporte rodoviário (D'AGOSTO, 2015).

No século XX, a revolução dos transportes favoreceu a abertura das sociedades e a aproximação das nações, possibilitando a troca de mercadorias e o estabelecimento da economia globalizada. Além de fator essencial da liberdade individual, do crescimento regional e da geração de riqueza, o transporte permite a extensão territorial das relações humanas e da troca de culturas. A mobilidade pessoal é uma condição

imprescindível de acesso ao emprego, à educação e à cultura, sendo fator essencial para o desenvolvimento socioeconômico dos povos (PHILIPON, 2010).

A mobilidade urbana é uma questão objeto de debate e polêmica no mundo. O crescimento demográfico, o processo de urbanização, assim como a exploração intensiva e a dependência das limitadas fontes de energia fósseis se apresentam como tendências desafiadoras para inovações no setor de transportes.

Entretanto, veículos em circulação, além dos esperados efeitos de transporte de bens e pessoas, podem causar indesejados aspectos negativos, que incluem o extenso uso da terra para acomodar sua infraestrutura, a produção de resíduos sólidos pesados e efluentes líquidos, causadores de considerável impacto ambiental. Além do mais significativo impacto não pretendido das atividades de transporte, a produção de gases causadores de efeito estufa (GEE) (RIEVAJ; SYNÁK, 2017).

O setor de transportes, apesar de essencial para as atividades humanas, encontra-se pressionado pela sua peculiar alta demanda energética, pelo seu impacto no concorrido espaço urbano e pelas emissões ambientalmente prejudiciais que a sua subsistência ocasiona, figurando como o principal agente dessas tendências (PHILIPON, 2010).

A 21ª Conferência do Clima (COP21) da Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas (UNFCCC) foi realizada em dezembro de 2015, em Paris, e teve como principal objetivo estabelecer um novo acordo entre os países para diminuir a emissão de gases de efeito estufa, diminuindo o aquecimento global. Durante a COP21 governos de 190 países foram solicitados a apresentar desafios próprios à redução de emissões domésticas de GEE, chamadas de iNDCs – *Intended Nationally Determined Contribution*, ou Pretendida Contribuição Nacionalmente Determinada, com o objetivo de limitar o aumento da temperatura no globo terrestre a um máximo de 2°C até o ano de 2100. O Brasil, em setembro de 2015, assumiu sua iNDC junto ao Secretariado da UNFCCC.

No que se refere à mitigação da mudança do clima, a contribuição do Brasil será reduzir até 2025 as emissões de GEE em 37% abaixo dos níveis de 2005, com uma contribuição indicativa subsequente de reduzir essas emissões em 43% abaixo dos níveis de 2005 até 2030. Nos países participantes da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OECD) as emissões relativas apenas aos setores de transporte e produção de energia (eletricidade e calor) são equivalentes a 70% do total emitido de GEE.

No Brasil, existem políticas públicas atualmente em vigor que tratam dos temas correlatos à sustentabilidade dos transportes, com focos distintos, mas cuja conexão entre elas é representada no diagrama da Figura 1 (ABREU, 2018).

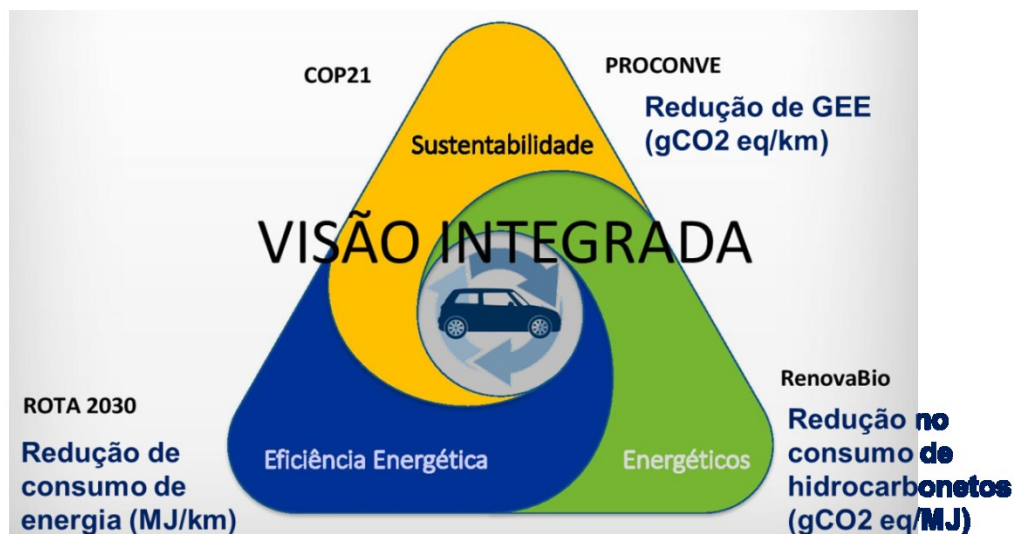


Figura 1: Integração das políticas públicas para a sustentabilidade dos transportes

Fonte: Adaptado de Abreu (2018)

Conforme demonstrado de forma sintetizada na Figura 1, o Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE) atua em prol da redução das emissões de poluentes como; monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (HC) e óxidos de nitrogênio (NOx), visando atender o compromisso brasileiro junto à COP21, de reduzir as emissões de GEE. O Proconve estabelece padrões de emissão de poluentes para as diferentes categorias de veículos. Para os automóveis e comerciais leves, as fases do programa são denominadas “L”, sendo que a fase L1 entrou em vigor em 1989. Atualmente, o programa encontra-se na fase L6. Para os veículos pesados (caminhões e ônibus), as fases são denominadas “P” e atualmente o programa encontra-se na fase P7. Em 2018 e 2019, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) estabeleceu novos limites de emissões, mais restritivos, para todas as categorias de veículos (CETESB, 2020), conforme será detalhado mais adiante nesta pesquisa.

O Programa Federal ROTA 2030 – Mobilidade e Logística, destinado à cadeia automotiva, tem o objetivo de apoiar o desenvolvimento tecnológico, fomentar a competitividade, a inovação, a segurança veicular, a proteção ao meio ambiente, a eficiência energética e a qualidade e evolução tecnológica do setor automotivo nacional. O projeto estruturante do Rota 2030 está baseado sobre três eixos temáticos: desenvolvimento de tecnologias em biocombustíveis, segurança veicular e propulsão alternativa à combustão.

Uma das ferramentas mais conhecidas do Rota 2030 já em execução se concretiza, atualmente, através do Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular (PBEV), coordenado pelo Programa Nacional da Racionalização do Uso dos Derivados do Petróleo e do Gás Natural (Conpet), e pelo Instituto Nacional de

Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro), em parceria com o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente (Ibama).

A Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) (BRASIL, 2017) é parte integrante da política energética nacional, concebida pelo Ministério de Minas e Energia. Foi instituído pela Lei nº 13.576/2017, cujo objetivo foi expandir a produção de biocombustíveis no Brasil, baseada na sustentabilidade ambiental, econômica e social, e compatível com o crescimento do mercado, com o intuito de garantir a competitividade dos biocombustíveis e a sua melhoria em termos de produtividade e aproveitamento econômico. A partir desta expansão, a lei almeja uma contribuição dos biocombustíveis na redução das emissões de gases de efeito estufa.

Porém, associado ao programa RenovaBio, existe um preocupante processo de mudança de uso da terra associado à produção de biomassa, que envolvem a supressão de áreas de vegetação nativa para produção de biocombustíveis e de sua expansão para áreas ambientalmente sensíveis, por meio do alinhamento a políticas e instrumentos nacionais associados às culturas energéticas objeto do programa, que não considera também outros aspectos cruciais, como o volumoso consumo hídrico inerente ao cultivo de biocombustíveis e que afeta, a longo prazo, o desenvolvimento de outras atividades socioeconômicas.

As referidas políticas não levam em consideração os custos socioeconômicos das emissões veiculares de um sistema de transporte que, assim como na maioria das atividades econômicas, deveriam minimizar a degradação causadora de efeitos danosos à sociedade, que reduzem o bem estar da mesma, devido a impactos típicos do setor de transportes que podem destacados com maior frequência, como; mudanças climáticas, o agravamento do aquecimento global, depleção de recursos, ocupação da terra, eco toxicidade, perda da qualidade do ar, congestionamentos e intrusão visual (CARVALHO, 2009; MOTTA, 2016).

Até o momento de realização dessa pesquisa, as medidas que estão sendo tomadas para reduzir o nível de emissões se mostraram efetivas no sentido da evolução tecnológica dos veículos individualmente, mas, no geral, redução alcançada é muito inferior ao crescimento da frota e do consumo. Pode-se afirmar que a situação não é sustentável.

Em 1999, a União Europeia (UE) introduziu a Diretiva 1999/94/EC (EC, 1999) para informar os consumidores sobre o consumo de combustível e as emissões de dióxido de carbono de automóveis novos de passageiros. Esta diretiva de rotulagem de automóveis visa permitir escolhas do consumidor e contribuir para alcançar uma redução de 40% na as emissões de gases de efeito estufa (GEE) até 2030, em comparação com os níveis de 1990.

Haq e Weiss (2016) argumentam que uma classificação inequívoca de automóveis pode melhorar a eficácia da etiquetagem veicular e defende a inclusão de parâmetros de utilidade que possam levar em consideração o uso real de um veículo. Os parâmetros de utilidade fazem isso implicitamente e uma inclusão explícita de, por exemplo, taxas de ocupação média ou capacidade de carga na rotulagem do veículo, podem ajudar a expressar o consumo de combustível em termos da utilidade real do veículo experimentada pelos usuários. Além disso, os parâmetros de utilidade podem levar em conta as preferências do consumidor e destacar os melhores veículos do segmento (CODAGNONE *et al.*, 2013). A aplicação de parâmetros de utilidade pode, portanto, destacar modelos relativamente eficientes que aplicam novas tecnologias. Com aprendizagem e economias de escala, essas tecnologias se tornarão mais acessíveis e serão difundidas em outros segmentos de veículos (HAQ; WEISS, 2016).

Identifica-se, portanto, um hiato tecnológico nas estratégias de sustentabilidade no transporte, uma vez que grande destaque é dado à redução de consumo de energia e de hidrocarbonetos que geram GEE. Porém, os requisitos de sustentabilidade pautados nos critérios econômicos relativos à Ecoeficiência e à Análise de Ciclo de Vida, englobando outros impactos ambientais não foram contemplados nas táticas voltadas para o setor de transporte, conforme será mais especificamente detalhado nos próximos capítulos desta pesquisa.

Assim foi estabelecido o ponto de partida para a definição do macro contexto para o desenvolvimento desta Tese.

1.2. Situação Problema desta Pesquisa

Os sistemas de transportes propiciam o benefício do deslocamento da população e dos bens produzidos por ela, mas também acarretam diversos impactos negativos para a mesma. Promover uma mobilidade que possa gerar os benefícios econômicos esperados e que traga uma busca pela redução nos seus impactos ambientais é um desafio cada vez mais demandado pela sociedade, que busca modelos mais sustentáveis de transporte para passageiros e cargas, em um cenário fortemente dependente de combustíveis fósseis, que representam alto custo operacional em uma frota circulante e impactam diretamente na crescente taxa de emissões de gases poluentes e causadores de efeito estufa.

Tendo como premissa a imperativa necessidade da busca pela sustentabilidade dos transportes de pessoas e cargas, o atual cenário da mobilidade humana é caracterizado por elevados custos sociais, econômicos e ambientais, pelo alto consumo dos combustíveis fósseis, com crescentes emissões de gases poluentes causadores de efeito estufa e pela baixa eficiência dos motores à combustão. Estes fatores constituem o desafio a ser discutido mundialmente pelos setores de transporte terrestre.

A Empresa de Pesquisa Energética (EPE), vinculada ao Ministério de Minas e Energia, tem por finalidade prestar serviços na área de estudos e pesquisas destinadas a subsidiar o planejamento do setor energético, tais como energia elétrica, petróleo e gás natural, carvão mineral, fontes energéticas renováveis e eficiência energética, dentre outras (EPE, 2020). Anualmente a EPE publica dados como os apresentados no Gráfico 1 em que demonstra a evolução no uso das fontes de energia para transporte e a participação percentual de cada uma delas, na matriz energética de transporte rodoviário no Brasil, desde 1975 até 2019.

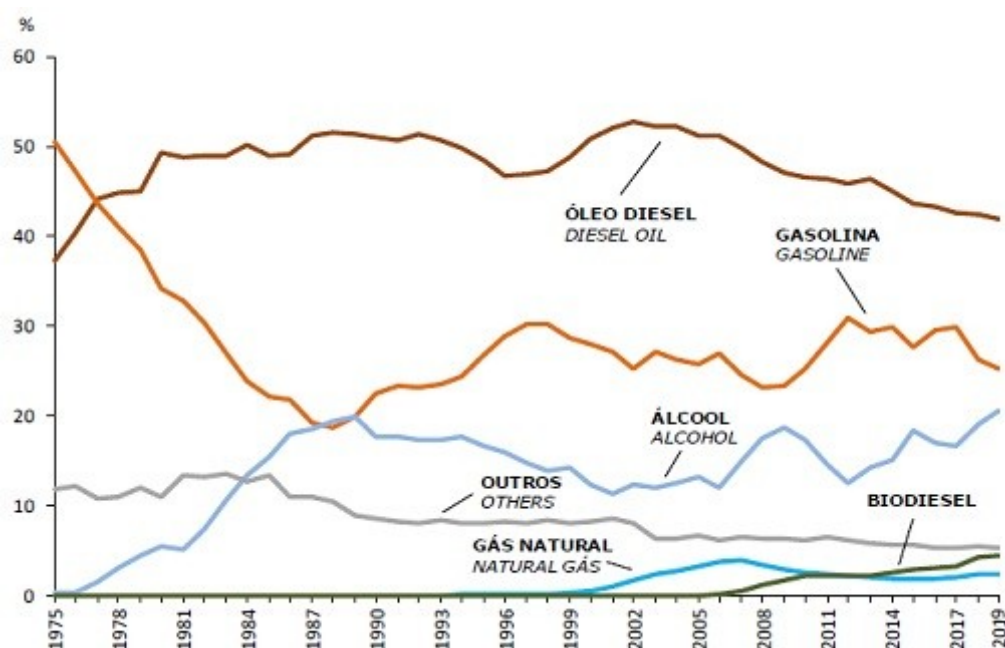


Gráfico 1: Estrutura do consumo no setor de transportes.

Fonte: EPE (2020)

A partir da análise do Gráfico 1, é notável uma evidente diversificação na matriz, principalmente nos últimos 20 anos, com a difusão do uso do gás natural e do biodiesel. Contudo ainda persiste a predominância majoritária dos combustíveis de origem fóssil, não renováveis e cujas emissões contribuem, de maneira indesejável, para o efeito estufa e para problemas ambientais e de saúde pública.

A Tabela 1 adiciona dados da EPE que demonstram a participação total, em volume, de cada um dos combustíveis utilizados no setor de transportes rodoviário brasileiro, no período de 2010 até 2019.

Tabela 1: Consumo de energia no setor de transportes rodoviário no Brasil.

| | | | | | | | | | | | 10 ³ tep (toe) |
|--------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------------------|
| FONTES | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | SOURCES |
| GÁS NATURAL | 1.767 | 1.735 | 1.709 | 1.647 | 1.594 | 1.553 | 1.593 | 1.734 | 1.946 | 2.010 | NATURAL GAS |
| ÓLEO DIESEL | 31.086 | 32.904 | 34.837 | 37.156 | 37.433 | 35.427 | 34.262 | 34.031 | 33.568 | 34.298 | DIESEL OIL |
| BIODIESEL | 1.450 | 1.573 | 1.696 | 1.795 | 2.080 | 2.434 | 2.409 | 2.679 | 3.369 | 3.694 | BIODIESEL |
| GASOLINA AUTOMOTIVA | 17.525 | 20.838 | 24.454 | 24.393 | 25.682 | 23.257 | 24.181 | 24.816 | 21.558 | 21.453 | GASOLINE |
| ÁLCOOL ETÍLICO ANIDRO | 3.790 | 4.504 | 4.144 | 5.172 | 5.882 | 5.842 | 5.928 | 6.446 | 5.454 | 5.636 | ANHYDROUS ALCOHOL |
| ÁLCOOL ETÍLICO HIDRATADO | 8.243 | 6.230 | 5.763 | 6.717 | 7.126 | 9.582 | 7.953 | 7.402 | 10.263 | 11.856 | HYDRATED ALCOHOL |
| TOTAL | 63.861 | 67.785 | 72.601 | 76.880 | 79.798 | 78.095 | 76.325 | 77.109 | 76.158 | 78.946 | TOTAL |

Fonte: EPE (2020)

Pela Tabela 1 observa-se que apesar do aumento da participação dos biocombustíveis no setor, a dependência pelos combustíveis fósseis reduziu muito pouco na última década, com ligeira queda observada no consumo de gasolina nos dois anos mais recentes e do óleo diesel nos cinco anos mais recentes, a partir da sua gradativa substituição pelo biodiesel.

Veículos equipados com motor elétrico incorporam uma tecnologia concorrente tecnicamente viável que vem sendo aprimorada para adquirir melhor viabilidade comercial. Nestes veículos, o uso de motores elétricos possibilita que a eficiência energética esteja em torno de 80%. Segundo Hill (2010), a eficiência energética dos motores de combustão interna está em torno de 15%. Apesar de a eficiência dos motores ter aumentado nos últimos anos, as emissões de GEE continuam crescendo na frota circulante (MEYER; WESSELY, 2009).

Braga *et al.* (2001) descreve que estudos observacionais têm procurado mostrar, com resultados cada vez mais significativos, efeitos de morbidade e mortalidade associados aos poluentes do ar. A convivência dos seres vivos, em especial a do homem, com a poluição do ar tem trazido consequências sérias para a saúde. Os efeitos dessa exposição têm sido marcantes e plurais quanto à abrangência. Estudos realizados em diversos centros urbanos, que utilizaram dados epidemiológicos, concluem que as concentrações de poluentes atmosféricos encontradas em grandes cidades acarretam afecções agudas e crônicas no trato respiratório, mesmo em concentrações abaixo do padrão de qualidade do ar. A maior incidência de patologias, tais como asma e bronquite, está associada às variações das concentrações de vários poluentes atmosféricos. A mortalidade por patologias do sistema respiratório apresenta uma forte associação com a

poluição atmosférica. As populações mais vulneráveis são as crianças, idosos e aquelas que apresentam doenças respiratórias.

O transporte rodoviário, devido às facilidades, principalmente para entregas porta a porta, sem necessidade de transbordo de carga, faz deste modal a escolha mais importante para pequenas cargas ou cargas fracionadas, principalmente nas grandes urbes. Porém, recentes acontecimentos que tiveram destaque em maio de 2018, quando uma paralisação nacional dos motoristas do setor de transportes de carga afetou gravemente o abastecimento de combustíveis, alimentos e produtos de consumo gerais em todo o Brasil, demonstram o quão é frágil essa dependência do país pelo setor de transportes rodoviário, movido ainda quase que exclusivamente por combustíveis de origem fóssil.

Os gestores públicos lidam com diversos agentes econômicos que disputam o mercado, não correspondendo às demandas da população e mantendo políticas que levam ao aumento das frotas de veículos individuais, com motores a combustão de baixa eficiência, gerando elevados custos sociais, econômicos e ambientais. Todavia, as diversas fontes energéticas atualmente disponíveis para uso em transportes, causam impactos distintos não só durante o seu uso, mas em diferentes etapas do seu ciclo de vida (PALLARO *et al.*, 2015).

A falta de investimentos nos modais aquaviário e ferroviário no país também contribuem para que o transporte rodoviário seja o mais significativo, tanto em termos de impactos ambientais indesejáveis, como pela sua grande parcela de consumo de combustíveis na divisão da matriz energética brasileira. Desta forma, evidencia-se a relevância de uma análise e avaliação dos fatores que podem contribuir para o aumento da eficiência energética na frota nacional de veículos de carga.

Após analisar o status da situação atual, o arcabouço tecnológico e os fatores limitantes das infraestruturas existentes no país, fica evidente que há uma lacuna a ser preenchida no desenvolvimento e na aplicação de incentivos para ampliar o uso de tecnologias limpas para a mobilidade do transporte rodoviário de cargas no Brasil. Energia renovável oferece a oportunidade para redução de emissões de carbono e para sedimentar uma base mais sustentável para a civilização humana.

1.3. Questão de Pesquisa

A partir deste cenário, foi definida uma questão que deverá embasar esta pesquisa:

- Como quantificar os impactos ambientais em contraposição aos benefícios econômicos gerados pelos veículos rodoviários dedicados ao transporte de carga, definindo indicadores que permitam comparar as diferentes alternativas de veículos?

1.4. Objetivo Geral

O Objetivo desta pesquisa é desenvolver um modelo de apoio à decisão em processos de avaliação e classificação de veículos leves para o transporte de cargas, de forma a maximizar os benefícios econômico e ambiental, no âmbito do Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular.

A consecução desse objetivo foi embasada na Teoria de Sistemas, através de um pensamento holístico que utilizou os dados de desempenho ambientais e econômicos dos veículos leves destinados ao transporte de cargas, disponíveis no âmbito do PBEV, para a modelagem de indicadores para avaliação da Ecoeficiência, no sentido de se obter a redução dos impactos ambientais, aliada a um melhor aproveitamento da utilização econômica dos veículos.

Neste sentido, a proposta perpassa pela modelagem de indicadores de sustentabilidade, componentes de um modelo de apoio à decisão para a seleção de veículos de carga, em suas distintas configurações construtivas e variadas alternativas energéticas. A proposta se dará através do uso de método de apoio à decisão para a classificação dos veículos, tendo como premissa básica os conceitos do *triple bottom line* e a interdisciplinaridade das três dimensões nele intrínsecas.

Como desdobramentos esperados após a conclusão desta pesquisa, figuram a produção de material técnico, didático e informativo, em meios físico e digital, bem como palestras a serem ministradas no sentido de divulgar os resultados encontrados nesta pesquisa, que serão úteis para o conhecimento da comunidade acadêmica e dos tomadores de decisão nas áreas de transportes e eficiência energética veicular.

Tal proposta confere um caráter totalmente inédito a esta pesquisa, na medida em que, conforme será visto no capítulo dedicado à revisão da literatura, as aplicações já propostas para indicadores de Ecoeficiência, que foram desenvolvidas e publicadas até o presente momento, não cobrem o escopo de aplicação prática aqui definido para este trabalho, ao mesmo tempo em que não atingem o campo de aplicação que foi acima delineado para os resultados esperados ao final desta tese.

1.5. Objetivos Específicos

Para a consecução do objetivo geral proposto nesta pesquisa, serão tratados alguns objetivos intermediários, necessários para a construção e o direcionamento do conhecimento aplicado neste, conforme listado a seguir:

- i) Investigação e pesquisa das tecnologias de mobilidade para transporte rodoviário de cargas, atualmente usados no mundo e os respectivos impactos ambientais de cada uma delas;

- ii) Analisar como referência casos de sucesso na avaliação de Ecoeficiência;
- iii) Construir um modelo que auxilie na busca pela sustentabilidade no modal de transporte rodoviário, considerando as opções energéticas compatíveis com a realidade brasileira;
- iv) Definir e calcular indicadores, segundo uma perspectiva que mescele os parâmetros ambientais aliados com os benefícios econômicos esperados de veículos para o transporte rodoviário de cargas; e
- v) Desenvolver mecanismos informativos e de divulgação dos resultados para replicar e disseminar o modelo de apoio à decisão, utilizado nesta pesquisa.

1.6. Delimitação da Pesquisa

O escopo considerado para o desenvolvimento da proposta contida nesta tese foi delimitado pelo universo de veículos leves destinados ao transporte de carga, participantes do PBEV das categorias comercial, picapes e picapes compactas, disponíveis para venda no Brasil, no ano de 2019.

As informações técnicas utilizadas para a modelagem do método proposto na pesquisa se referem ao ano de 2019 estão disponibilizadas pelo Conpet e pelo Inmetro. Os dados utilizados se referem à fase de uso do ciclo de vida do veículo, no exercício das suas funções esperadas de transporte, não contemplando para o modelo proposto, no escopo desta pesquisa, os efeitos ambientais inerentes aos processos de fabricação e do fim de vida do mesmo.

1.7. Demonstração de aderência ao Programa PPSIG e à natureza interdisciplinar desta pesquisa: Decisões em Sistemas Gestão Sustentáveis

A mobilidade humana nas grandes cidades é complexa, pois envolve uma gama de conhecimentos muito além dos aspectos técnicos. Fatores sociais, ambientais, econômicos e políticos também estão envolvidos e trazem consigo a necessidade de se romper paradigmas energéticos e os modais simples de transporte que predominam no Brasil.

O aprimoramento da eficiência energética do sistema de propulsão dos veículos e a necessidade de adoção de recursos energéticos alternativos exigem uma análise completa de toda a cadeia de suprimento das fontes de energia, considerando-se, em sua totalidade as fontes energéticas, as matérias-primas, os recursos naturais necessários, a sua extração, processamento e distribuição, assim como os impactos ambientais decorrentes destas atividades.

A metodologia de Avaliação da Ecoeficiência (AEE) foi definida pelo *World Business Council for Sustainable Development - WBCSD* como sendo uma abordagem para a criar mais valor, gerando menos

impacto, sendo útil para tornar compatíveis o crescimento econômico e a preservação do meio ambiente (WBCSD, 2000).

De acordo com a norma publicada pela *International Organization for Standardization* - ISO 14045, que descreve os princípios, requisitos e orientações para a avaliação da Ecoeficiência de sistemas de produto (ABNT, 2014), a AEE é uma ferramenta quantitativa de gestão que permite o estudo de impactos ambientais do ciclo de vida de um sistema de produto em conjunto com o valor do sistema de produto para uma parte interessada. Conseqüentemente, a AEE, ao lado da ACV podem ser utilizadas por órgãos reguladores para a formulação de políticas governamentais mais consistentes entre fornecedores, produtores e consumidores, em prol da produção mais limpa, como política geral para a escolha de combustíveis para meios de transporte ou geração de eletricidade e para a rotulagem ambiental de produtos.

Os rótulos ambientais têm por objetivo aperfeiçoar os produtos de modo a torná-los menos agressivos ao meio ambiente do que os produtos tradicionais, além de desempenhar suas funções com alta qualidade, consumindo o mínimo possível de recursos naturais. A rotulagem ambiental é direcionada para informar consumidores e tentar alcançar, pelo menos três objetivos; conscientizar o público consumidor sobre o entendimento e os propósitos de um programa de rotulagem, bem como sobre os aspectos ambientais de um produto, influenciando assim a sua escolha e o comportamento dos fabricantes (BARBOZA, 2001; MONTEIRO, 2011).

Uma diversidade de rótulos ambientais obrigatórios e voluntários existe em todo o mundo e os mais conhecidos são os rótulos ecológicos, etiquetas de energia, selos verdes ou rótulos que certificam produtos. Os programas de rotulagem ambiental podem ser classificados com relação aos produtos que eles cobrem, com relação os problemas ambientais para os quais estão voltados, de acordo com o número de características avaliadas pelo programa ou pelo tipo de organização que administra o programa. Dentro da União Europeia, o rótulo ecológico, a etiquetagem de energia e etiquetagem veicular são exemplos proeminentes de rótulos que fornecem aos consumidores informações sobre o impacto de produtos e serviços sobre o meio ambiente (HAQ; WEISS, 2016).

Barboza (2001) exemplifica que existem três níveis de programas de rotulagem de produtos ou embalagens, que podem ser de primeira, segunda ou terceira parte. Declarações ambientais de primeira parte são comuns nas embalagens de produtos de consumo no Brasil e trazem informações orientativas, como o pictograma de reciclagem pertinente à embalagem do produto e informações sobre a ausência de substâncias nocivas como o chumbo, o mercúrio, o asbesto ou o CFC.

Os programas de segunda parte são aqueles que envolvem a rotulagem para produtos ou embalagens que são concedidos por associações comerciais. Não estão diretamente ligados à fabricação ou venda do produto e as categorias de informação podem ser estabelecidas pelo setor industrial ou por organismos

independentes, por exemplo, declarações como "Produto orgânico" e os selos E3 (*Encouraging Environmental Excellence*) e "*Design for the Environment*" (*DfE Label*).

Programas de rotulagem ambiental positivos de terceira parte emitem selos que certificam os produtos, sendo os mais conhecidos o Blaue Engel da Alemanha, o Ecomark do Japão, o Eco-logo do Canadá, e o Green Seal dos Estados Unidos, que concedem o uso de um logotipo para os produtos que demonstram serem menos prejudiciais em termos ambientais quando comparado com outros produtos, com base em um conjunto específico de critérios estabelecidos. Na área de eficiência energética, um dos mais conhecidos é o programa US Energy Star, que exige padrões rigorosos para consumo eficiente da energia para equipamentos eletroeletrônicos para a concessão o selo Energy Star.

Os programas de rotulagem neutros apresentam um relato sumário de fatos acerca do produto que permite aos consumidores fazer seu próprio julgamento com base no seu conteúdo específico. São selos informativos que indicam, de forma resumida, os atributos de um produto, deixando para os usuários a decisão final de compra ou não do mesmo. Tais programas de rotulagem são desenvolvidos porque os seus provedores entendem que os consumidores têm o direito de saber esse tipo de informação a respeito do produto. O mais conhecido programa desse tipo de selo é o que informa os teores nutritivos de produtos, desenvolvido pela Food and Drug Administration dos Estados Unidos (BARBOZA, 2001).

Sistemas de rotulagens ambientais voluntários, participativos, transparentes e baseados no mercado são instrumentos econômicos potencialmente eficazes para informar os consumidores sobre produtos com apelo à sustentabilidade. Paralelamente, os rótulos ambientais e declarações de produtos são importantes para sinalizar o desempenho ambiental e os programas de etiquetagem de eficiência energética com diferentes classes, que já se tornaram conhecidos há muitos anos, também pode ser usado para apresentar informações relativas à Ecoeficiência (KEMP; ANDERSEN, 2004).

Para tal, a noção de Ecoeficiência foi operacionalizada com base em parâmetros-chave, tais como consumo de energia, insumos e aspectos de uso do produto. O compromisso junto às iNDC de desenvolver estratégias para redução das emissões de GEE deve incluir indicadores que permitam monitorar o progresso, em uma série histórica, de questões ambientais. Existem distintas necessidades de indicadores para esses diferentes processos. Por exemplo, os indicadores de emissões de gases com efeito de estufa que são necessários para os três processos, uma vez que as alterações climáticas são uma prioridade tanto para o iNDC como para o Proconve e o Rota 2030, enquanto os setores de energia e transportes são os principais contribuintes para os níveis gerais de emissões.

Em outros países, a OCDE desenvolve há muitos anos indicadores sobre meio ambiente, integração setorial e desenvolvimento sustentável. Em nível global, também há espaço para desenvolver tais indicadores em colaboração com o PNUMA por meio de seu trabalho no Global Environmental Outlook.

Um conjunto básico de indicadores ajuda a resolver muitas das deficiências a serem abordadas por esta pesquisa, no sentido de vincular os objetivos e metas das políticas de redução de GEE, otimizar o uso de veículos para transporte de carga e, mais além, permitir que as necessidades de informação sejam mapeadas e disponibilizadas para as partes interessadas; priorizar as necessidades de dados e avaliar como os sistemas de rotulagem ambiental atuais atendem a essas necessidades e preencher espaços onde existem lacunas.

Assim, a Ecoeficiência pode ser aplicada como uma ferramenta que apresente dados que auxiliam na tomada de decisão, por meio de informações ambientais relacionadas ao cumprimento de uma necessidade econômica. Um sistema de transporte eficiente e de baixo custo contribui para aumentar a competitividade da empresa no mercado, reduzir preços dos produtos comercializados e melhorar a economia de escala na produção. Esse tipo de avaliação de desempenho privilegia aspectos econômico-financeiros em detrimento aos socioambientais, gerando a cultura de que as questões ambientais aumentam os custos e, por conseguinte, prejudicam o desempenho econômico das organizações. O conceito de ecoeficiência foi instituído para desmistificar esse fato, demonstrando que é possível unir as ideias de desempenho econômico e de redução de impactos ambientais (LEAL JR, 2010; VISCARDI *et al.*, 2018).

Existe, portanto, uma lacuna para a definição de indicadores que sejam capazes de oferecer esta visão ampla sobre o alcance e as limitações de alternativas para o transporte, considerando as emissões, os resíduos e impactos associados à etapa do uso no ciclo de vida de cada veículo, em contraponto aos benefícios proporcionados pela utilidade econômica dos mesmos. A revisão da literatura, apresentada a seguir, procura demonstrar que esta lacuna pode ser ocupada por uma avaliação de Ecoeficiência, que demonstrou ser uma ferramenta prática para a gestão dos aspectos ambientais e de valor econômico, em paralelo e de forma abrangente.

1.8. Estrutura da Tese

Esta pesquisa está estruturada em seis capítulos. O primeiro deles apresenta a introdução aos temas analisados nesta pesquisa, detalhando a situação problema, os objetivos, sua relevância, as justificativas e o foco do trabalho. O segundo capítulo traz uma revisão da literatura, apresentando definições com embasamento científico e as visões de diferentes autores sobre os principais temas que serão abordados na Tese. O terceiro capítulo explica a metodologia utilizada na condução desta pesquisa e na modelagem aplicada. O quarto apresenta a aplicação da metodologia proposta sobre o objeto específico deste estudo. O quinto capítulo perfaz uma análise e discussão dos resultados encontrados, e o último capítulo contém o desfecho com as conclusões da pesquisa.

2. Referencial Teórico

O segundo capítulo desta Tese apresenta o sequenciamento dos temas e conceitos correlacionados e pertinentes à construção do conhecimento necessário para a consecução dos objetivos desta pesquisa. Para atender a uma abordagem metodológica, é necessário que a estrutura do estudo seja desenvolvida de forma precisa, para que os resultados estejam alinhados com os objetivos propostos.

Os conceitos aplicados na Tese foram obtidos por meio do levantamento bibliográfico em fontes de pesquisa acadêmicas, livros e bancos de teses e dissertações disponíveis ao público nos portais de Periódicos Capes e *Science Direct*. As pesquisas para levantamento bibliográfico nas bases foram realizadas no período compreendido entre os meses de novembro de 2017 e novembro de 2019, e revisitadas, para atualização dos dados, entre os meses de fevereiro e março de 2021.

A bibliometria, como forma de estudo, tem colaborado com a compreensão da informação, principalmente no esclarecimento de fenômenos e eventos bibliográficos, trazendo sólidos ganhos para a investigação científica (SANTOS *et al.*, 2016).

2.1. Análise Bibliométrica

Com o objetivo de rastrear o referencial teórico necessário para o desenvolvimento do aspecto qualitativo desta pesquisa, após a definição do objetivo, baseado no tema central em desenvolvimento, foram definidas quatro áreas temáticas de pesquisa, para a realização de uma análise bibliométrica, a partir destas temáticas principais, sendo elas: transporte, energia, ACV, Ecoeficiência e rotulagem ambiental.

Foi elaborado o Quadro 1 com as principais palavras-chave, em inglês, sendo elas: “*Mobility/Transport*” (área 1), “*Energy*” (área 2), as expressões “*Life Cycle Assessment*” ou “*Life Cycle Analysis*” ou LCA (área 3), a expressão “*Eco-efficiency*” ou Ecoeficiência ou AEE, em português (área 4) e Rotulagem Ambiental (Área 5). Cada um desses eixos contém um conjunto de palavras-chave secundárias, conforme Quadro 1.

Quadro 1: Temas de pesquisa e respectivas palavras-chave

| Palavras-Chave | Área 1 | Área 2 | Área 3 | Área 4 | Área 5 |
|--------------------|----------------------|------------|----------------------|----------------|---------------------|
| Principais | Mobility / Transport | Energy | Life CycleAssessment | Ecoeficiência | Rotulagem ambiental |
| Secundárias | Road Transport | FossilFuel | Life CycleAnalysis | Eco-efficiency | Eco Labeling |
| | UrbanTransport | Biofuels | LCA | AEE | |

Elaborado pelo autor (2020)

A fim de se efetuar uma bibliometria consistente e eficaz, é importante a escolha de bancos de dados bibliográficos com relevante utilização por pesquisadores dos temas abordados (ARESE, *et al.*, 2017).

A partir da definição das palavras-chave, foram efetuadas pesquisas por artigos nos bancos de dados acadêmicos, envolvendo as 5 (cinco) áreas de pesquisa, e as diferentes combinações das palavras-chave derivadas das mesmas, utilizando as palavras-chave das 5 áreas, duas a duas e o operador booleano “AND”, conforme apresentado no Quadro 2.

Para esta pesquisa preliminar, foi utilizado o banco de dados do Portal de Periódicos Capes e o portal Science Direct. Após a primeira busca, foi aplicado um filtro, limitando o período de abrangência em 10 anos (2010 a 2019), e foram selecionados somente artigos.

A pesquisa no Banco de Dados da Capes (<http://www-periodicos-capes-gov-br>) foi atualizada no mês de março de 2021 e as consultas avançadas foram realizadas utilizando-se combinações entre as palavras-chave duas a duas. Assim foi feito um levantamento geral para conhecimento do volume de trabalho nas diversas áreas combinadas, com as palavras-chave pesquisadas, por assunto e apenas em artigos, utilizando a ordenação lógica apresentada no Quadro 2.

Quadro 2. Algoritmo usado para a pesquisa bibliométrica

| Algoritmo de Pesquisa |
|---|
| (Mobility OR Transport OR Road Transport OR Urban Transport) AND ("Life Cycle Assessment" OR "Life Cycle Analysis OR LCA) |
| (Energy OR "Fossil Fuel" OR Biofuel OR Solar wind power) AND ("Life Cycle Assessment" OR "Life Cycle Analysis OR LCA) |
| (Mobility OR Transport OR Road Transport OR Urban Transport) AND ("Eco-efficiency") |
| ("Eco-efficiency") AND ("Eco labeling") |

Elaborado pelo autor (2020)

Em uma pesquisa inicial e sem filtros foram obtidos um total de 4972 publicações para o conjunto de buscas feitas no Portal da Capes, e refeitas no mês de março de 2021. Este levantamento preliminar foi crucial para auxiliar no direcionamento focal a ser dado nas pesquisas e nos objetivos pretendidos com o desenvolvimento desta Tese. Os resultados obtidos foram revistos e atualizados no segundo levantamento feito, a partir do algoritmo definido no Quadro 2 e os resultados estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Resultado da pesquisa bibliográfica no Portal de Periódicos Capes/MEC

| Combinação das palavras chave utilizadas no campo “assunto” para busca avançada | Número de resultados encontrados para artigos publicados entre os anos de 2010 e 2019 |
|--|--|
| Transport and “Life Cycle Assessment” | 246 resultados |
| Transport and LCA | 110 resultados |
| Transport and “Life Cycle Analysis” | 139 resultados |
| “Road Transport” and “Life Cycle Assessment” | 20 resultados |
| Mobility and “Life Cycle Assessment” | 44 resultados |
| Mobility and LCA | 14 resultados |
| Mobility and “Life Cycle Analysis” | 23 resultados |
| “Road Transport” and LCA | 10 resultados |
| “Road Transport” and “Life Cycle Analysis” | 4 resultados |
| “Urban Transport” and “Life Cycle Assessment” | 1 resultado |
| “Urban Transport” and “Life Cycle Analysis” | Nenhum resultado |
| SUBTOTAL | 611 resultados |
| Energy and “Life Cycle Assessment” | 3933 resultados |
| “Fossil Fuel” and “Life Cycle Assessment” | 27 resultados |
| “Fossil Fuel” and “Life Cycle Analysis” | 10 resultados |
| “Fossil Fuel” and LCA | 9 resultados |
| Biofuel and “Life Cycle Assessment” | 208 resultados |
| Biofuel and LCA | 97 resultados |
| Biofuel and “Life Cycle Analysis” | 52 resultados |
| SUBOTOTAL | 4336 resultados |
| Transport and “Eco-efficiency” | 9 resultados |
| Mobility and “Eco-efficiency” | 1 resultado |
| “Road Transport” and “Eco-efficiency” | 1 resultado |
| “Urban Transport” and “Eco-efficiency” | 1 resultado |
| SUBOTOTAL | 12 resultados |
| “Eco-efficiency” and “Eco labeling” | 13 resultados |
| Transport and “Eco labeling” | 2 resultados |
| Mobility and “Eco labeling” | Nenhum resultado |
| “Road Transport” and “Eco labeling” | Nenhum resultado |
| SUBOTOTAL | 15 resultados |
| TOTAL | 4974 resultados |

Fonte: elaborado pelo autor (2021)

O levantamento bibliométrico preliminar, realizado na plataforma da Capes e apresentado na Tabela 2 indica que já existe um extenso conhecimento científico produzido pela comunidade acadêmica, na última década, relacionando os temas correlatos de transporte e energia com a ferramenta Análise de Ciclo de Vida.

Porém, o levantamento realizado evidenciou que ainda encontra-se em uma fase muito incipiente de desenvolvimento o conhecimento acadêmico correlacionando os temas das áreas de transportes com a Ecoeficiência e a Rotulagem ambiental, dado que ainda existe um baixo número de publicações (27 ao todo) reunindo a combinação destas áreas do conhecimento.

A fim de se confirmar a constatação observada no Portal Capes, foi realizado levantamento utilizando a mesma combinação de palavras-chave no portal Science Direct (<https://www.sciencedirect.com/search>), onde foram realizadas pesquisas avançadas e selecionados apenas artigos de pesquisa e de revisão, publicados no período de 2010 a 2019. A Tabela 3 apresenta os operadores booleanos utilizados e o número total de artigos obtidos para cada combinação de termos utilizados na pesquisa.

Tabela 3:Resultado da pesquisa bibliográfica no Portal Science Direct

| Combinação dos operadores booleanos utilizadas no campo “assunto” para busca avançada | Número de resultados encontrados | |
|---|----------------------------------|----------------------------|
| Transport and “Life Cycle Assessment” | Review articles (1,351) | Research articles (8,753) |
| Transport and LCA | Review articles (1,461) | Research articles (9,099) |
| Transport and “Life Cycle Analysis” | Review articles (705) | Research articles (3,015) |
| Mobility and “Life Cycle Assessment” | Review articles (254) | Research articles (962) |
| Mobility and “Life Cycle Analysis” | Review articles (117) | Research articles (380) |
| Mobility and LCA | Review articles (256) | Research articles (1,120) |
| “Road Transport” and “Life Cycle Assessment” | Review articles (90) | Research articles (699) |
| “Road Transport” and LCA | Review articles (77) | Research articles (684) |
| “Road Transport” and “Life Cycle Analysis” | Review articles (53) | Research articles (261) |
| “Urban Transport” and “Life Cycle Assessment” | Review articles (17) | Research articles (93) |
| “Urban Transport” and “Life Cycle Analysis” | Review articles (4) | Research articles (48) |
| SUBTOTAL | 4385 resultados | 25114 resultados |
| Energy and “Life Cycle Assessment” | Review articles (1,977) | Research articles (13,638) |
| “Fossil Fuel” and “Life Cycle Assessment” | Review articles (1,083) | Research articles (6,202) |
| “Fossil Fuel” and “Life Cycle Analysis” | Review articles (581) | Research articles (2,221) |
| “Fossil Fuel” and LCA | Review articles (931) | Research articles (5,837) |
| Biofuel and “Life Cycle Assessment” | Review articles (702) | Research articles (2,675) |
| Biofuel and LCA | Review articles (581) | Research articles (2,481) |
| Biofuel and “Life Cycle Analysis” | Review articles (368) | Research articles (1,057) |
| SUBTOTAL | 6223 resultados | 34111 resultados |
| Transport and “Eco-efficiency” | Review articles (164) | Research articles (1,231) |
| Mobility and “Eco-efficiency” | Review articles (30) | Research articles (277) |
| “Road Transport” and “Eco-efficiency” | Review articles (15) | Research articles (71) |
| “Urban Transport” and “Eco-efficiency” | Review articles (3) | Research articles (26) |
| SUBTOTAL | 212 resultados | 1605 resultados |
| “Eco-efficiency” and “Eco labeling” | Review articles (18) | Research articles (146) |
| Transport and “Eco labeling” | Review articles (78) | Research articles (566) |
| Mobility and “Eco labeling” | Review articles (13) | Research articles (103) |
| “Road Transport” and “Eco labeling” | Review articles (5) | Research articles (41) |
| SUBTOTAL | 114 resultados | 856 resultados |
| TOTAL | 10934 resultados | 61686 resultados |

Fonte: elaborado pelo autor (2021)

O levantamento feito no portal Science Direct apresentou resultados mais amplos do que os encontrados no Portal da Capes, indicam que estudos acadêmicos correlacionando as áreas temáticas de transporte, ecoeficiência e rotulagem ambiental ainda não foram desenvolvidos com a mesma profundidade que os temas correlacionando transporte, energia e análise de ciclo de vida. O levantamento feito permitiu ainda identificar as publicações indexadas onde tais temas de pesquisa têm sido desenvolvidos na atualidade, que orientou o foco das pesquisas para referências encontradas nos periódicos listados na Tabela 4, para as combinações das áreas temáticas: “*Transport*”/ “*Eco-efficiency*” / “*Eco labeling*”.

Tabela 4: Lista dos dez periódicos acadêmicos que mais publicam trabalhos correlacionados aos temas de pesquisa estudados na bibliometria, segundo o Science Direct.

| Nome do periodic | Publicações nos temas pesquisados |
|---|-----------------------------------|
| Journal of Cleaner Production | 735 |
| Resources, Conservation and Recycling | 82 |
| Renewable and Sustainable Energy Reviews | 70 |
| Procedia CIRP | 55 |
| Energy Policy | 52 |
| Ecological Economics | 48 |
| Science of The Total Environment | 45 |
| Transportation Research Part D: Transport and Environment | 36 |
| Ecological Indicators | 26 |
| Journal of Environmental Management | 31 |

Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

O Gráfico 2 apresenta, com base nos resultados encontrados no portal Science Direct o total de trabalhos publicados nos últimos 10 anos correlacionados aos artigos pesquisados para as combinações das áreas temáticas: “*Transport*”; “*Eco-efficiency*”; “*Eco labeling*”.

Apesar do filtro aplicado, dentre os resultados obtidos, foi registrada a ocorrência de duplicidades de trabalhos, bem como dezenas de publicações nas áreas de agricultura e química, que não foram considerados relevantes para o desenvolvimento pretendido nesta pesquisa. Assim, a pesquisa foi refeita com o uso das demais palavras-chave mais específicas em relação ao tema a ser estudado.

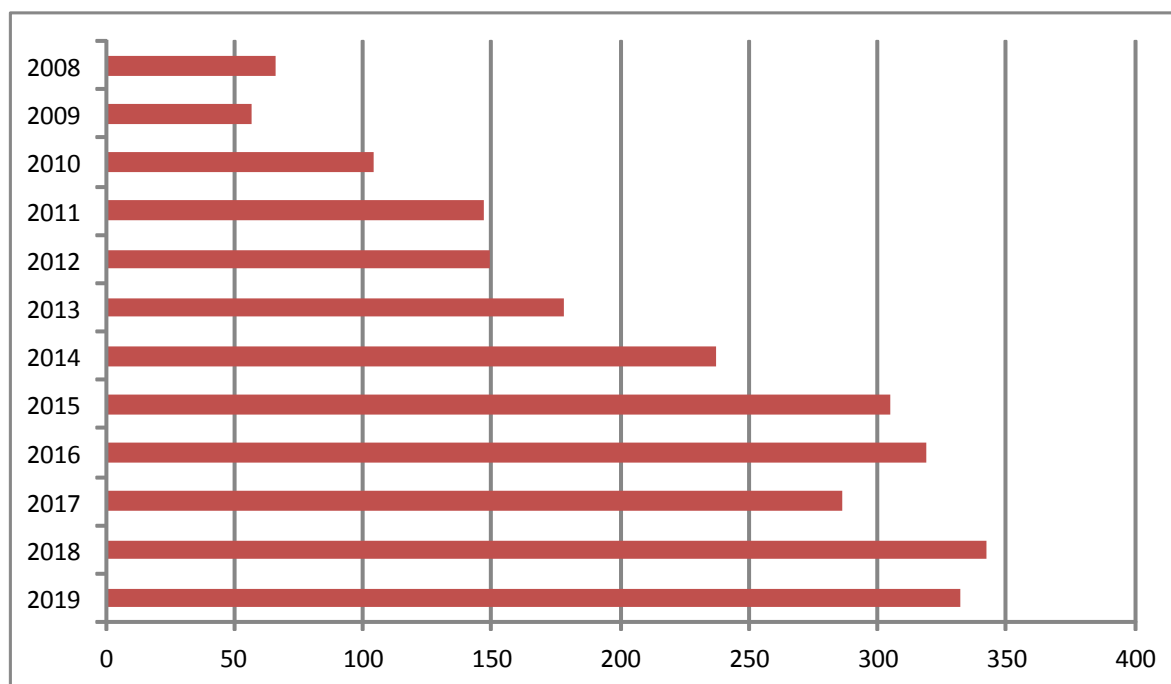


Gráfico 2: Número de publicações anuais relacionadas aos temas de pesquisa estudados.

Fonte: Elaborado pelo autor com base nos dados do portal Science Direct (2019)

A partir deste resultado, foram aplicados filtros de refinamento de busca para as seguintes áreas de conhecimento no Portal Capes: “*Transport*” and “*Eco-efficiency*”; “*Eco labeling*”.que gerou um novo elenco refinado com um resultado de 11 artigos publicados, no período de 2010 a 2019.

No Portal Science Direct foi aplicado como filtro a ocorrência das seguintes palavras-chave no título ou no abstract: “*Transport*”; “*Eco-efficiency*”; “*Eco labeling*”, que gerou como resultado um total de 100 trabalhos publicados nos temas de pesquisa, no período de 2010 a 2019.

Ampliando a escala temporal desta análise, para um período de 30 anos, a fim de se avaliar o quão recente são os temas estudados nesta pesquisa, foram localizados um total de 116 artigos alinhados com a visão pretendida para o direcionamento temático desta pesquisa nas bases pesquisadas. Ou seja, a maioria das publicações identificadas se concentra no período temporal mais recente. Tanto no portal Science Direct, quanto no Portal Capes foi possível constatar que o periódico com a maior incidência de publicações nas áreas de conhecimento correlatas a esta pesquisa é o *Journal of Cleaner Production*.

Os dados obtidos em cada base de dados foram exportados para uma planilha gerada pelo *software* Microsoft Excel, alocando cada resultado em uma aba. Todos os dados foram então consolidados para dar sequência ao estudo bibliométrico. A partir desta etapa torna-se possível verificar a existência de registros duplicados no banco de artigos bruto, utilizando o campo título do documento como base para a verificação.

Foi feita a leitura dos títulos dos artigos não duplicados. Desse total foram selecionados 111 artigos onde o título estava alinhado com os temas da pesquisa. Os 111 trabalhos foram novamente filtrados a partir da leitura dos seus resumos e/ou *abstracts*, a fim de verificar a aderência do assunto abordado, com os temas a serem investigados nesta pesquisa. Durante a leitura dos trabalhos selecionados, foram identificadas outras fontes importantes nas citações dos trabalhos selecionados, que foram então buscados aleatoriamente nas bases de pesquisa, visando dar melhor embasamento aos temas em desenvolvimento.

Após esta etapa, foram selecionados, enfim 98 artigos acadêmicos, 17 teses e dissertações e 18 capítulos de livros que foram efetivamente utilizados como embasamento teórico para esta pesquisa. A Tabela 6 estratifica os 98 artigos utilizados como referência, de acordo com seu ano de publicação.

Tabela 6: Cronologia de publicação dos artigos selecionados.

| Ano de publicação | Nº de trabalhos selecionados |
|-------------------|------------------------------|
| 2019 | 3 artigos |
| 2018 | 3 artigos |
| 2017 | 11 artigos |
| 2016 | 6 artigos |
| 2015 | 11 artigos |
| 2014 | 10 artigos |
| 2013 | 6 artigos |
| 2012 | 4 artigos |
| 2011 | 5 artigos |
| 2010 | 7 artigos |
| 2009 | 3 artigos |
| 2008 | 6 artigos |
| 2007 | 3 artigos |
| 2006 | 6 artigos |
| 2005 | 4 artigos |
| 2004 | 4 artigos |
| 2003 | 2 artigos |
| 2001 | 2 artigos |
| 2000 | 1 artigo |
| 1995 | 1 artigo |
| 1993 | 1 artigo |

Fonte: elaborado pelo autor (2021)

Além dos trabalhos acadêmicos, em complementação nos temas que se referem a dados sobre combustíveis, frota circulante, fontes energéticas, impactos e emissões associadas, foram coletadas as informações mais atuais disponíveis em anuários e outras publicações de órgãos públicos brasileiros e no exterior. Foram pesquisados dados e informações relevantes nas seguintes instituições: Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), EPE, IBAMA, Ministério do Meio Ambiente (MMA), Ministério de Minas e Energia (MME), Departamento Nacional de Trânsito (Denatran), Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (IBICT), Inmetro, *Official Journal of the European Union*, *United Nations Environmental Program* (UNEP), Diretivas da Comunidade

Europeia, *International Energy Agency* (IEA), *European Environmental Agency* (EPA) e WBCSD, além de normas técnicas específicas referentes aos temas pesquisados, publicadas pela ABNT, pela ISO e pela Associação Espanhola de Normalização (AENOR).

Para levantamento de informações referentes aos dados necessários para a projeção dos indicadores pretendidos para esta pesquisa, além da consulta na base de dados do Conpet, e do Inmetro foi também necessária a consulta a dados específicos do MMA/Ibama.

Em continuação, será apresentada a revisão da literatura consolidada, após o levantamento da bibliometria, sobre cada tema específico desta pesquisa.

2.2 Ecoeficiência

Um importante aspecto da sustentabilidade é a Ecoeficiência, termo que foi introduzido através da publicação do WBCSD em 1992 e ganhou visibilidade pela sua ratificação na ocasião da Conferência ECO 92, realizada no Rio de Janeiro (USÓN *et al.*, 2011; SANTOS *et al.*, 2016).

Ecoeficiência trata-se de uma estratégia de gestão que combina duas dimensões da sustentabilidade, a econômica e a ambiental (WBCSD, 2000). É o aspecto da sustentabilidade que relaciona o desempenho ambiental de um sistema de produto ao valor do sistema de produto. Por sistema de produto entende-se o conjunto de processos elementares, com fluxos elementares, desempenhando uma ou mais funções definidas e modelando o ciclo de vida de um produto, onde o seu valor é a valia ou desejabilidade atribuída a um sistema de produto (ABNT, 2014).

A conjunção das dimensões ambiental e econômica tem sido alvo de estudos e desenvolvimento de métodos de avaliação, devido à sua potencial utilidade para a gestão das organizações na sua relação com partes interessadas e com o público consumidor. Uma das denominações mais difundidas é a Avaliação de Ecoeficiência (AEE), cuja utilização pode ajudar as organizações a obter maior valor com menor impacto ambiental, proporcionando produtos mais sustentáveis e vantagem competitiva (SUBTIL, 2015).

A metodologia de avaliação de Ecoeficiência foi criada no início da década de 1990 pelo WBCSD, na qual a Ecoeficiência é calculada como o quociente da divisão do valor do produto (medido em receita de vendas, quantidade de produção, preço do produto, etc.) pela sua influência ambiental (medida em consumo de energia, de água, de material, quantidade de emissões, etc.) (VERCALSTREN; SPIRINCKX E GREERKEN, 2010).

Esse entendimento foi adotado pela norma ISO 14045, cujo texto foi incorporado pela ABNT, em 2014, tornando-se a norma brasileira NBR ISO 14045: Gestão ambiental – Avaliação da Ecoeficiência de sistemas de produto – Princípios, requisitos e orientações (ABNT, 2014). Nesta norma, a Ecoeficiência é apresentada como uma ferramenta prática para a gestão em paralelo dos aspectos ambientais e de valor, a partir da perspectiva sistêmica do ciclo de vida completo de um sistema de produto. Porém, na revisão da literatura nota-se que as suas aplicações podem se dar em determinadas etapas parciais do ciclo de vida de um determinado produto, em comparação com outros.

Conforme apresentado no Quadro 3, o WBCSD (2000) publicou as primeiras definições de Ecoeficiência, e lançou o primeiro guia de AEE, orientando para a obtenção de seus indicadores. Segundo a Agência Europeia do Ambiente, indicador é uma medida, geralmente quantitativa, que pode ser usada para ilustrar e comunicar, de forma simples, fenômenos complexos, incluindo tendências e progresso ao longo do tempo.

Para Nesticó e Maselli (2019), os indicadores são variáveis que tornam um fenômeno de interesse perceptível, resumindo ou simplificando as informações mais importantes relacionadas ao mesmo. Em outras palavras, um indicador deve comunicar, quantificar, avaliar e monitorar detalhes das informações sobre um determinado tópico específico.

Alguns autores ressaltam que a seleção de indicadores está intimamente relacionada à sua relevância política. Por outro lado, a robustez, adaptabilidade e disponibilidade dos dados de forma significativa influencia o processo de seleção de dados. Portanto, devem ser escolhidos indicadores com base na sua frequência, maior conformidade com o problema em questão, na sua mensurabilidade e disponibilidade de dados ao longo do tempo, na sua consistência com políticas e na possibilidade concreta de os tomadores de decisão adotarem os mesmos (NESTICÓ; MASELLI, 2019).

Em geral, um indicador é uma informação que descreve um problema. Em muitos casos, os problemas descritos são amplos e vários aspectos podem ser ilustrados. Assim, para a seleção de indicadores para um transporte mais sustentável, a interconectividade dos vários componentes do sistema de transporte também deve ser levada em consideração. Por exemplo, indicadores que descrevem as emissões de gases de efeito estufa podem ilustrar: a tendência geral das emissões de GEE e compará-la com as metas, emissões de GEE por poluentes, emissões de GEE pelos principais setores ou setores individuais; e comparações entre países. Todos esses subindicadores estão relacionados ao indicador de emissões de GEE e se baseiam no mesmo conjunto de dados coletados. No conjunto principal, o uso dos subindicadores garantirá consistência entre os diferentes indicadores, descrevendo aspectos diferentes do indicador principal (EEA, 2005).

Quadro 3: Resumo das definições sobre Ecoeficiência identificadas na revisão da literatura

| Autores e fontes identificados na revisão da literatura | Principais definições de Ecoeficiência |
|---|--|
| OECD (p.7, 1998) | Ecoeficiência expressa a eficiência com que os recursos ambientais são utilizados para atender às necessidades humanas. |
| WBCSD (p.7, 2000) | Oferecer bens e serviços com preços competitivos que satisfaçam as necessidades humanas, trazendo qualidade de vida e reduzindo progressivamente os impactos ecológicos e a intensidade do uso de recursos, durante o ciclo de vida do produto, até um nível condizente com a capacidade do planeta. |
| USA Environmental Protection Agency (EPA) (p.22, 2001) | Ecoeficiência é expressa como a relação entre a produção e o valor de produtos e serviços produzidos por uma organização, um setor ou a economia como um todo, incluindo a soma das pressões ambientais geradas pela organização, pelo setor, ou pela economia. A Ecoeficiência incentiva as empresas à inovação e competitividade, permitindo que se tornem responsáveis do ponto de vista ambiental e mais lucrativas no âmbito econômico. |
| Agência Europeia do Ambiente - EEA (p.75, 2003) | Ecoeficiência é a relação entre atividade econômica e os efeitos ambientais negativos associados. Uma combinação entre indicadores que ilustram tendências nas atividades (valor agregado, despesas, etc.) e indicadores de pressões sobre o ar, emissões, uso da água, etc. |
| UNEP (p.8, 2004) | O objetivo da Ecoeficiência é prover informações sobre a performance ambiental de um empreendimento, com respeito à sua performance financeira. |
| Huppés e Ishikawa (p.1, 2008) | Instrumento para análise da sustentabilidade, indicando uma relação empírica de atividades econômicas entre custo ou valor ambiental e impacto ambiental. |
| Gabriel e Braune (p.20, 2005) | A otimização da relação entre a utilidade econômica e os encargos ambientais de uma atividade. |
| Glavic e Lukman (p. 1878, 2007) | Ecoeficiência é a utilização mais eficiente de materiais e energia, a fim de obter mais rentabilidade e criar valor adicionado para um produto. |
| Yoshino <i>et al</i> (p.3, 2010) | É baseada no conceito de criar mais valor com menos impacto, compatibilizando a relação entre crescimento econômico e conservação do meio ambiente. |
| Vercalstren; Spirinckx e Greerken (p.228, 2010) | A otimização ecológica de sistemas globais sem desprezar os fatores econômicos. A junção do valor do produto ou serviço e seus aspectos ecológicos em uma relação de eficiência. |
| Uhlman e Saling (p.17, 2010) | Como ferramenta estratégica, a Avaliação da Ecoeficiência provê dados necessários para a tomada de decisão relativa a investimentos internos e portfólio de produtos. Sua importância é auxiliar o consumidor e outras partes interessadas externas a compreender a proliferação de “eco-confusão”, por meio da apresentação de uma grande quantidade de dados complexos, em uma forma clara e de entendimento simplificado. |
| Usón <i>et al</i> (p.3, 2011) | Ecoeficiência deve estimular criatividade e a inovação procurando novas maneiras de se produzir as coisas. Podem ser encontradas oportunidades |

| | |
|-----------------------------------|---|
| | em processos de reengenharia, valorização de eco-produtos, redesign de produtos através da ACV e de uma nova abordagem dos mercados, ofertando produtos mais funcionais, economizando em serviços, etc. |
| Leal Jr. e D'Agosto (p.6, 2012) | A Ecoeficiência é a habilidade de simultaneamente atingir os objetivos de produção e custo com qualidade e desempenho, reduzir impactos ambientais e conservar recursos naturais. |
| ABNT, ISO (p.2, 2014) | O aspecto da sustentabilidade que relaciona o desempenho ambiental de um sistema de produto ao valor do sistema de produto. |
| Subtil (p.38, 2015) | Trata-se da obtenção da eficiência de recursos, com minimização de recursos utilizados na produção por unidades de produtos e produtividade de recursos, com a eficiência de atividades econômicas para gerar valor agregado no uso dos recursos. |
| Barbieri (p.123, 2016) | A Ecoeficiência baseia-se na ideia de que a redução de materiais e energia ao longo do sistema produtivo aumenta a competitividade da empresa, ao mesmo tempo em que reduz as pressões sobre o meio ambiente, seja como fonte de recurso, seja como depósito de resíduos. |
| Caiado <i>et al</i> (p.900, 2017) | A Ecoeficiência tem o objetivo de reduzir a quantidade de recursos necessários, aumentar a produtividade e garantir que mais produtos serão obtidos a partir de menos matérias-primas. |
| Viscardi <i>et al</i> (p.1, 2018) | A Ecoeficiência tem como intuito mensurar o impacto causado e gerar informação para a tomada de decisão de forma a introduzir uma gestão ambiental considerada financeiramente viável. |

Fonte: elaborado pelo autor a partir da revisão da literatura (2019).

O WBCSD (2000) define três objetivos a serem atingidos pela Ecoeficiência:

- a) Reduzir o consumo de recursos. O consumo de material e energia deve ser reduzido por meio da melhoria da capacidade de reciclagem, produção de produtos com maior qualidade e tempos de vida mais longa podem também contribuir para;
- b) Reduzir o impacto sobre a natureza. As melhorias podem ser obtidas utilizando recursos renováveis que são geridos de forma sustentável, bem como minimizando emissões, resíduos disposição e substâncias tóxicas;
- c) Fornecer aos clientes produtos e serviços de maior qualidade. O benefício para o cliente pode ser melhorado com a disponibilização de serviços adicionais para o utilizador do produto, como por exemplo, funcionalidade e/ ou aumento do tempo de vida global. No entanto, é importante que o benefício crescente para o cliente não deve interferir nos dois objetivos anteriores.

Pioneiras na aplicação e na publicação de metodologias para a avaliação da Ecoeficiência, as empresas alemãs BASF (2002) e Bayer (2003) as desenvolveram, baseadas na ACV, como uma ferramenta de gerenciamento para a realização da AEE.

Pela metodologia da BASF, a Avaliação de Ecoeficiência deve ser comparativa entre produtos que tenham uma mesma unidade funcional, devendo ser medida entre as alternativas, considerando o maior número de produtos possível. Deve ser considerado ainda o ciclo de vida dos mesmos, sobre o qual serão realizadas as avaliações de indicador ambiental e de valor do sistema de produto, bem como a “relevância social”, que reflete a opinião da sociedade a respeito da importância do impacto ambiental obtido (SUBTIL, 2015).

Uhlman e Saling (2010) asseveram que na metodologia BASF, considera-se o custo total do ciclo de vida como indicador de valor, incluindo custos de matérias-primas, mão-de-obra, energia, capital de investimento, manutenção, transporte, assim como custos associados com impactos ambientais, entre outros. Este método ainda conduz a avaliação ambiental a partir de seis categorias de impacto: consumo de energia, consumo de recursos, emissões, uso do solo, potencial tóxico e potencial de risco (GLAVIC e LUKMAN, 2007). Estes impactos ambientais devem ser agrupados, utilizando-se procedimentos de normalização e ponderação. Tal ponderação deverá levar em conta o consumo de recursos de acordo com sua disponibilidade, bem como os impactos de fim de linha das emissões no ar, solo e água, considerando seus volumes críticos e potencial de contaminação. A média geométrica dos fatores de relevância ambiental e social é utilizada como um fator de relevância geral. Os resultados da normalização de cada impacto ambiental são então multiplicados por este fator e somados para obter-se o impacto ambiental final de cada alternativa. A última etapa do método BASF preconiza a realização de uma análise de sensibilidade, para avaliar a robustez da AEE (UHLMAN; SALING, 2010).

A metodologia publicada pela BAYER, em seu relatório de desenvolvimento sustentável de 2001, foi batizada de EcoCheck e objetiva comparar grupos de produtos e processos semelhantes, fornecendo seus graus de risco. O método BAYER propõe reunir uma equipe de especialistas que irão, inicialmente, definir pontos focais para a competitividade do produto, áreas temáticas, definição dos parâmetros, avaliação e mapeamento da AEE em uma escala. As áreas temáticas podem ser saúde, ambiente, economia, ciclo de vida, tecnologia, valor público. Os parâmetros são avaliados em função do risco, em uma possível escala enumerada de 1 a 5. Os resultados dos parâmetros devem ser analisados de modo que possam ser avaliados simultaneamente o desempenho ambiental e o valor do sistema de produto. Para esta análise, o método EcoCheck propõe o uso de um gráfico radar, no qual as seis áreas temáticas são apostas em cada vértice e os produtos podem ser comparados em relação aos produtos alternativos e também à sua posição individual no gráfico (SUBTIL, 2015).

Para Usón *et al.* (2011), a Ecoeficiência deve estimular a criatividade e a inovação nos sistemas de produção. Existem distintas aplicações dos princípios da Ecoeficiência em processos de reengenharia,

valorização de eco-produtos, logística reversa, eco-design e novas abordagens de mercado, considerando a funcionalidade dos produtos e a economia de serviços.

De acordo com a norma ISO14045, indicador de Ecoeficiência é uma medida que relaciona o desempenho ambiental de um sistema de produto ao valor do sistema de produto (ABNT, 2014). Esta norma consiste em um guia para a elaboração de estudos de AEE, sendo uma referência para identificação de requisitos específicos para a avaliação de aspectos relevantes e caracterização dos métodos. A dimensão ambiental é representada pelo desempenho ambiental de um sistema de produto, enquanto a dimensão econômica é o valor do sistema de produto. Tal definição pode ser considerada como de aceitação e reconhecimento internacionais, em virtude de sua publicação pela ISO.

Em adição, a revisão da literatura revelou que o conceito de Ecoeficiência voltado para o enfoque socioambiental, aborda tanto a utilização adequada de recursos energéticos, quanto a redução de custos, o que possibilita a obtenção de sistemas de transporte mais eficientes e de baixo custo, que aumentam a competitividade e permitem ganhos de escala pela redução dos custos do transporte, além dos evidentes benefícios ambientais (IQBAL *et al.*, 2017, SUBTIL, 2015).

A Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) é descrita por Usón *et al.* (2011) como uma ferramenta de gestão ambiental imprescindível para se alcançar a Ecoeficiência. Porém, uma vez que as atuais metodologias de ACV precisam ser adaptadas para as demandas de diferentes usuários, torna-se imperativo utilizar a ACV de forma mais eficiente. Algumas das principais barreiras para o uso da ACV na análise de Ecoeficiência são as percepções de que é necessária uma grande quantidade de informações e de trabalho intenso, que a tornam muito dispendiosa, além da exigência de alto grau de conhecimento e preparação por parte do analista de ACV, que também podem gerar maior complexidade e arbitrariedade para a interpretação dos resultados obtidos.

Assim, para fins de aplicação nesta pesquisa, o conceito de Ecoeficiência mostra-se adequado, pois assim como já definido por Leal Jr. e D'Agosto (2012), na medida em que promove uma contribuição à área de avaliação de desempenho em transportes, por meio de um enfoque específico que a princípio está fortemente associado ao contexto dos sistemas de produção, sendo perfeitamente possível adequá-la ao contexto do transporte de carga. O conceito de Ecoeficiência conjuga as ideias antagônicas de desempenho econômico-financeiro e redução das influências ambientais (VISCARDI *et al.*, 2018). Aplicar o conceito de sustentabilidade no setor de transporte de cargas é viável, conciliando as questões econômicas com as ambientais, permitindo melhorar o desempenho dos veículos com a redução do consumo de combustível, contribuindo para menores emissões de CO₂ e, conseqüentemente, reduzindo os custos de transporte (LEAL JR.; D'AGOSTO, 2012).

A revisão da literatura sobre a aplicação da Ecoeficiência no setor de transportes, com a utilização dos termos de pesquisa “*eco-efficiency*” e “*transport*”, nas bases de publicações acadêmicas investigadas (Science Direct Portal Capes), identificou trabalhos relacionando ações de Ecoeficiência em distintas aplicações no setor de transporte.

Paravantis e Georgakellos (2007) publicaram a revisão da literatura de uma investigação comparativa entre consumo de energia e emissões de CO₂ entre ônibus e automóveis de passeio, discutindo como mudança na composição dos combustíveis, na intensidade do uso do transporte e na evolução da tecnologia dos motores, ao longo dos anos, contribui para a redução do consumo e das emissões.

Yoshino *et al.*, (2010) desenvolveram um modelo de eficiência ambiental com a aplicação da metodologia de análise de envoltória de dados (DEA) em políticas de transporte público.

Usón *et al.*, (2011) descrevem ações para estimular renovação de frotas e a mudança de modais de transporte, na União Europeia, a partir do cálculo da Ecoeficiência comparando o desempenho de modais distintos de transporte e indicando ações para melhoria da Ecoeficiência.

Leal Jr. e D’Agosto (2012) utilizaram cálculos de Ecoeficiência na busca da melhoria do desempenho no transporte rodoviário de produtos perigosos para uma frota dedicada.

Maia e Carvalho (2015) publicaram uma pesquisa que apresenta alternativas eficientes para a renovação de frotas compostas por veículos de carga, aplicando as informações de eficiência energética dos veículos e introduzindo novos componentes e tecnologias que mitiguem o consumo de combustível, avaliando a Ecoeficiência.

Guimarães *et al.* (2018) apresentaram um estudo de avaliação da sustentabilidade do transporte de passageiros utilizando a Ecoeficiência com simulação de Monte Carlo.

Utilizando a aplicação da Ecoeficiência em frotas particulares de transporte rodoviário (VISCARDI *et al.*, 2018), e a análise de cenários de transportes ecoeficientes para apoio à avaliação da sustentabilidade (IQBAL *et al.*, 2017). BERMOND *et al.* (2019) atuaram sobre o transporte público, avaliando diferentes cenários com mudanças nos motores e combustíveis dos veículos analisados e propuseram seis indicadores de Ecoeficiência sobre emissões e consumo de combustível para avaliar qual mistura de motores e combustíveis traria a maior Ecoeficiência.

Assim, não foi identificada nas bases acadêmicas, durante o período de desenvolvimento desta tese, nenhuma publicação em trabalhos acadêmicos propondo o desenvolvimento de indicadores de Ecoeficiência no âmbito de estratégias voltadas para a eficiência energética de veículos de carga, justificando assim a originalidade desta pesquisa.

2.3 Impactos ambientais relacionados ao setor de transporte

Veículos rodoviários, movidos à combustão, produzem força para vencer a resistência à rotação pela queima de hidrocarbonetos. Assim, o setor de transporte é um dos principais causadores dos gases do efeito estufa e outros gases nocivos ao meio ambiente, sendo responsável por 20% das emissões globais de CO₂ (RIEVAJ; SYNÁK, 2017) e responsável por 46,3% das emissões de CO₂ no Brasil (EPE, 2017).

Além do CO₂, os veículos movidos a combustível fóssil são responsáveis por outros poluentes que degradam o ambiente e que são nocivos à saúde humana, dentre eles: monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (HC), materiais particulados, óxidos de nitrogênio (NO_x) e óxidos de enxofre (SO_x) (CARVALHO, 2009).

Segundo o Ministério do Meio Ambiente (2014), os principais poluentes atmosféricos oriundos da combustão de fontes energéticas fósseis são: Aldeídos (RCHO); Dióxido de Enxofre (SO₂); Dióxido de Nitrogênio (NO₂); Hidrocarbonetos (HC); Material Particulado (MP); Monóxido de Carbono (CO); Ozônio (O₃); vapor de água (H₂O); dióxido de carbono (CO₂); óxidos de nitrogênio (NO_x); Poluentes Climáticos de Vida Curta (PCVC), que incluem o carbono negro, o metano, os hidrofluorcarbonetos (HFC) e oxidantes fotoquímicos. Durante a combustão, os gases produzidos a partir da queima de hidrocarbonetos produzem H₂O, CO e CO₂.

Vapor de água. Para uma melhor compreensão do clima e das mudanças climáticas, Barbosa (2014) apresentou um importante estudo que aprofunda o entendimento dos processos que envolvem o vapor de água e as nuvens na nossa atmosfera, e conclui que o vapor de água é responsável por mais da metade do aquecimento provocado pela emissão antrópica de gases de efeito estufa. De acordo com Rievaj e Synák (2017), a justificativa reside no fato de que a molécula de água captura o calor da atmosfera, que é então emitido para a superfície terrestre. As propriedades térmicas da molécula H₂O determinam a intensidade do ciclo hidrológico e influenciam a estrutura termodinâmica da troposfera e a circulação dos ventos. Entretanto, uma estimativa precisa de quantificar esse aquecimento, ou mesmo da sensibilidade climática, ainda é muito difícil de fazer.

Monóxido de carbono. Gás produzido durante a oxidação incompleta do carbono contido nas cadeias de hidrocarbonetos dos combustíveis, altamente tóxico e inodoro. Ele entra em contato com a hemoglobina do sangue nos pulmões, combinando-se com ela com uma eficiência maior do que o oxigênio, reduz o transporte de oxigênio pelo sangue, podendo danificar células e tecidos, principalmente do sistema nervoso (MMA, 2014).

Dióxido de carbono. Este é considerado o mais danoso dos gases efeito estufa, perfazendo aproximadamente 55% das emissões totais. É um gás incolor, não tóxico e mais pesado do que o ar. Graças à fotossíntese vegetal, o dióxido de carbono retorna à biosfera de forma cíclica, mas a combustão de energia fóssil causa a emissão aproximada de 14×10^{10} toneladas de CO_2 para a atmosfera anualmente, fazendo a quantidade de dióxido de carbono na atmosfera aumentar a uma taxa de 0,2% ao ano. No Brasil, o setor de transporte responde a 9% do total das emissões de CO_2 enquanto as queimadas representam mais de 70% das emissões (CARVALHO, 2009).

Segundo a EEA (2005), o dióxido de carbono é o gás de efeito estufa mais importante, seguido pelo metano, nitrogênio óxidos e gases fluorados. Os principais emissores são, em ordem decrescente; usinas de energia (produção de eletricidade e calor), transporte, indústria, agricultura, resíduos e pequenos usuários de energia, incluindo as residências.

Dióxido de enxofre. Resultado da combustão de elementos fósseis, como carvão e petróleo, têm como fontes principais os automóveis e usinas termoeletricas. Gás não combustível, inodoro e incolor, que causa doenças respiratórias, uma vez lançado na atmosfera, o SO_2 é oxidado, formando ácido sulfúrico (H_2SO_4). Essa transformação depende do tempo de permanência no ar, da presença de luz solar, temperatura, umidade e adsorção do gás na superfície das partículas. A permanência no ar por um período grande de tempo faz com que o SO_2 e seus derivados (aerossóis ácidos) sejam transportados para regiões distantes das fontes primárias de emissão, aumentando a área de atuação desses poluentes (BRAGA *et al.*, 2001).

Hidrocarbonetos são resultantes da combustão incompleta do combustível fóssil, surgindo nas mais diversas formas a partir de combustíveis parcialmente queimados, formam compostos cancerígenos e irritantes aos órgãos sensoriais (PALLARO *et al.*, 2015). Os hidrocarbonetos não metano (NMHC), compreendem os HC totais (THC) menos a parcela de metano (CH_4), e provêm de uma grande variedade de processos industriais e naturais. Nos centros urbanos as principais fontes emissoras são os carros, ônibus e caminhões, nos processos de queima e evaporação de combustíveis. Seus efeitos são precursores para a formação do ozônio troposférico e apresentam potencial causador de efeito estufa (MMA, 2014).

Óxidos de nitrogênio. A queima de combustíveis derivados de hidrocarbonetos a altas temperaturas e pressão pode produzir óxido de nitrogênio (NO) e dióxido de nitrogênio (NO_2). Sua proporção em gases de escapamento fica entre 10 a 20% em motores a Diesel e 2% em motores a gasolina. Também podem reagir com a hemoglobina e modificar as estruturas de transporte de oxigênio pelo sangue. Se transformam em ácido nítrico e ácido nitroso em altos níveis de concentração, causando problemas cardíacos, circulatórios, pneumonia e doenças respiratórias na população (MMA, 2014).

Óxido nítrico. Gás incolor, responsável pela depleção da camada de ozônio e causador de efeito estufa, aproximadamente 300 vezes mais agressivo do que o CO₂. O ciclo de vida do óxido nítrico na atmosfera é de aproximadamente 150 anos. É tóxico para humanos, em pequenas quantidades pode causar estado de intoxicação e em concentrações maiores age como narcótico, tem efeito cáustico nas mucosas devido à sua inalação e pode causar deterioração do sistema psicomotor (RIEVAJ; SYNÁK, 2017).

Dióxido de nitrogênio (NO₂) é produzido a partir da oxidação do óxido nítrico, sendo mais tóxico e mais ativo do que este, assim como mais aromático e irritante quando inalado. Pode causar ataques de asma e produção de ozônio ao nível do solo, quando em reação química com a radiação ultravioleta (RIEVAJ; SYNÁK, 2017).

Material particulado. O material particulado é uma mistura de partículas líquidas e sólidas em suspensão no ar. Sua composição e tamanho dependem das fontes de emissão. O tamanho das partículas é expresso em relação ao seu tamanho aerodinâmico, definido como o diâmetro de uma esfera densa que tem a mesma velocidade de sedimentação que a partícula em questão. A União Europeia estabeleceu o limite de ocorrência em 50 mg/m³ para uma concentração de microelementos menor do que 10 µm ou PM10 (1 µm = 10⁻⁶ m). Enquanto elementos com 10+ µm podem ser absorvidos pelas vias aéreas e membranas, elementos menores do que 2 µm podem penetrar profundamente nos pulmões e causar um efeito nocivo em células pulmonares (BRAGA *et al.*, 2001).

Na Europa, a emissão de gases como monóxido de carbono (CO) e dióxido de enxofre (SO₂) vem sendo reduzida nos novos motores de forma bem sucedida com as novas tecnologias de motores e políticas aplicadas nas últimas décadas. Contudo, outros gases, como óxidos nítricos ainda estão crescentemente presentes na atmosfera (PAZDERNIK *et al.*, 2010).

De acordo com Rievaj e Synák (2017), a emissão de material particulado na União Europeia é responsável pela incidência de 25 milhões de doenças respiratórias e por 32 mil mortes prematuras anualmente. Um aumento de 10 mg/m³ na concentração de material particulado no ar pode levar ao aumento de 1% na taxa de mortalidade. O risco de desenvolver câncer de pulmão em pessoas vivendo em cidades é maior do que na população que vive no campo.

Grandes eventos internacionais, com destaque para a Rio 92, (Brasil), a 3ª Conferência das Partes sobre Mudanças Climáticas, realizada em 1997, em Kyoto (Japão); a Conferência de 2007 em Bali (Indonésia), a 15ª Conferência das Partes, realizada em 2009, em Copenhague (Dinamarca) e a COP21 de 2015 (Paris) tiveram como resultados em comum o estabelecimento de compromissos mundiais para a redução de emissões de GEE através das iNDC de cada país.

O Acordo de Paris (2015) apresenta como objetivo central “reforçar a implementação da Convenção, incluindo em seu objetivo fortalecer a resposta global à ameaça da mudança do clima, no contexto do desenvolvimento sustentável e dos esforços de erradicação da pobreza”, que inclui:

(a) Manter o aumento da temperatura média global bem abaixo de 2°C em relação aos níveis pré-industriais, e envidar esforços para limitar esse aumento da temperatura a 1,5°C em relação aos níveis pré-industriais, reconhecendo que isso reduziria significativamente os riscos e os impactos da mudança do clima;

(b) Aumentar a capacidade de adaptação aos impactos negativos da mudança do clima e promover a resiliência à mudança do clima e um desenvolvimento de tecnologias reduzidas em GEE, de uma maneira que não ameace a produção de alimentos; e

(c) Tornar os fluxos financeiros compatíveis com uma trajetória rumo a um desenvolvimento de baixa emissão de GEE e com maior capacidade de se adaptar à mudança do clima.

Uma iniciativa virtuosa em relação à estratégia de ação dos países no que tange à mitigação das emissões de GEE é que as medidas passam a ser adequadas à realidade de cada país, ainda que reconhecendo maior grau de responsabilidade das partes.

As alterações climáticas são agora uma das principais prioridades políticas europeias para os próximos anos. Inventários de emissões vêm melhorando continuamente há anos, por meio de cooperação científica e são um dos fluxos prioritários de dados para informações sobre estado e impactos, sendo cada vez mais exigido e entrando em ação por meio de iniciativas de pesquisas na União Europeia e pelo uso de programas de monitoramento de longo prazo existentes para políticas de fins mais relevantes (EEA, 2005).

Segundo o Balanço Energético Nacional - BEN, publicado anualmente pela EPE, o consumo final de energia no Brasil em 2018 sofreu queda de 1,0% em relação a 2017, devido à redução das perdas de energia nos centros de transformação e em decorrência da maior oferta hídrica e eólica (EPE, 2019).

O setor de transporte de carga/passageiros responde por aproximadamente 33% do consumo de energia do país. O setor teve seu consumo reduzido em 0,69 milhões de Toneladas Equivalente de Petróleo (tep). Esta contração se deu em virtude da redução do consumo de gasolina A de 13,1% (-3,3 mi tep) e, conseqüentemente, do anidro que registrou uma queda de 15,4% (-1,0 mi tep), no mercado de veículos leves. O álcool hidratado por sua vez, cresceu 38,6% (2,9 mi tep), não compensando portanto, o recuo do consumo da gasolina C. No caso do transporte de carga, o biodiesel cresceu 25,7% (0,7 milhões de tep) compensando assim a redução do consumo de diesel fóssil de -1,4% (EPE, 2019).

Paralelamente, segundo dados do Denatran (2019), a frota nacional circulante de veículos, em 2010 era de 48,5 milhões de veículos, passando para 64,14 milhões em 2015 e 104 milhões de veículos em 2019, ou seja, um vertiginoso crescimento de 114,43% da frota circulante nacional em apenas 9 anos.

Como consequências desse crescimento, em 2018, o total de emissões antrópicas associadas à matriz energética brasileira atingiu 416,1 milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente (Mt CO₂eq), sendo a maior parte (192,7 Mt CO₂eq) gerada no setor de transportes (EPE, 2019).

Ainda de acordo com dados do Balanço Energético Nacional (EPE, 2019), o mundo utilizava, em 2018, 86,3% de combustíveis fósseis e apenas 13,7% de fontes energéticas renováveis. Em contrapartida, em 2018, o Brasil utilizou 54,7% de fontes não renováveis e 45,3% de fontes renováveis.

A produção de energia elétrica com origem em fontes renováveis de energia mostrou um expressivo crescimento ao longo dos últimos anos. O Brasil possui destaque na utilização de fontes renováveis de energia, principalmente de origem hídrica. A fim de assegurar uma matriz energética sólida e confiável faz-se necessário uma análise complexa, incluindo muitos fatores, por vezes conflitantes (RANGEL *et al.*, 2017).

De 2017 a 2018, a participação de fontes renováveis na Matriz Elétrica Brasileira subiu 3,4%, devidos principalmente ao aumento da participação das fontes solar e eólica. Mas também observa-se crescimento no consumo de etanol (38,6%) e biodiesel (25,7%) no mesmo período. Dentre as fontes renováveis há maior participação da biomassa da cana (17,4%), seguida pelas fontes hidráulicas com 12,6%, lenha e carvão vegetal com 8,4% e outras renováveis com 6,9%, sendo de apenas 22,5% a participação das gerações eólica e solar juntas nesta última categoria. A participação dos combustíveis fósseis, que incluem petróleo e derivados representando 34,4%, gás natural (12,5%), carvão mineral (5,8%) e urânio (1,4%) em nossa matriz de oferta interna de energia (EPE, 2019).

Apesar da participação de fontes renováveis na Matriz Energética Brasileira ainda estar entre as mais elevadas do mundo, no entanto, observa-se que o País ainda apresenta forte dependência de combustíveis fósseis (particularmente o gás natural para a geração de eletricidade) à medida que novos aproveitamentos de energia hidrelétrica vão se tornando mais custosos e restritos pelos diversos impactos sociais e ambientais associados (HILGEMBERG; GUILHOTO, 2006).

Recentemente, a maior parte da responsabilidade pela geração de poluição e contaminação dos ambientes nas grandes cidades passou a ser direcionado ao excesso de veículos automotores presente nas ruas. Cerca de 70% e 90% dos poluentes do ar são produzidos pelos veículos, principalmente nas grandes cidades (EPELBAUM, 2002).

O crescente aumento da frota de veículos causou grande impacto na sociedade, seja pelo aumento da emissão de GEE (PARAVANTIS; GEORGAKELLOS, 2007), pela poluição sonora, ou pela destinação inadequada de fluidos efluentes da fase de uso do automóvel, como óleo lubrificante, óleo de freio, graxas e peças descartadas como baterias e peças de plástico, como painéis, para-choque, dentre outros. Outro

complicador é a destinação a ser dada aos veículos que chegam ao final do ciclo de vida; para não mencionar a necessidade de obtenção de combustível a um preço acessível para as necessidades de mobilidade cotidiana da população (BORTOLOTTI *et al.*, 2014).

Paravantis e Georgakellos (2007) descrevem ainda que o índice de emissões de GEE, no setor de transportes, aumentou 15% ao longo da última década do século XX, causado principalmente pelo crescimento da frota e aumento do número de viagens aéreas e do tráfego rodoviário. Os autores citam que as montadoras de automóveis frequentemente divulgam que o consumo específico de combustível dos novos automóveis vem sendo constantemente reduzido. Contudo, relatam que dados de alguns países da Europa ocidental mostram que o consumo específico de combustível da frota de carros não decresceu nos últimos anos da década passada, como na Holanda, onde consumo específico da frota não decaiu durante os anos 1990, no Reino Unido e Dinamarca que registram que a taxa de declínio do consumo na primeira década do século XXI foi menor do que no final dos anos 1980.

2.4 Políticas Públicas e Arcabouço regulatório brasileiro sobre emissões veiculares.

No Brasil, as emissões relativas às atividades de transporte representaram 46,3% do total de Mt CO₂eq emitido pelo país em 2018. Historicamente, o país foi responsável pela maior taxa de crescimento de emissões de GEE, entre 1970 e 1989, quando se observou um aumento de emissão de 22% per capita (RIBEIRO, 1997).

Para implementar sua iNDC, o Brasil propôs ações de mitigação de GEE e ações de adaptação aos efeitos da mudança do clima, assim como meios para implementar essas ações no país e em outros países em desenvolvimento, por meio de acordos de cooperação, com base na solidariedade e prioridades comuns de desenvolvimento sustentável, para ampliar iniciativas de cooperação com outros países em desenvolvimento (EPE, 2016).

As políticas, medidas e ações para implementar a iNDC do Brasil tem sido conduzidas no âmbito da Política Nacional sobre Mudança do Clima (Lei 12.187/2009), da Lei de Proteção das Florestas Nativas (Lei 12.651/2012, o chamado Código Florestal), da Lei do Sistema Nacional de Unidades de Conservação (Lei 9.985/2000) e da legislação, instrumentos e processos de planejamento a elas relacionados. A iNDC brasileira tem escopo amplo, que inclui mitigação, adaptação e meios de implementação, de maneira consistente com o propósito das contribuições de alcançar o objetivo da Convenção.

Historicamente, políticas nacionais de amplo alcance vêm sendo implantadas há mais de 40 anos. O incentivo à expansão do etanol na matriz energética brasileira teve início nos anos 1970, após a primeira

crise do petróleo. O Programa Proálcool visava, então, a redução da dependência do Brasil às importações de energia e da exposição do país às variações do preço internacional do petróleo. Para Leite (2007), a política de substituição do petróleo, adotada pelo país, a partir de 1979 foi alcançada com o Proálcool e com a expansão da hidroeletricidade, que promoveu a evolução da oferta de energia no país. Nos anos da década de 1990, a energia hidráulica passou a ocupar o primeiro lugar e o gás natural surge na matriz energética reafirmando a posição singular do Brasil no cenário mundial de diversidade na matriz energética.

Além da opção pelo aproveitamento das fontes renováveis, o Brasil também empreendeu ações e políticas voltadas à eficiência energética, desde a década de 1980. Políticas que objetivam aumentar a eficiência dos veículos e diversificar a matriz com o uso de fontes de energia alternativas aos combustíveis fósseis (etanol e biodiesel) (RIBEIRO e LEAL, 2006; RIBEIRO e ABREU, 2008; SILVA, 2011).

Em 6 de maio de 1986, a Resolução nº 18 do Conama criou o Proconve, coordenado pelo Ibama, que veio definir os primeiros limites de emissão para veículos leves, e contribuir para o atendimento aos padrões de qualidade do ar instituídos pelo Programa Nacional de Controle de Qualidade do Ar - Pronar. Em 28 de outubro de 1993, a lei nº 8.723 endossou a obrigatoriedade de reduzir os níveis de emissão dos poluentes de origem veicular, contribuindo para induzir o desenvolvimento tecnológico dos fabricantes de combustíveis, motores e autopeças, permitindo que veículos, nacionais e importados, passassem a atender aos limites estabelecidos.

Desde que o Proconve foi instituído, em 1986, foram estabelecidas normas sobre limites máximos de emissão de poluentes. O Proconve tem seu funcionamento por fases, as quais são instituídas por resoluções do Conama, com cronograma gradativamente mais rigoroso, desde a sua implementação. Para os automóveis e comerciais leves, as fases do programa são denominadas “L”, sendo que a fase L1 entrou em vigor em 1989. Atualmente, o programa encontra-se na fase L6. Para os veículos pesados (caminhões e ônibus), as fases são denominadas “P” e atualmente o programa encontra-se na fase P7. Entre o final de 2018 e 2019 foram publicadas as resoluções do Conama que estabeleceram novos limites de emissão: Resolução nº 492/2018 com as fases L7 e L8 para Automóveis e Comerciais Leves, Resolução nº 490/2018 com a fase P8 para Caminhões e Ônibus (CETESB, 2020). Estas resoluções trazem os valores máximos de emissão de poluentes que podem ser emitidos pelos veículos, conforme a Tabela 7. Assim, para que seja concedida a licença para comercialização de um determinado modelo de veículo no Brasil, seja ele produzido aqui ou importado, este modelo deve passar por um ensaio de emissão, em um laboratório credenciado pelo Ibama e em condições controladas, no qual é feita a medição das emissões e constatado se este veículo atende aos limites estabelecidos nas resoluções vigentes. Caso um determinado carro produza mais emissões que os limites estabelecidos, a sua comercialização não é permitida em território brasileiro (IBAMA, 2005).

Com a introdução da fase L8, a partir de 2025, inicia-se uma nova forma de controlar a emissão de poluentes dos veículos. A principal mudança será que o controle deixará de ser apenas sobre os veículos e passa a ser também sobre conjunto de veículos comercializados pelas empresas. Inicialmente a empresa desenvolve cada modelo de veículo enquadrando-o em um dos níveis, dependendo do tipo de veículo e motor que usa (comercial leve ou leve de passageiros, motor ciclo Diesel ou ciclo Otto). Esses níveis equivalem a uma faixa de valores contra a qual se comparam os resultados das emissões dos poluentes. Ao final de cada ano civil será calculada a média dos níveis dos modelos comercializados ponderada pelas vendas deles, denominada média corporativa. Essa média corporativa deverá estar abaixo dos limites definidos pelo Conama, apresentados na Tabela 7, conforme tipo de veículo. Essa metodologia de controle possibilita a efetiva redução das emissões, permitindo ao mesmo tempo maior flexibilidade para que a empresa adote um portfólio de modelos com maior ou menor controle (CETESB, 2020).

No Brasil, os progressos alcançados em termos de emissões são notáveis, conforme apresentado na Tabela 7, que demonstra a evolução obtida na redução das emissões de CO, HC, NO_x, CHO e vapores oriundos dos motores ciclo Otto para automóveis de passeio e comerciais leves, e para CO, HC, NO_x e material particulado, de motores a Diesel, de veículos pesados, ao longo de 30 anos.

Tabela 7 – Limites máximos de emissões veiculares definidos pelo Proconve (g/km)

| Fases ciclo Otto | Período de vigência | Automóveis | | | | | Comerciais Leves | | | | | Fases Diesel | Comerciais Pesados | | | |
|------------------|---------------------|------------|------|-----------------|-------|---------|------------------|------|-----------------|-------|---------|--------------|--------------------|------|-----------------|------|
| | | CO | HC | NO _x | RCHO | Vapores | CO | HC | NO _x | RCHO | Vapores | | CO | HC | NO _x | MP |
| L1 | 1989 – 1991 | 24,0 | 2,1 | 2,0 | n.a. | 6,0 | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | P2 | 11,2 | 2,45 | 14,4 | n.a. |
| L2 | 1992 – 1996 | 12,0 | 1,2 | 1,4 | 0,15 | 6,0 | 24 | 2,1 | 2,0 | 0,15 | 6,0 | P3 | 4,9 | 1,23 | 9,0 | 0,7 |
| L3 | 1997 – 2004 | 2,0 | 0,3 | 0,6 | 0,03 | 6,0 | 6,2 | 0,5 | 1,4 | 0,06 | 6,0 | P4 | 4,0 | 1,1 | 7,0 | 0,25 |
| L4 | 2005 – 2007 | 2,0 | 0,3 | 0,25 | 0,03 | 2,0 | 2,7 | 0,5 | 1,0 | 0,06 | 2,0 | P5 | 2,1 | 0,66 | 5,0 | 0,13 |
| L5 | 2009 – 2012 | 2,0 | 0,3 | 0,12 | 0,02 | 2,0 | 2,7 | 0,3 | 0,45 | 0,04 | 2,0 | P6 | 1,5 | 0,46 | 3,5 | 0,03 |
| L6 | 2013 – 2015 | 1,3 | 0,3 | 0,08 | 0,02 | 1,5 | 2,0 | 0,3 | 0,35 | 0,03 | 1,5 | P7 | 1,5 | 0,46 | 2,0 | 0,02 |
| L7 | 2016 – 2020 | 1,0 | n.a. | 0,08 | 0,015 | 0,5 | 1,0 | n.a. | 0,32 | 0,015 | 0,5 | P8 | 1,5 | 0,16 | 0,46 | 0,01 |

Fonte: Adaptado de CETESB (2020).

Os resultados alcançados pelo PROCONVE mostram que a estratégia para sua implantação com êxito se deve à adoção de fases cada vez mais restritivas credenciando-o como um dos programas mais bem sucedidos em termos de políticas para o setor ambiental. Se em 1986 os veículos leves emitiam, em média, cerca de 50g/Km de CO (seu principal poluente), já na sua primeira fase, definiu-se pela redução em 50 % dessa concentração em metade dos veículos novos fabricados no país. Com outro avanço em 1989, alcançou-se uma redução ainda mais drástica, então englobando a totalidade dos veículos leves novos, passando o limite de emissão de CO para 12g/km. A atual fase que entrou em vigor em 2016 reduzirá ainda mais esse limite para 1,0 g de CO por km rodado. Desde o início das exigências para os veículos pesados, as reduções de emissões foram da ordem de 80%, o que trouxe grandes benefícios para o ar das regiões metropolitanas, detentoras de grandes frotas de ônibus e caminhões. Evoluções tecnológicas decorrentes do Programa se deram com o uso de catalisadores, injeção eletrônica de combustível nos veículos, bem como às melhorias nos combustíveis automotivos comercializados no Brasil (MAIA; CARVALHO, 2015).

O nível mais alto é igual ao limite da fase L7, portanto, fica vedada a comercialização de veículos mais poluentes que o estabelecido na fase anterior. As novas fases L7 e L8 para veículos leves e P8 para veículos pesados passam a vigor ao longo da década de 2020 com limites bastante restritivos, como indicado na Tabela 7. Para atender aos limites, o portfólio de veículos planejado para ser comercializado no ano para cada marca e pode ser composto de modelos enquadrados em níveis maiores ou menores, desde que a média corporativa esteja abaixo do limite. Assim, para compensar a venda de veículos mais poluidores, a montadora deve vender veículos menos poluidores ou com emissão nula, como elétricos (CETESB, 2020).

Em 1991, o Ministério de Minas e Energia instituiu de forma promocional o Conpet, secretariado pela Petrobras, com o objetivo de estimular a conjugação de esforços entre as montadoras de automóveis, transportadoras, consumidores e governo, na promoção da mentalidade contra o desperdício no uso de combustíveis, com a redução da emissão de gases poluentes e estímulos à pesquisa e ao desenvolvimento tecnológico relativo à eficiência energética. Paralelamente, observou-se um esforço para uma significativa melhora da qualidade da gasolina e do álcool distribuídos no país (LEITE, 2007).

Mais recentemente, o desenvolvimento da tecnologia de motores bicombustíveis (flexíveis), que admitem o uso eficiente e alternativo de gasolina e etanol, desde que foram lançados em 2003, obteve grande aceitação no mercado, assim como o Programa Inovar Auto e outras iniciativas isoladas como os estímulos para uma renovação da frota, obtidas por via da redução de alíquotas de IPI, na década de 2010.

O projeto Rota 2030 Mobilidade e Logística, que veio para substituir o Inovar Auto, se estrutura sobre três eixos temáticos. O eixo da segurança veicular prevê a inclusão de tecnologias para preservar a integridade física dos ocupantes de automóveis e aperfeiçoar e integrar os sistemas de segurança ativa e passiva, monitoramento, comunicação, atuação e controle presentes nos veículos. As linhas de atuação

incluem dispositivos e sistemas de segurança, tecnologias para aumento da autonomia, controladores inteligentes para segurança viária, algoritmos para melhorar dirigibilidade e segurança, tecnologias para automação de veículos agrícolas e para a segurança de motocicletas.

No eixo de propulsão alternativa à combustão, o foco do programa é o desenvolvimento de novas tecnologias, principalmente componentes e sistemas para veículos elétricos, híbridos e a célula a combustível, considerando a dinâmica veicular, a caracterização de desempenho do veículo, contribuindo para a eficiência energética e a dirigibilidade. Para isso, foram definidas linhas de atuação que incluem sistemas para eletrificação de veículos pesados e de veículos agrícolas.

No eixo de biocombustíveis, que inclui desenvolvimento e aplicação de tecnologias, motores e componentes ligados a biocombustíveis para que toda a cadeia de fornecimento do setor automotivo possa obter e usufruir soluções para o seu avanço. Integram soluções para a produção de biocombustíveis dentro das especificações técnicas e melhoria dos combustíveis atuais para o aumento da eficiência e redução de impactos. As linhas de atuação incluem estruturação de plataformas de novas tecnologias, melhoria de desempenho do processo de combustão, redução de emissões tóxicas e poluentes, sistemas eficientes de armazenamento, ampliação do uso de bioenergia para mobilidade. Tais iniciativas vislumbram a disseminação do uso dos biocombustíveis no mercado.

Em adição, a nova Política Nacional de Biocombustíveis, aprovada pela lei 13.576, de 26 de dezembro de 2017, a RenovaBio pretende fomentar o aumento da produção de biocombustíveis em padrões mais sustentáveis. Prevê um tratamento de mercado diferenciado para os biocombustíveis com menor emissão de GEE em seu ciclo de vida. Para tanto, estabeleceu um arcabouço metodológico e ferramental para a contabilidade da intensidade de carbono dos biocombustíveis e sua comparação com os combustíveis fósseis.

Dentre as iniciativas nacionais de maior apelo e reconhecimento nesta área destacam-se o Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE), um instrumento de rotulagem ambiental já em uso no Brasil há mais de 35 anos e que foi cooptado para ser uma das ferramentas executoras do Rota 2030, assim como os programas voltados a promover o uso eficiente da eletricidade, do gás e dos combustíveis (CONPET, 2019).

2.5 Rotulagem Ambiental

Rotulagem ambiental é definida, na literatura, como uma forma de atestar produtos que estejam em conformidade com o seu uso pretendido e que apresentem menor impacto ambiental em relação aos demais produtos similares concorrentes existentes no mercado (BARBOZA, 2001).

Segundo a norma NBR ISO 14025 (ABNT, 2015), o rótulo ambiental é uma declaração que indica os aspectos ambientais de um produto ou serviço. Uma rotulagem ou declaração ambiental pode tomar a forma de uma citação escrita, símbolo ou gráfico sobre um produto ou embalagem, ou estar contido na literatura técnica de um produto, boletins técnicos, anúncios de publicidade, entre outros.

Para Haq e Weiss (2016), a rotulagem ambiental pretende fornecer aos consumidores informações sobre o impacto ambiental de produtos e serviços com base em critérios verificáveis. Representa uma opção política de custo baixo e facilmente implementável para superar a assimetria de informações e as falhas de mercado, orientando as pessoas para escolhas de produtos com informações ambientalmente favoráveis.

De acordo com Lemos e Barros (2006), os primeiros rótulos de caráter ambiental surgiram na década de 1940, especificando informações sobre manuseio e armazenagem de produtos agressivos tais como pesticidas e agrotóxicos.

Para Monteiro e Costa (2011), a rotulagem ambiental cumpre o papel de comunicação entre o fornecedor de um produto com o mercado consumidor, utilizado para fornecer informações a respeito de aspectos ambientais de um produto. A rotulagem ambiental é um assunto recente, cada vez mais em evolução e que vem sendo introduzida tanto nos países desenvolvidos, quanto nos em desenvolvimento. Ela é uma das ferramentas que pode contribuir para a implementação de políticas públicas em prol do desenvolvimento de novos padrões de consumo sustentável, que envolvem condições ambientalmente mais saudáveis e, ainda contribuem para a evolução da produção industrial.

Para Gueron (2003), diante da falta de clareza entre os consumidores sobre a rotulagem ambiental, e visando reduzir os custos do comércio internacional, a tendência dos programas de rotulagem ambiental é chegar a um ponto de harmonização e padronização. A rotulagem é útil não apenas por seus aspectos ambientais, mas também permite ao consumidor distinguir os produtos e serviços com boa performance ambiental em relação à concorrência desleal de produtos de baixa qualidade. Além disso, a precisão das informações transmitidas aos consumidores é de importância crítica, pois informações imprecisas podem desviar os consumidores de escolhas ambientalmente ideais.

Para Barboza (2001), os selos ambientais são concedidos se o produto ou serviço alcançar os critérios ou conjunto de critérios de um programa de rotulagem específico. Os critérios desenvolvidos para os produtos são de duas categorias. Critérios que se baseiam na performance ou no consumidor final do produto. Um grande número de programas concedem rótulos que têm como base a performance do produto ou no consumidor final. São programas que concedem um rótulo positivo para fabricantes de produtos que são menos danosos para o meio ambiente, programas que requerem rótulos para produtos que contêm substâncias perigosas. São programas que têm seus critérios voltados para as características inerentes aos produtos em si.

Critérios que se baseiam em como o produto foi fabricado, também conhecido como seu processo e método de produção (PPM). Para serem mais eficazes, os programas de rotulagem estão também, cada vez mais, concedendo selos com critérios baseados na descrição do método de processo e produção do produto. Como esses programas visam o ciclo de vida completo do produto, eles tendem a dar um quadro mais completo do impacto ambiental total do produto.

Devido à proliferação de rótulos ambientais no mercado mundial e diante da necessidade de estabelecer padrões e regras para seu uso adequado, reconhecendo a importância da comunicação ambiental e o correspondente potencial de alegações ambientais imprecisas e enganosas, a ISO desenvolveu normas com orientações para a rotulagem ambiental. A ISO classifica rótulos ambientais em três categorias: rótulo tipo I, tipo II e tipo III. Os princípios gerais definidos na norma ISO 14020 (ABNT, 2002) definem que os rótulos devem ser acurados, verificáveis, relevantes, verdadeiros e que não devem criar barreiras comerciais (LEMOS; BARROS, 2006). As normas ISO classificam os rótulos em três categorias: tipo I, tipo II e tipo III, tendo sido elaborada, para cada tipo de rótulo, uma norma específica cujas principais peculiaridades serão apresentadas no Quadro 3. A ACV é a metodologia recomendada pela ISO para a obtenção dos rótulos ambientais tipos I, II e III, conforme estabelecido nas normas da série ISO 14020 (ABNT, 2002). Estas informações encontram-se sintetizadas no comparativo do Quadro 4.

Quadro 4 - Tipos de rótulos ambientais e suas características

| Tipo I – ISO 14024 | Tipo II – ISO 14021 | Tipo III – ISO 14025 |
|--|--|---|
| Voluntário | Voluntário | Voluntário |
| Critérios avaliados por 3ª parte, incluindo procedimentos de certificação para a concessão do selo. | Auto declaração ambiental emitida pelo fabricante, sem envolvimento de 3ª parte | Dados ambientais quantitativos avaliados por 3ª parte e submetidos a análise crítica |
| Critérios múltiplos baseados em impactos de algumas fases do ciclo de vida do produto | Normalmente baseado em critério único | Critérios múltiplos baseados na ACV completa do produto |
| Licença ou sistema de premiação concedida por 3ª parte para uso de um rótulo | Declaração em forma de texto ou imagem - pouca informação e as melhorias devem ser quantificáveis | Informação quantificada, que pode ser apresentada sob forma de texto, gráfico ou ilustração |
| Destacar aqueles produtos que tenham melhor desempenho ambiental dentro de seu grupo. Ex.: Selo The Flower (Ecolabel europeu), Nordic Swan, Blaue Engel, Green Seal, Energy Star. | Apresentar ao consumidor melhorias de critérios ambientais que sejam quantificáveis, incluindo textos, símbolos e gráficos. Ex.: Contém percentual de material reciclado na composição. | Comparação de perfis ambientais de produtos, baseado numa completa avaliação do ciclo de vida, tanto nas relações comerciais B2B quanto B2C. Ex.: Sistema suíço EPD. |

Fonte: Adaptado de Monteiro; Costa (2011)

As rotulagens do tipo I e II consideram o pensamento do ciclo de vida, para assegurar a relevância ambiental das informações, mas sem a exigência da realização completa da ACV. Já a rotulagem do tipo III fornece dados ambientais quantificados sobre parâmetros já preestabelecidos e baseados obrigatoriamente numa ACV completa. É mais voltada para relacionamento de negócios entre duas empresas. A ISO 14025 - Rotulagem Ambiental Tipo III define princípios e procedimentos que orientam os programas de rotulagem que pretendem padronizar e certificar o padrão do o Ciclo de Vida, ou seja, garantindo que os valores dos impactos informados são corretos, sem definir valores limites, devendo sua declaração ser verificada por uma terceira parte (ABNT, 2015).

Kohlrausch (2003) ratifica que a ISO recomenda o uso da ACV nos programas de rotulagem, mas, na prática, na maioria dos casos é adotada uma análise limitada que foca apenas na etapa do ciclo de vida cujo impacto seja maior, e, a partir desse ponto, identifica um único aspecto ambiental para atender aos critérios exigidos para concessão do selo.

Barboza (2001) classifica os principais rótulos ambientais em dois grupos: Certificações multiatributo e certificações de um único atributo. Blaue Engel, Eco-logo e Green Seal são programas de rotulagem multiatributo que concedem um selo de aprovação estabelecido por uma terceira parte, sendo reconhecidos como respeitados padrões ambientais para distintos produtos e serviços. O quadro 5 lista alguns dos principais programas de rotulagem ambiental pioneiros e ainda existentes nos países que se encontram mais avançados nesta questão, o ano de criação de cada um e os produtos focos de cada programa.

Quadro 5 – Principais rótulos ambientais desenvolvidos nos países pioneiros no tema.

| Países | Rótulos ambientais voluntários | Ano de Criação | Categoria | Categorias de produtos rotulados |
|---------------------------------------|--------------------------------|----------------|--------------------------------|--|
| Alemanha | Blaue Engel | 1978 | Tipo I | Pilhas, baterias, tintas, detergentes e saneantes domésticos |
| Canadá | EcoLogo | 1988 | Tipo I | Produtos agrícolas, móveis, papéis, detergentes, saneantes e tintas |
| EUA | Green Seal | 1989 | Tipos I / III (baseado em ACV) | Lâmpadas fluorescentes, detergentes, papel de jornal, óleos lubrificantes, tintas, material de limpeza e embalagens plásticas |
| Japão | Japan Eco Mark | 1995 | Tipo I | Aparelhos eletroeletrônicos, tintas e cartuchos de impressão, produtos de plástico, vidros, óleos lubrificantes, papel, móveis, materiais de construção e calçados |
| União Europeia (transnacional) | EU Ecolabel | 1992 | Tipo I | Máquina lava-louças, adubos para solo, papel higiênico e detergentes |
| Coréia, Taiwan e Tailândia | Korean Eco-label (KELA) | 1994 | Tipos I / II | Aparelhos eletroeletrônicos, produtos químicos e tintas e cartuchos de toner de impressão. |

Fonte: Adaptado de Simão (2011)

As certificações de um único atributo emitem selos que atestam uma característica do produto, tais como “reciclado” ou “biodegradável” ou “consome menos energia”. Os produtos têm a conformidade verificada apenas para aquele atributo específico, como é o caso dos selos que visam premiar o baixo consumo energético de equipamentos, como o Selo Procel e o Selo FSC, que identifica madeira produzida segundo técnicas específicas de manejo florestal.

Lemos e Barros (2006) apresentam aspectos negativos da rotulagem Tipo I, os clássicos “selos verdes”, a partir do momento em que afirma que rótulos como o Blauwe Engel apresentam dicotomias, pois podem premiar um produto por seu baixo consumo de energia durante sua fase de uso mesmo apresentando, entretanto, uma grande emissão de resíduos tóxicos em sua fase de produção. Portanto, a rotulagem ambiental requer um design cuidadoso para influenciar o comportamento do consumidor da maneira pretendida.

A rotulagem ambiental experimentou grande impulso a partir da primeira década do século XXI, quando ampliou-se a sua abrangência para sistemas de certificação de empreendimentos sustentáveis, como o *Leadership in Energy and Environmental Design (LEED Reference Guide for Green Building Design and Construction)* e o Alta Qualidade Ambiental (AQUA) para a certificação de edifícios residenciais, presentes no Brasil desde 2007. O LEED e o AQUA tornaram-se referenciais técnicos, contendo estratégias de projeto e obra para reduzir o impacto da construção civil no meio ambiente, adicionando mais valor ao empreendimento que possui responsabilidade ambiental, um diferencial buscado pelos empreendedores e mais exigido pelo mercado (CAIADO, 2014).

Haq e Weiss (2016) destacam que a rotulagem energética de aparelhos domésticos tem sido eficaz na promoção de produtos com eficiência energética. Porém, especificamente no campo da rotulagem veicular de consumo e emissões, os consumidores geralmente escolhem um modelo de carro, considerando uma gama de fatores como preço, consumo energético, tipo de combustível, conforto, tamanho, confiabilidade, segurança, potência do motor, bem como marca e imagem.

Embora um consumidor possa, em uma situação de compra, ter a intenção de escolher um carro eficiente, a sua decisão de compra acaba sendo influenciada por essa série de fatores. Os consumidores podem considerar os atributos ambientais relativos a informações sobre consumo de combustível e impactos ambientais sendo menos importantes do que outros fatores essenciais como, por exemplo, a capacidade de transporte, na escolha de um modelo de carro. A diversidade dessas influências pode tornar a rotulagem uma ferramenta de política ambígua que pode remover assimetrias de informação, mas pode não necessariamente resultar na escolha ambientalmente mais desejada (HAQ; WEISS, 2016).

Assim, a necessidade de informar outros aspectos ambientais, como o consumo de água, emissões de GEE, emissão sonora, consumo energético, juntamente com o desempenho esperado do produto, levou ao desenvolvimento de etiquetas ambientais que trazem uma gama mais ampla de informações, tais como aquelas utilizadas para identificar a capacidade do produto em realizar uma determinada função, e o custo ambiental resultante deste cumprimento. As etiquetas de eficiência energética vêm sendo aperfeiçoadas no sentido de atender de forma cada vez mais ampliada a esta demanda.

2.6 Etiquetagem de Eficiência Energética

O Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) é um programa de eficiência energética coordenado pelo Inmetro em parceria com o Conpet, Eletrobras e IBAMA, desde 1984. A partir da criação do PBE foram instituídos programas de avaliação da conformidade voluntários que disseminaram no Brasil o uso da Etiqueta Nacional de Conservação da Energia (ENCE) para divulgar informações sobre o desempenho dos produtos, no que tange à sua eficiência energética. Criado com o objetivo de prover os consumidores de informações que lhes permitissem avaliar o consumo de energia dos equipamentos eletrodomésticos e auxiliar, na sua decisão de escolha, selecionando aqueles de maior eficiência energética, o PBE possibilitou reduzir investimentos governamentais em novas unidades geradoras e redução do consumo energético para a população em geral (SIMÃO, 2011).

Durante a crise energética brasileira, ocorrida no ano de 2001, o governo brasileiro decidiu priorizar um projeto de lei (PL) que tramitava no Senado Federal, e que tratava de estabelecer uma política nacional de eficiência energética para equipamentos, máquinas e aparelhos consumidores de energia, comercializados no país. Foi publicada, então, a Lei nº 10.295/2001 determinando que o Poder Executivo estabelecesse os níveis máximos de consumo ou mínimos de eficiência energética de máquinas e aparelhos consumidores de energia comercializados no país. A lei ainda previa que, num prazo de até um ano a partir da regulamentação específica de cada produto, seria elaborado um programa de metas, para uma progressiva evolução dos índices.

O passo seguinte à publicação da lei trouxe a publicação do Decreto nº 4.059/2001, que regulamentou a referida lei e criou o Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética (CGIEE), com a função, entre outras, de elaborar regulamentação específica para cada tipo de máquina e aparelho consumidor de energia, estabelecendo também os pontos a serem abordados na regulamentação específica de cada produto (normas técnicas de referência, mecanismo de avaliação da conformidade, níveis a serem atingidos, fiscalização, etc.). Neste mesmo decreto ficou também estabelecido que o Inmetro seria o órgão

responsável pela condução dos Programas de Avaliação da Conformidade e pela fiscalização do cumprimento às regulamentações específicas de cada produto.

Por meio da Lei de Eficiência Energética de 2001, houve a determinação do estabelecimento de níveis máximos de consumo ou mínimos de eficiência energética de máquinas e aparelhos consumidores de energia comercializados no País, com a introdução da etiquetagem energética de produtos.

Como consequência deste decreto, o Inmetro, que até então estabelecia de forma voluntária os programas de etiquetagem, começou a estabelecer a obrigatoriedade para os programas estratégicos na área de desempenho energético, tendo, portanto, papel fundamental na execução da referida lei de eficiência energética.

Segundo Tian (2003), as normas de eficiência energética e os sistemas de rotulagem ambiental já comprovaram ser efetivos na melhora da eficiência energética de produtos e por promover progressos nas tecnologias de economia de energia. Tanto os órgãos da administração pública, quanto os fabricantes de automóveis, vêm tomando importantes medidas para aperfeiçoar a eficiência energética dos veículos, sendo cada vez mais comum que os consumidores de automóveis incluam considerações importantes sobre o consumo de combustível nas suas decisões de compra (TURRENTINE; KURANI, 2007).

Assim, um importante desdobramento foi o lançamento do Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular (PBEV) foi em outubro de 2008, coordenado pelo Inmetro em parceria com o Conpet, administrado pela Petrobras, com foco específico na avaliação da eficiência energética e ambiental do setor de transportes. Participam da implementação e operação do PBEV a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP); o IBAMA; a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (Cetesb) e o Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Miguez de Mello (Cenpes), da Petrobras, com o apoio governamental do MME e do MMA. São partes interessadas na operação do programa a Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (Anfavea) e a Associação Brasileira das Empresas Importadoras e Fabricantes de Veículos Automotivos (Abeifa), entidades que representam os fabricantes e importadores de veículos automotores, respectivamente, no país (SIMÃO, 2011).

Para Maia e Carvalho (2015), o Programa tem suma importância para a sociedade, cumprindo a função de tornar pública e transparente para os consumidores as informações de eficiência energética dos veículos, possibilitando ao público avaliar este parâmetro no momento da escolha de um novo veículo, buscando orientar e influenciar na decisão de compra do consumidor, que dessa forma pode levar em consideração o consumo de combustível, além do preço e outros atributos.

O programa tem como principal ferramenta de comunicação com o público, a Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE), apresentada na Figura 2, que deve ser aposta no vidro dianteiro ou lateral dos veículos em exibição nos pontos de venda e traz, em cada modelo de veículo disponível para venda, as informações sobre consumo energético e emissões de CO₂ que influenciarão na tomada de decisão dos consumidores (MAIA; CARVALHO, 2015).

Apesar dos incentivos existentes, a adesão dos fabricantes e importadores de veículos ao PBEV é voluntária, mas o uso da ENCE é obrigatório para os modelos participantes do programa. Em seus doze anos de vigência, o programa já promoveu uma melhoria no consumo médio dos veículos populares subcompactos a venda no Brasil, da ordem de 17%, demonstrando ser uma ferramenta eficaz para promover estímulos ao setor produtivo na busca pela maior sustentabilidade dos seus produtos.

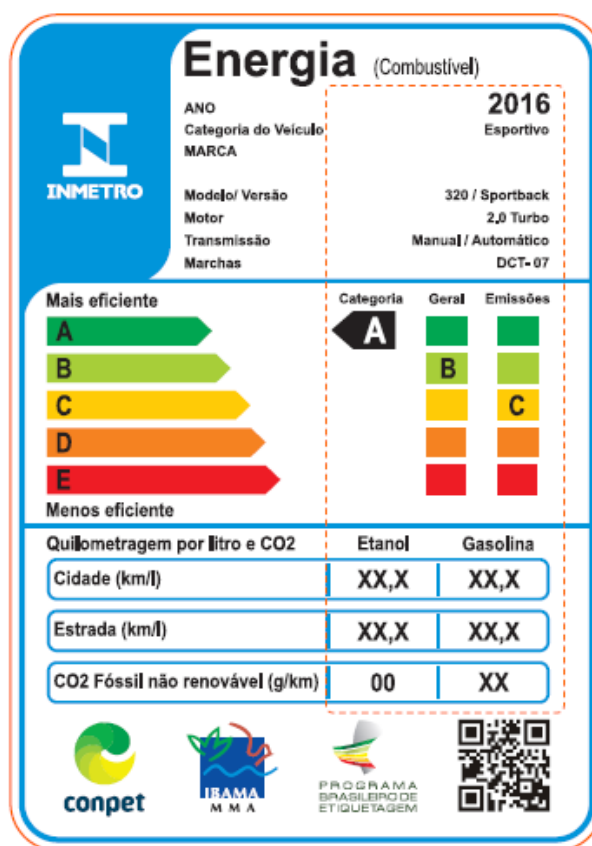


Figura 2: Modelo da Etiqueta, utilizada pelos veículos participantes do PBEV em 2017.
Fonte: Inmetro (2017)

Para tanto, segundo Bales (2015), as informações presentes na etiqueta aplicada nos veículos novos trazem dados sobre a eficiência energética, comparando um automóvel com outros da mesma categoria, a sua autonomia conforme o tipo de combustível e o modo de uso, em cidade e estrada. A Etiqueta ENCE traz ainda as classificações dos veículos com relação ao consumo energético na sua categoria e no geral de todos

os participantes, bem como sua classificação com relação aos poluentes controlados. No que tange às emissões, mostra o nível de emissão dos poluentes controlados (NMHC, NO_x e CO) segundo determinações do IBAMA.

Porém, na etiqueta, cuja proposta é apresentar ao consumidor informações que apoiarão a sua decisão de escolha, existem apenas informações que permitem a comparação entre diferentes alternativas de veículos apenas no binômio consumo energético x emissões, ou seja, dados referentes ao aspecto ambiental do produto. A partir da evidência que o PBEV pretende atingir um público que vai além dos adquirentes de veículos de passeio, incluindo também em seu escopo veículos comerciais leves, estas informações se mostram insuficientes para uma base comparativa razoável, pois não há referências ao benefício econômico esperado a partir do uso do veículo como instrumento de trabalho, no que tange ao seu propósito de transporte de cargas.

O PBEV introduziu metodologia inédita que considera a quantidade de energia presente nos diversos tipos de combustíveis adotados no país (gasolina, etanol, Diesel e elétrico) e adota procedimentos de ensaios similares aos adotados para a determinação da emissão de poluentes atmosféricos dos veículos (BALES *et al.*, 2015).

Segundo o Inmetro (2017), os ensaios aos quais os veículos que participam do programa são submetidos contemplam: ensaio de desaceleração em pista de rolamento, conforme norma técnica NBR 10312 (ABNT, 2014b), que tem o objetivo de medir os coeficientes da força resistiva do veículo, que refletem as resistências experimentadas pelo veículo durante seu deslocamento (como a resistência ao rolamento e o arrasto aerodinâmico), ou seja, a força mínima necessária para se mover o veículo, de acordo com a sua velocidade. Esta força é simulada, posteriormente, em dinamômetro para ensaios de consumo de combustível. Ensaio de consumo de combustível, conforme norma técnica NBR 7024 (ABNT, 2017), que estabelece o método para a medição do consumo de combustível de veículos rodoviários automotores leves com motores de combustão interna, por meio de ciclos de condução desenvolvidos em dinamômetro de chassi, que simulam o uso do veículo no trânsito urbano, metodologia análoga à utilizada no Código de Regulamentos Federais dos EUA. A carga no dinamômetro é definida pela sua classe de inércia respectiva à massa em ordem de marcha do veículo. A calibração do dinamômetro deve estar de acordo com os coeficientes de força resistiva obtidos em pista, conforme norma técnica NBR 10312 (INMETRO, 2017).

Os combustíveis utilizados nos ensaios são a gasolina E22, composta por 88% de gasolina adicionada de 22% etanol anidro, e o etanol hidratado de referência (EHR) a 93,5% de peso mínimo. Veículos com motores de alimentação flexível são ensaiados nos dois combustíveis E22 e EHR isoladamente, sendo seus resultados combinados na forma de energia por unidade de quilômetro. O consumo de combustível

combinado (L/100km ou MJ/km) é obtido com a média ponderada dos resultados obtidos nos ensaios, sendo 55% no ciclo urbano e 45% no ciclo estrada (ABNT, 2017).

A partir do PBEV, estimulou-se ganhos de inovação tecnológica por parte da indústria automobilística, que desenvolveu veículos com injeção direta ou alimentados eletricamente e híbridos, que misturam eletricidade com outro tipo de combustível, utilizando baterias de chumbo ou lítio, ou célula combustível de hidrogênio (RIBEIRO; REAL, 2006; RIBEIRO; ABREU, 2008; SILVA, 2011).

O PBEV, apesar de ser um programa de caráter voluntário, ganhou força a partir da publicação do Programa Rota 2030 - Mobilidade e Logística, com o objetivo de apoiar o desenvolvimento tecnológico, a competitividade, a inovação, a segurança veicular, a proteção ao meio ambiente, a eficiência energética e a qualidade de automóveis, de caminhões, de ônibus, de chassis com motor e de autopeças.

Borsatto e Amorim (2019) descrevem que o Programa Rota 2030 foi concebido com as diretrizes de estimular o incremento da eficiência energética, do desempenho estrutural e da disponibilidade de tecnologias inovadoras à autonomia dos veículos comercializados no país; aumento dos investimentos em pesquisa, estímulo à produção e desenvolvimento de novas tecnologias e inovações, de acordo com as tendências tecnológicas globais; incremento da produtividade das indústrias para a mobilidade e logística; promoção do uso de biocombustíveis e de formas alternativas de propulsão e valorização da matriz energética brasileira; garantia da capacitação técnica e da qualificação profissional no setor de mobilidade e logística; e garantia da expansão ou manutenção do emprego no setor de mobilidade e logística (BRASIL, 2018b).

Com o retorno de um projeto norteador para a indústria automobilística e para os seus desenvolvimentos tecnológicos, o Brasil retoma novamente ao cenário de notoriedade global neste ramo, visto que, apesar de ser um novo programa e mais restrito a condições impostas pela Organização Mundial do Comércio, o projeto busca desenvolver a cadeia nacional brasileira, visando sua projeção no mercado internacional. Quanto aos incentivos fiscais, o programa Rota 2030 contempla uma série de benefícios: o poder executivo pode reduzir até aos dois pontos percentuais (2%) o Imposto sobre Produtos Industrializados para os veículos que atendem eficiência energética; reduzir um ponto percentual para veículos de tecnologia assistiva à direção, e os veículos híbridos equipados com motor que utilize, alternativa ou simultaneamente, gasolina e álcool devem ter uma redução de, no mínimo, três pontos percentuais (3%) do IPI (BORSATTO; AMORIM, 2019).

Na Europa, a Diretiva de etiquetagem de automóveis (CE, 1999) exige que os países membros da União Europeia introduzam as disposições legislativas, regulamentares e administrativas necessárias e desde

a sua adoção em 1999, foi uma recomendação e uma alteração à diretiva de rotulagem de automóveis. Em primeiro lugar, a Diretiva 2003/73/CE (CE, 2003a) exige que, além de, ou em vez de, exibir informações sobre o consumo de combustível e as emissões de CO₂ em uma etiqueta, as informações podem ser exibidas em uma tela eletrônica. Em segundo lugar, a Recomendação da Comissão 2003/217/CE (CE, 2003b) exige que os Estados-Membros garantam que o material promocional transmitido eletronicamente ou armazenado em dispositivo de consulta eletrônica, magnética ou mídia óptica deve conter informações sobre o consumo de combustível de um carro e as emissões de CO₂. Em 2015, a Comissão Europeia lançou uma atualização abrangente da diretiva de rotulagem de automóveis.

O principal objetivo da diretiva de rotulagem de automóveis da União Europeia é remover a assimetria de informação entre fabricantes de automóveis e consumidores relatando informações do consumo de combustível e emissões de CO₂ veicular para promover escolhas bem informadas do consumidor. Rotulagem veicular pode, portanto, abordar apenas um elemento que afeta a quantidade total de CO₂ emitido por automóveis de passageiros, mas pode não ser adequado para tratar de complementar, fatores mais importantes, como a forma de condução e o padrão de uso do carro (HAQ; WEISS, 2016).

Assim, a etiquetagem veicular tem o mérito de ser uma ferramenta de informação que deve apresentar dados precisos, verificáveis, e homogêneos, bem como métricas refletindo a distância específica das emissões de CO₂ entre as alternativas de carros; traduzir inequivocamente os dados em rótulos e garantir que o rótulo seja reconhecido pelos consumidores, de modo a motivar uma mudança no comportamento de compra.

2.7 Gás Natural Veicular

Segundo D'Agosto (2004), os motores de combustão interna a gás foram inicialmente utilizados na Itália, na década de 1930. No entanto, em função do desenvolvimento e da alta competitividade por parte do mercado de gasolina e diesel, o mercado de gás natural não se fortaleceu nesta época, permanecendo inexplorado por um longo período.

A partir da década de 1970, ocorreram sucessivas crises do petróleo, com elevados aumentos em seu preço internacional, desestabilizando as economias ao redor do mundo. Isso contribuiu para estimular reflexões sobre a questão do uso exclusivo do óleo diesel e da gasolina no setor de transportes. O gás natural passou a ser visto como uma alternativa viável de combustível em setores como o de transporte rodoviário (HILL, 2010).

O consumo mundial de gás natural em transportes aumentou nas últimas décadas, principalmente a partir do início da década de 1990 (EPE, 2017).

Em função das crescentes buscas por novas propostas de suprimento de energia, o gás natural vem assumindo um papel cada vez mais expressivo no que diz respeito à oferta de energia no mundo e também no Brasil. Uma das razões para o fortalecimento do uso do gás em transportes é, muitas vezes, possuir relação custo-benefício mais competitiva (diante da gasolina e do etanol), além de ser menos prejudicial ao meio-ambiente do que os demais combustíveis derivados do petróleo (em termos de emissões atmosféricas locais) (HILL, 2010).

As emissões de CO₂ dos veículos movidos a gás natural são menores que as dos equivalentes a gasolina e diesel, uma vez que o metano (principal componente do gás natural) tem menor teor carbônico por unidade de energia produzida (BALES *et al.*, 2015).

No entanto, dados da EPE (2020) mostram que apesar das suas vantagens competitivas, o uso do gás natural no transporte rodoviário brasileiro veio perdendo sua importância, mantendo uma baixa fatia de participação na matriz energética para transportes, nos 10 anos recentes, conforme demonstrado na Tabela 8.

Tabela 8: Participação percentual das fontes energéticas no setor de transporte rodoviário, no Brasil.

| FONTES | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | % |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------------|
| GÁS NATURAL | 2,8 | 2,6 | 2,4 | 2,1 | 2,0 | 2,0 | 2,1 | 2,2 | 2,6 | 2,5 | NATURAL GAS |
| ÓLEO DIESEL | 48,7 | 48,5 | 48,0 | 48,3 | 46,9 | 45,4 | 44,9 | 44,1 | 44,1 | 43,4 | DIESEL OIL |
| BIODIESEL | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,6 | 3,1 | 3,2 | 3,5 | 4,4 | 4,7 | BIODIESEL |
| GASOLINA AUTOMOTIVA | 27,4 | 30,7 | 33,7 | 31,7 | 32,2 | 29,8 | 31,7 | 32,2 | 28,3 | 27,2 | GASOLINE |
| ÁLCOOL ETÍLICO ANIDRO | 5,9 | 6,6 | 5,7 | 6,7 | 7,4 | 7,5 | 7,8 | 8,4 | 7,2 | 7,1 | ANHYDROUS ALCOHOL |
| ÁLCOOL ETÍLICO HIDRATADO | 12,9 | 9,2 | 7,9 | 8,7 | 8,9 | 12,3 | 10,4 | 9,6 | 13,5 | 15,0 | HYDRATED ALCOHOL |
| TOTAL | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | TOTAL |

Fonte: EPE (2020)

Contudo, mesmo sendo uma alternativa de combustível com relativo baixo custo e reduzidos índices de emissões, as montadoras de automóveis instaladas no Brasil, lamentavelmente, deixaram de oferecer o gás natural como opção de combustível em seus projetos originais, ficando esta opção de fora das propostas desta pesquisa, bem como do PBEV.

2.8 Biocombustíveis

A utilização de biocombustíveis voltados para o transporte no Brasil teve sua origem antes da Segunda Guerra Mundial, quando o álcool anidro era misturado à gasolina automotiva comum (1934 até 1975). Após a primeira crise dos preços do petróleo, em 1973, o governo federal instituiu o programa denominado Proálcool, baseado na ampliação da oferta de álcool anidro para aumentar o seu percentual como aditivo à gasolina, tecnicamente possível, sem requerer modificações substanciais nos motores dos veículos. Após o segundo choque do petróleo, em 1979, uma nova fase do Proálcool entrou em vigor com metas mais ambiciosas, visando a produção de etanol etílico hidratado para ser usado como substituto da gasolina, o que demandou o desenvolvimento de inovações tecnológicas tanto nos motores a combustão, como nas técnicas de plantio e beneficiamento da cana-de-açúcar (LEITE, 2007).

A matéria-prima do etanol etílico hidratado é a cana-de-açúcar, combustível dos veículos automotores, e a utilização energética dos produtos da cana e da silvicultura têm, em comum, o benefício da sua comparação favorável com os combustíveis fósseis em termos de emissões de dióxido de carbono e demais poluentes atmosféricos. A cultura da cana-de-açúcar ocupa posição de destaque, entre os aproveitamentos de biomassa, no que se refere à relação energia/meio ambiente (LEITE, 2007).

A redução das culturas em área de relevo impróprio para mecanização, segundo Leite (2007), contribuiu para ganhos de eficiência no plantio e no aproveitamento da biomassa nos primeiros anos da década de 2000. Nas condições vigentes nas lavouras do estado de São Paulo, já em 2002, indicam que a relação entre o consumo e a geração de energia na produção de cana e etanol é nitidamente positiva, alcançando uma relação de 8,3 entre a energia produzida e a consumida no processo. Este resultado é bem superior aos indicados para o álcool produzido, por exemplo, a partir do amido de milho, nos Estados Unidos, e para o da beterraba, na Europa, com relações da ordem de 1,6. Existem ainda perspectivas de melhoria desse balanço, com destaque para ganhos de eficiência no aproveitamento da biomassa como combustível de segunda geração, para produzir eletricidade com o possível aproveitamento da palha da cana.

Ometto (2005) descreve que o etanol é produto da destilação de líquidos fermentados, como os vinhos. O etanol etílico ou simplesmente etanol é uma substância orgânica ternária constituída por carbono (C), hidrogênio (H) e oxigênio (O), cuja fórmula molecular é C_2H_6O .

Blottnitz e Curran (2006) asseveram que o Etanol, derivado da biomassa, é geralmente defendido como um significativo fator de contribuição de possíveis soluções para as nossas necessidades de combustível para um transporte sustentável. Kim e Dale (2004) estimam que o potencial de produção de

etanol é equivalente a 32% do consumo total mundial de gasolina, quando utilizado na proporção de 85% de etanol na gasolina, para uso em veículos de passeio.

O biodiesel, segundo Leite (2007) é o produto de um processo químico de transformação de óleos vegetais, com o objetivo de obter um produto com propriedades físico-químicas próximas às do óleo Diesel proveniente do petróleo. A vantagem do biodiesel é emitir menos gases poluentes quando utilizado como combustível, podendo ser utilizado em mistura com o Diesel mineral, ou puro.

A primeira rota tecnológica objeto de pesquisa e patente para a produção pioneira do biodiesel foi desenvolvida na década de 1970 no Brasil, uma época em que todo o setor energético estava, porém, com sua atenção voltada para o Proálcool. Somente no final do século XX que a produção do biodiesel como combustível líquido passou a motivar novos interesses e pesquisas tecnológicas na Europa e nos Estados Unidos, onde a rota tecnológica utiliza metanol em reação química com óleo vegetal (LEITE, 2007).

A segunda tecnologia, baseada na hidrogenação foi desenvolvida pela Petrobras, e patenteada como H-BIO, em 2006. O processo se baseia na introdução do óleo vegetal de qualquer procedência refinado até um determinado ponto do processo de refino do petróleo, com a adição de hidrogênio. Tal processo se mostrou mais eficaz e não geraram resíduos requerendo, contudo, maior volume de hidrogênio (FERREIRA, 2008) e apesar das crescentes pesquisas, as tecnologias de biocombustíveis de segunda geração ainda não estão disponíveis em larga escala (WBCSD, 2007).

Para Leite (2007), o biodiesel seja talvez o caso exemplar da complexidade inerente à interdisciplinaridade, uma vez que seu projeto brasileiro tenta compatibilizar objetivos ambientais, sociais e econômicos. Sob o ponto de vista ambiental, sua vantagem sobre o Diesel de petróleo é indiscutível, ao passo que o viés econômico envolve como aspectos a base agrícola e a identificação das melhores espécies, climas e regiões, a economia do processo industrial e o transporte de bases de produção dispersas até as refinarias onde será misturado com o óleo mineral. No Brasil, a produção de biodiesel ainda se reveste de um aspecto social notável, pelo seu potencial de aproveitamento de áreas agrícolas impróprias para grandes produções mecanizadas, beneficiando a agricultura familiar no cultivo de certas oleaginosas. No entanto, existem justificativas de ordem econômica para a produção do óleo em largas culturas intensivas e mecanizadas como a soja, pela sua maior disponibilidade de excedentes tanto na produção quanto no processamento.

A União Europeia tem direcionado seus esforços para o uso de biocombustíveis, no sentido de reduzir as emissões e seu vínculo com o uso de combustíveis fósseis (Diretiva 2009/28/EC, 2009).

No entanto, o potencial de substituição dos combustíveis fósseis, atualmente, está limitado ao uso de, principalmente, Biodiesel e Etanol no Brasil e Biodiesel na Europa (KAVLOV, 2004). A sua ampla

produção ainda enfrenta críticas, sobretudo, quanto ao mau uso de terras agrícolas produtivamente férteis para a produção de combustíveis renováveis, porém com baixos índices de eficiência.

Após a entrada em vigor do Protocolo de Kyoto, em fevereiro de 2005, houve um aumento na demanda internacional por fontes renováveis de energia, estimulando a produção de biocombustíveis, dentre eles o etanol e o biodiesel. O Protocolo de Kyoto definiu um acordo que estabelece aos países metas de redução de emissão de gases de efeito estufa e mecanismos adicionais de implementação para que essas metas sejam atingidas (MOREIRA; GIOMETTI, 2008).

Para Davis *et al.* (2008), os biocombustíveis, apresentados como uma alternativa ecologicamente benigna para os combustíveis fósseis, trazem uma considerável incerteza na literatura científica, relacionada aos seus benefícios ecológicos. Os autores realizaram um estudo aplicando a análise de ciclo de vida (ACV), como ferramenta computacional para avaliar a eficiência e o impacto de gases de efeito estufa de sistemas energéticos alimentados por combustíveis não fósseis.

Já Blottnitz e Curran (2006) apontam que a substituição de derivados de petróleo por biocombustíveis pode atender às necessidades de redução do uso de combustíveis não renováveis e, concomitantemente, os impactos nas mudanças climáticas, especialmente dióxido de carbono e seu efeito estufa resultante. Mas isto não contempla todas as vertentes possíveis desta mudança.

Primeiramente, é importante compreender que o processo de conversão da biomassa em biocombustível requer uma entrada de energia adicional, na maioria das vezes provida por alguma forma de combustível fóssil. O balanço energético do ciclo de vida de um biocombustível em comparação com combustíveis fósseis convencionais deveria ser positivo, mas dependendo da forma de processamento, a demanda cumulativa de energia fóssil pode, algumas vezes, ser marginalmente inferior, ou mesmo superior do que a de derivados de petróleo. Além disso, o etanol quando misturado na gasolina pode resultar em redução da qualidade do ar e ser associado com riscos substantivos aos recursos hídricos e à biodiversidade (BLOTTNITZ; CURRAN, 2006).

Sistemas energéticos baseados em produção agrícola também têm outras desvantagens, uma vez que são intensivos em uso de terra, além do constante risco de que poluentes oriundos de fertilizantes e pesticidas atinjam cursos de água potável, após sua aplicação em culturas agrícolas para estimular o desenvolvimento da safra.

Um grande número de pesquisadores já reconheceu esta condição e tiveram a preocupação de analisar o sistema produtivo do bioetanol, em um esforço para descrever a sua sustentabilidade ambiental e

determinar onde os biocombustíveis podem contribuir para alcançarmos o objetivo do transporte sustentável (BLOTTNITZ; CURRAN, 2006).

Finalizando esta seção, vale destacar a importância do RenovaBio, uma Política Nacional de Biocombustíveis desenvolvida para incentivar a linha energética nacional e “descarbonizar” os combustíveis brasileiros. Este busca preservar e contribuir para as questões ecológicas do mundo, trazendo para o mercado a maior utilização de biocombustíveis (etanol, biogás, biodiesel e outros). Andando conjuntamente ao Rota 2030, esta política pode ser altamente auxiliadora para o programa, visto que o país visa a longo prazo diminuir o uso de combustíveis agressores ao meio ambiente.

Um dado para este, é o de que até 2030, a geração de biocombustíveis pode diminuir dezoito bilhões de reais na importação de gasolina (BORSATTO; AMORIM, 2019). Com isso, além de cooperar com o meio ambiente, aumentar a geração de produção nacional, gerará uma economia aos cofres públicos brasileiros.

2.9 O Hidrogênio como fonte energética.

O hidrogênio é o elemento mais simples e o gás mais abundante na atmosfera, mas como um gás, ele não ocorre em estado natural na Terra, estando sempre misturado com outros elementos. Combinado com o oxigênio transforma-se em água, associado ao carbono apresenta-se em diferentes compostos, como petróleo, metano e carvão, importantes combustíveis energéticos para a indústria.

O hidrogênio é um portador, não uma fonte de energia. Uma vez produzido, ele armazena energia até que seja entregue em uma forma utilizável, como em uma célula de combustível. Mas, outra forma de energia é necessária separá-lo de outros compostos. Segundo estudos do IPHE (2017), a sua produção demanda um processo intensivo em energia, que pode ser obtida por meio de diferentes fontes. Pode ser produzido com o uso de eletricidade para separá-lo do oxigênio na água, em um processo conhecido como eletrólise. Esta eletricidade precisa ser gerada a partir de outras fontes como: combustíveis fósseis, óleo, carvão, gás natural, nuclear, ou outras fontes naturais renováveis; eólica, solar, hidroeleticidade, biomassa e geotérmica. Hoje, a maior parte da produção de hidrogênio no Brasil vem de combustíveis fósseis e os métodos predominantes são os que utilizam de vapor para separá-lo do carbono, encontrado no petróleo e no gás natural, por exemplo. Identifica-se grande potencial para a migração destas fontes primárias para energias renováveis.

Quando combinado com as novas tecnologias de captura e armazenamento de carbono, projetadas para reduzir as emissões de dióxido de carbono, o hidrogênio emerge como uma promessa de combustível

abundante, que poderá contribuir para possível equilíbrio de poluição no sistema climático. Pode ser utilizado para armazenar energia considerada limpa, que é produzida primariamente por fontes energéticas renováveis. Ao ser armazenada, esta energia pode também ser transportada para onde está a demanda. Enquanto vetor energético, o H₂ guarda o potencial de transformar radicalmente os meios como projetamos e usamos a energia. A aplicação em veículos elétricos híbridos e movidos a células combustíveis, eventualmente mudando a matriz energética global no setor de transporte, e sua infraestrutura. Como vetor energético e dispositivo altamente energético de armazenagem, o gás também pode ser transportado e usado em locais isolados, como back-up para áreas hospitalares, situações de emergência ou em aplicações diversas de tecnologias da informação (IPHE, 2017).

Miranda (2017) apresenta estudos sobre um ônibus equipado com um sistema elétrico de tração que possui três fontes de energia diferentes foi desenvolvido no Laboratório de Hidrogênio da Universidade Federal do Rio de Janeiro, cujo sistema de tração híbrido com pilha a combustível e banco de baterias. Este sistema se apresenta como alternativa mais eficiente e ecológica em relação aos sistemas convencionais de tração de ônibus usados atualmente. A primeira fonte é a energia proveniente da rede elétrica, que promove o recarregamento do sistema embarcado de armazenamento de energia elétrica do veículo através de conexão com a rede antes de sair da garagem. A segunda fonte é obtida do sistema de recuperação de energia cinética do ônibus, a energia do movimento é reaproveitada no momento da desaceleração do veículo e é armazenada em forma de energia elétrica. E sua terceira fonte é proveniente do hidrogênio armazenado em cilindros pressurizados a bordo. Pilhas a combustível são responsáveis por transformar a energia química do hidrogênio contido nos cilindros, por meio de uma eficiente reação eletroquímica com o oxigênio do ar, em energia elétrica, que é armazenada e utilizada no ônibus.

Para Miranda (2017), em diversos países, alguns dos maiores setores industriais, como os de metalurgia, refino de petróleo e produção de soda, produzem hidrogênio em excesso, que poderia ser aproveitado em aplicações para transporte. Atualmente o transporte do gás acontece por meio de dutos e tubulações ou rodoviário, através de cilindros, caminhões tanques, e tanques criogênicos, com uma pequena parte indo por trens ou barças. Por sua natureza intensiva em energia e com custos consideráveis associados ao transporte, este método de distribuição se limita usualmente a um raio de aproximadamente 200 km da origem. Para distâncias maiores, costuma ser transportado em meio líquido em tanques criogênicos, sendo então vaporizado para uso no local da demanda.

Estudos do IPHE (2017) demonstram também que este é um processo caro e intensivo em energia para as conversões. Dutos estão atualmente limitados a pequenas áreas, onde grandes refinarias e petroquímicas já estão concentradas. Uma grande rede de dutos dedicada para transporte de hidrogênio em larga escala

ainda não existe no mundo. O estabelecimento deste tipo de infraestrutura enfrenta desafios associados à real demanda para o uso de hidrogênio, além dos custos de investimentos: econômicos, sociais e ambientais.

A situação atual, no balanço entre benefícios e desafios, aponta para a necessidade crítica de pesquisa, desenvolvimento e inovações na esfera da ciência de materiais, investigando novas formas de gerar e transportar o hidrogênio por longas distâncias. Como alternativa, surge a opção descentralizada, de produção do hidrogênio em locais próximos ao uso final. Esta opção, como no caso atual da energia fotovoltaica, exige novas regulações e adaptações sociais e técnicas de questões relacionadas com a produção e o armazenamento energético do hidrogênio. Como no caso da energia solar, é tendência que a produção, armazenamento e distribuição do hidrogênio prospere tanto em modelos centralizados como em abordagens descentralizadas (IPHE, 2017).

Hoje, o hidrogênio para aplicações de transporte é compactado e armazenado em tanques metálicos e de alta pressão. O gás também pode ser armazenado esfriando-o a sua forma líquida e contido em tanques super isolados. Um desafio crítico para sua aplicação em transportes é equilibrar a necessidade de uma quantidade armazenada, com as restrições veiculares de peso, volume, eficiência, segurança e o custo do seu armazenamento a bordo. Um segundo conjunto de desafios para aplicações em transporte relaciona-se com a durabilidade ao longo da vida útil dos sistemas de armazenamento a bordo de um veículo. Para superar este desafio de armazenamento, uma alternativa pode ser uma reforma de combustíveis de maior densidade, como gás natural, gasolina e metanol. Um benefício adicional desta abordagem é que não requer o desenvolvimento de novas infraestruturas para sua distribuição. No entanto, a reforma a bordo de combustíveis de maior densidade resulta na emissão de dióxido de carbono, embora em quantidades menores do que o uso tradicional desses combustíveis (MIRANDA, 2017).

A eficiência energética é um desafio para todas as possibilidades de armazenamento de Hidrogênio. A energia necessária para obter Hidrogênio dentro e fora do armazenamento é um problema para sistemas reversíveis de armazenamento de materiais de estado sólido. Além disso, a energia associada à compressão e à liquefação deve ser tida em conta quando se consideram tecnologias de armazenamento de hidrogênio comprimido e líquido. Os tempos de reabastecimento são atualmente muito longos.

Ainda são necessários regulamentos e normas técnicas internacionais para desenvolvimento de procedimentos operacionais e de segurança padronizados, que tornem a tecnologia do hidrogênio mais acessível ao uso no setor de transporte. Necessidades por melhorar as tecnologias de armazenamento estão relacionados ao aumento da eficiência, tamanho, peso, capacidade e, em última análise, seu custo. A durabilidade continua a ser um problema, assim como o desenvolvimento de códigos internacionais unificados e padrões de segurança para facilitar a implantação segura de tecnologias comerciais.

O uso da energia do hidrogênio no Brasil seria estratégico, no plano internacional, em futuro breve, devido às fontes primárias de energia utilizadas, ganhando rótulos verde/azul, ou “fontes limpas”, mais valorizadas em um provável contexto de taxação do carbono utilizado na geração energética e no comércio internacional. O hidrogênio tem potencial para surgir como vetor energético e de armazenamento para equalizar períodos de sobra na geração, com os períodos de seca, trazendo complementaridade entre a hidroeletricidade e a geração eólica no Brasil.

A questão crítica para o futuro da matriz energética no Brasil é buscar novas opções de armazenamento de energia. O armazenamento natural, de grande escala, das usinas hidrelétricas com suas represas gigantes perde espaço nos novos projetos, pelas suas condições ambientais desfavoráveis para o presente e futuro breve.

No Brasil, há um potencial para modernização de usinas hidrelétricas e parques eólicos já existentes, com unidades complementares de produção e armazenamento de hidrogênio, com a energia hidrelétrica ou eólica servindo como fonte de entrada para o processo da eletrólise do hidrogênio. O Gás Natural também seria uma alternativa possível para o Brasil, mas muito caro e sem apelo ambiental. Não existem vantagens logísticas e econômicas para esta conversão.

No que se refere à mobilidade, no Brasil, o veículo movido a hidrogênio não demonstra ter um cenário positivo no curto prazo. Diante das dificuldades e dos altos custos envolvidos, acredita-se que não será desenvolvida uma infraestrutura de provisão do hidrogênio para o setor de transporte enquanto não houver demanda ampla, para ganhos de escala e diminuição de custos. Por outro lado, não haverá manufatura local ou importação de carros movidos a células combustíveis de hidrogênio ou híbridos, enquanto não houver uma rede nacional de postos. Nos EUA, Japão, Alemanha e demais países da Europa esta rede de postos tem sido implantada por consórcios de fabricantes, montadoras e apoio de agências governamentais de inovação.

O uso generalizado de etanol e biocombustíveis tende a neutralizar as vantagens ambientais e econômicas que o H₂ apresenta em muitos outros países. Mas, assim como ocorre com os carros elétricos, com baterias, muitas inovações neste setor podem se sobressair aos planejamentos e projeções energéticas governamentais, ainda que esta transição seja lenta em nosso país.

No médio prazo, no Brasil, duas frentes de uso da energia com maior potencial para a disseminação da tecnologia das células combustíveis e do hidrogênio seriam no nicho relevante do transporte público, com células combustíveis apresentando maior autonomia, ou em aplicações industriais, comerciais e dispositivos compactos de provisão de energia e armazenamento.

2.10 Veículos Elétricos

A origem dos Veículos Elétricos (EV) remonta a meados do século XIX. De acordo com Baran e Legey (2010), ela está intimamente relacionada à história das baterias. A primeira bateria de chumbo-ácido foi apresentada ao mundo em 1859, pelo pesquisador belga Gaston Planté. Em pouco tempo, esse equipamento passou a ser utilizado por veículos elétricos desenvolvidos na França e no Reino Unido, a partir da década de 1880, ou seja, alguns anos antes de Karl Benz construir o primeiro motor movido à combustão interna.

Para Strangueto e Silva (2015), além das baterias, duas tecnologias desenvolvidas entre 1890 e 1900 contribuíram para melhorar o desempenho dos carros elétricos: a frenagem regenerativa, um equipamento capaz de transformar a energia cinética do automóvel em energia elétrica durante o uso dos freios, e o sistema híbrido a gasolina e eletricidade.

No início do século XX, três tecnologias de propulsão concorriam no mercado de automóveis: elétrica, vapor e gasolina. Thomas Edison, interessado no potencial dos veículos elétricos, desenvolveu a bateria níquel-ferro, com capacidade de armazenamento 40% maior que a bateria de chumbo, porém ameaçada por um custo de produção consideravelmente mais elevado. A partir de 1912, nos EUA, a trajetória dos elétricos seguiu em forte queda. Entre os principais fatores apontados para esse declínio a partir de então, podem ser citados o sistema de produção fordista em série de automóveis, que barateou o custo dos carros a gasolina; a invenção da partida elétrica em 1912, que facilitou o manuseio dos carros a combustão interna; a demanda por veículos capazes de percorrer longas distâncias sem abastecimento e as descobertas de petróleo no Texas, que reduziram o preço da gasolina (BARAN; LEGEY, 2010).

Nos primeiros carros elétricos, só estavam disponíveis baterias de chumbo-ácido que, pelo seu peso, se constituíram no fator limitante do raio de ação (LEITE, 2007).

Para Strangueto e Silva (2015), somente após a década de 1960, quando a opinião pública começou a se preocupar com questões ambientais, os automóveis elétricos voltaram a atrair a atenção dos grandes fabricantes. Naquela época, o chumbo ainda era utilizado como aditivo para a gasolina, não havia filtros nem catalisadores para conter as emissões e o automóvel passou a ser considerado uma das principais fontes da poluição atmosférica nas grandes cidades.

A partir dos anos 1970, a questão ambiental passou a fazer parte do debate sobre a geração e o consumo de energia, mas, apesar desses anos terem sido uma época propícia para os veículos elétricos, já que esses combinavam emissão nula de poluentes com a possibilidade de utilizar fontes de energias renováveis, os protótipos desenvolvidos não chegaram às linhas de produção. Houve diversas iniciativas de

trazê-los de volta ao mercado no período, mas nem os automóveis elétricos puros nem os híbridos estavam aptos a competir com os automóveis a combustão, que passaram a contar com diversos dispositivos para a redução das emissões, além de se tornarem mais eficientes e dispor de combustíveis mais limpos (BARAN, 2012).

No final da década de 1980, os veículos elétricos mais uma vez passaram a ser vistos como a solução para a poluição dos grandes centros urbanos e como uma salvação para a era do petróleo, fazendo o conceito do desenvolvimento sustentável ganhar seu momento, forçando o desenvolvimento de novas fontes de energia, bem como novos meios de transporte (BARAN; LEGEY, 2010).

Na década de 1990, o Estado da Califórnia se torna pioneiro ao implantar suas primeiras normas regulatórias de emissão zero. Em 1992, ocorre a conferência Rio-92, que apresentou como resultados a Agenda 21, enfatizando a importância dos problemas causados pelo uso extensivo de combustível fóssil, bem como a necessidade de redução do consumo de energia nos países desenvolvidos e da busca de uma possível transição para fontes renováveis de energia. Neste documento, cada país se compromete a refletir, local e globalmente, sobre como as empresas, governos e os setores da sociedade podem cooperar para a solução de problemas socioambientais (STRANGUETO; SILVA, 2015).

Após a conferência das Nações Unidas de 1992, a União Europeia definiu uma política de transportes como estratégia para a mobilidade sustentável. Nesse contexto, a utilização dos veículos elétricos era vista como uma das condições mais importantes para a sustentabilidade proposta. O desenvolvimento dos projetos de veículos híbridos e/ou elétricos requereu renovado esforço no sentido de se construírem baterias com melhor relação capacidade/peso e maior duração. Projetos recentes se apoiaram nos conceitos novos de bateria desenvolvidos para servir a aparelhos de comunicação e de computação (LEITE, 2007).

Segundo Ellingsen (2016), como medida para reduzir a queima de combustíveis fósseis e, assim, mitigar as mudanças climáticas, muitos governos introduziram políticas favoráveis para promover a aceitação pelo mercado de veículos elétricos. Alternativas já bastante difundidas em países que se tornaram referência em desenvolvimento tecnológico dos transportes, como a Alemanha, Áustria, Estados Unidos e o Japão, norteiam tendências para um crescente uso de veículos de propulsão elétrica, principalmente nos centros urbanos.

Veículos híbridos, veículos híbridos com conexão à rede elétrica e veículos 100% elétricos, movidos a baterias ou células de carga, são uma tendência com maior destaque na atualidade. Ao contrário dos veículos convencionais que se locomovem por meio da queima de combustíveis fósseis, estes usam eletricidade e, normalmente, baterias de íons de lítio (Li-ion) para armazenamento de eletricidade.

As maiores vantagens dos veículos elétricos residem no fato que eles podem utilizar variados tipos de fontes energéticas que são usadas para gerar eletricidade, reduzindo assim a vinculação dos transportes em relação ao instável mercado internacional de petróleo. Além disso, podem trazer os benefícios de pesquisas por novas fontes renováveis para a geração de eletricidade e da ausência de emissões durante o uso final, o que ajuda a reduzir a poluição em áreas urbanas (LIU; HILDEBRANDT; GLASSER, 2012).

No entanto, as emissões indiretas devido à geração de eletricidade podem ser significativas, dependendo das fontes de energia. Apesar dos veículos elétricos serem considerados limpos, os impactos ambientais completos da adoção desta tecnologia de transportes estar sujeito diretamente do quão limpa é a fonte e a distribuição da energia elétrica.

Naturalmente, para a plena utilização do elevado potencial de redução de emissões dos veículos elétricos, o carregamento de energia deve ser fornecido a partir de fontes renováveis. Assim, veículos elétricos têm o potencial de reduzir as emissões de GEE, mas é necessária uma perspectiva de ciclo de vida para obter conhecimento da sua pegada de carbono total (ELLINGSEN, 2016).

Outra desvantagem está relacionada à bateria para que o carro elétrico seja mais eficiente, sendo ideal o uso de íon de lítio, mas além de ser caro, é um metal não renovável e existem limitadas reservas dele. Além disso, é preciso levar em conta que a reciclagem de baterias automotivas de chumbo ácido já é feita por procedimentos e processos já bem estabelecidos. Mas, para fazer a reciclagem do íon de lítio, o processo não é simples e seu desenvolvimento ainda está em estágios muito primários (FRANCISCHETTI, 2014).

Segundo Nicolay *et al.* (2000) os resultados da Análise do Ciclo de Vida de veículos elétricos depende fortemente da eficiência da cadeia de suprimento de energia. Para Übermasser, Stifter e Castro (2013), a natureza imprevisível das fontes energéticas renováveis (como a energia eólica ou fotovoltaica) pode levar a uma geração flutuante de energia elétrica, na realidade europeia.

Segundo dados da EPE (2019), o Brasil dispõe de uma matriz elétrica de origem predominantemente renovável, com destaque para a geração hidráulica responsável por 66,6% da energia elétrica produzida no país, sendo a principal fonte de geração de energia elétrica e que apresentou uma expansão de 4,1% na comparação com o ano anterior. Mas grandes hidrelétricas trazem consigo problemas consideráveis de impactos ambientais e sociais, além do risco de escassez em períodos de estiagem.

Segundo a EPE (2019), a geração elétrica a partir de fontes não renováveis representou 16,7% do total nacional, em 2018, contra 25,9% em 2015. Assim, as fontes renováveis representam 83,3% da oferta interna de eletricidade no Brasil, que é a resultante da somados montantes referentes à produção nacional mais as importações, que são essencialmente de origem renovável hidráulica.

No Brasil 7,6% da oferta de energia elétrica gerada tem origem eólica, e apenas 0,5% da eletricidade é gerada pelas fontes fotovoltaicas em operação. A produção de eletricidade a partir da fonte eólica alcançou 48.475 GWh em 2018, com a expansão de 14,4% da potência instalada para geração eólica no país (EPE, 2019). Fontes Eólicas são limpas, apesar de associadas a um alto custo para sua manutenção, sendo limitadas a poucas regiões e a determinadas épocas do ano (EPE, 2019).

A fonte solar de energia elétrica, apesar de limpa e inesgotável, apresenta limitações pela necessidade de extensas áreas para gerar relativamente pouca energia.

No entanto, no Brasil, estas fontes de energia podem ser plenamente viáveis devido às favoráveis condições de vento e de irradiação solar do clima tropical presentes no país.

Para garantir o abastecimento de uma frota de veículos elétricos movidos por baterias, é necessária uma infraestrutura de carregamento adequada.

Novas baterias desenvolvidas pelo setor se constituem em dois tipos principais: Níquel-hidrato de metal (NiMH), e Lítio (Li-ion), que asseguram maior capacidade e mais vida longa. Especificamente, para determinada capacidade de acumulação de energia elétrica, a bateria de níquel pesa metade da de chumbo-ácido e pode acumular de duas a quatro vezes mais energia. A bateria de lítio, por sua vez, pesa metade da de níquel e pode armazenar até 100% a mais de energia (SANNA, 2005).

Apesar do sucesso dos veículos convencionais em reduzir as emissões de poluentes, a questão do aumento do CO₂ na atmosfera impunha a necessidade de se reduzir a queima de combustíveis fósseis, algo difícil de ser obtido em motores de combustão interna.

Muitos estudos já avaliaram o impacto que o uso de veículos elétricos podem causar ao meio ambiente. Santos, Francischetti e Silva(2014) evidenciaram uma série de vantagens, como os fatos de serem silenciosos e por não emitirem poluentes e nem usar óleos ou graxas lubrificantes em geral são mais eficientes e menos danosos ao meio ambiente do que carros à combustão interna, por emitirem 0% de poluentes durante o seu uso (BORTOLOTTI *et al*, 2013).

Hill (2010) apresenta um estudo cujo objeto é o ciclo de vida de duas fontes de energia para uso em transportes: o gás natural comprimido utilizado em veículos com motores de combustão interna e a energia termelétrica, quando gerada a partir do gás, destinada a ser utilizada em veículos com propulsão elétrica. Seu objetivo foi estabelecer uma análise comparativa, considerando a eficiência energética e o consumo de energia, entre o ciclo de vida do gás natural, disponível no país, e o ciclo de vida da energia termelétrica produzida a partir de usinas a gás e utilizada em veículos elétricos a bateria.

Contudo, Lomborg (2017) apresenta uma visão crítica mais ampla, contemplando todo o ciclo de vida de um carro elétrico. Além da geração da energia elétrica, há de se pensar no gasto de energia demandado para produzir o veículo. Mais de um terço do CO₂ emitido pelo ciclo de vida de um automóvel elétrico vem da energia utilizada para produzir o carro em si, especialmente as suas baterias. A mineração do lítio, por exemplo, não é uma atividade verde. Quando um carro elétrico sai da linha de produção, segundo Lomborg (2017), ele já foi responsável pela emissão de mais de 25.000 libras de dióxido de carbono. A quantidade emitida para se produzir um carro convencional seria de apenas 16.000 libras.

Mas este não é o fim das emissões de CO₂. O veículo elétrico não é composto apenas de benefícios, há preocupação com a fonte de eletricidade que acionará seu motor. Apesar de ser verdade que os carros elétricos não rodam com gasolina, mas sim com eletricidade, que em muitos lugares, ainda é produzida a partir de outro combustível fóssil, como carvão. Assim, carros elétricos, em certos países, podem ser, na verdade, carros movidos a carvão e o uso da eletricidade, que dependendo da sua fonte de geração, pode contribuir para outros impactos, como aumento dos gases de efeito estufa, formação de resíduos radioativos, promover impacto ambiental em rios, ou desmatamento. Embora mais de 85% da eletricidade gerada no Brasil seja proveniente de fontes renováveis, espera-se que a participação de longo prazo da geração termelétrica a partir de combustíveis fósseis aumente. A preocupação com o aumento do consumo desses combustíveis é adequada e está sendo questionada (FRANCISCHETTI *et al.*, 2014).

Além disso, veículos alimentados por bateria são mais caros que os híbridos e têm seu uso limitado a curtos percursos, restringindo seu uso a áreas pequenas, como condomínios e centros de compras (BORTOLOTTI *et al.*, 2013).

A aplicação prática da bateria de lítio propicia um raio de ação do veículo exclusivamente na base elétrica de 60 a 90 km, enquanto a bateria de níquel asseguraria apenas a metade dessa autonomia. Dada a sua pequena dimensão, a bateria de lítio é agrupada em grandes bancos para atingir a capacidade requerida nos veículos híbridos elétricos. No entanto, existem dificuldades técnicas no projeto de desenvolvimento da maior dimensão da primeira. Quanto ao custo ainda elevado, somente a disseminação da tecnologia e a produção em massa poderão reduzi-lo (LEITE, 2007).

Outras desvantagens estão relacionadas às baterias usadas que requerem processos de logística reversa, reciclagem, e o problema dos íons de lítio, que são um mineral não renovável e a bateria construída com este material tem um processo de reciclagem custoso e complexo (SANTOS *et al.*, 2014). A reciclagem da bateria requer seu armazenamento em *bunkers* de concreto para um processo criogênico que resfria a bateria a -198 ° Celsius, tornando-a inerte ao processo de desmontagem. Como regra de segurança operacional,

cerca de 90% dos casos de reciclagem de baterias de lítio nos EUA são operados remotamente por robôs (FRANCISCHETTI *et al.*, 2014).

Veículos elétricos têm alcançado notável evolução em muitos países e notadamente agora entraram em um período de rápido desenvolvimento e propagação. No Brasil, a expansão do mercado de baterias para carros elétricos segue relativamente lenta em comparação com outros países, mas o setor elétrico certamente será capaz de atender à demanda adicional que está surgindo. Segundo Francischetti (2014), se 10% da frota de carros atual fossem compostas de carros elétricos, isto exigiria um aumento na geração de energia de cerca de 2%, então até a demanda por esses veículos se tornar significativa, o setor energético seria capaz de fornecer seus cuidados.

Desse modo, o tema do ciclo de vida completo de veículos elétricos contempla a manufatura, uso e o seu fim de vida é mais notório e vem despertando grande interesse dos governos e pesquisadores (PEHLKEN, YOUNG, CHEN, 2017).

É importante avaliar o ciclo de vida das fontes energéticas, pois esta técnica permite avaliar os aspectos ambientais e impactos potenciais associados a um processo, produto ou atividade econômica, analisando diversas etapas que vão desde a extração de matérias-primas da natureza (meio ambiente) que entram no sistema produtivo, berço do produto, até a disposição do produto final (como resíduos) no meio ambiente, ou túmulo do produto (CAMARGO, 2007).

Tendências mais recentes indicam que o próximo desafio para a pesquisa e desenvolvimento na indústria automotiva do futuro não estará mais focado em temas de eficiência energética e combustíveis. Em vez disso, novas e crescentes questões relativas ao uso de materiais complexos, escassos e ambientalmente problemáticos, que desafiarão a gestão do ciclo de vida de automóveis e seus materiais.

Metais críticos que, por exemplo, ganharam a atenção como importantes para o setor automotivo, devido ao seu crescente uso em dispositivos elétricos, como sensores e baterias. Cobalto, gálio, lítio e outros metais raros são agora componentes importantes dos automóveis e classificados como materiais estratégicos na Europa e Estados Unidos.

Portanto é importante considerar a gestão de materiais críticos no final da vida útil de um produto, com o propósito de recupera-los para uso futuro. Contudo, evidencia-se uma escassez de dados relacionados à quantidade de metais críticos utilizados em veículos, e às tecnologias de reciclagem que necessitariam acompanhar a rápida mudança no conteúdo dos materiais em veículos do futuro. A mudança fundamental que está ocorrendo na mobilidade elétrica é a mudança da mobilidade intensiva em energia, para a mobilidade intensiva em materiais (PEHLKEN, YOUNG, CHEN, 2017).

Um dos temas em voga nos trabalhos publicados mais recentemente não está mais focado nas fontes e no uso da eletricidade em veículos elétricos, já que no momento caminha-se para o uso cada vez mais corriqueiro de energia limpa. O principal tema a ser considerado agora está associado aos aspectos de extração, produção e, especialmente, o fim de vida de matérias primas raras necessárias para a mobilidade dos veículos elétricos.

A quantidade de componentes eletroeletrônicos em veículos automotores cresceu significativamente na última década. Fazem parte desta tendência mudanças adicionais necessárias para a propulsão elétrica dos veículos, sejam eles híbridos, *plug-in* ou com célula combustível.

Avaliar o uso de veículos elétricos e sua performance depende totalmente do desempenho de suas baterias e de uma melhor compreensão do processo de degradação das baterias (CASALS *et al.*, 2016). Contudo, outros autores observam que o uso de baterias só é viável e recomendável em condições nas quais as mesmas sejam carregadas a partir de energia limpa e renovável. Adicionalmente, Richa *et al.* (2016) realizou uma comparação dos dilemas ambientais entre os ciclos de vida de baterias de íon-lítio e de chumbo-ácido.

No estudo de Ellingsen e Strømman (2017) dois sistemas foram analisados em conjunto, considerando interesses de usos distintos para as baterias, enquanto fonte de energia para veículos elétricos, em seu uso primário, e como fonte de armazenamento de energia estacionária, como extensão de sua vida útil.

Quais são as implicações dessas mudanças em termos da demanda de recursos minerais e dos impactos ambientais associados? Esta é uma questão a ser investigada, assim como o uso intensivo de novos materiais, principalmente metais raros em automóveis deve ser examinado utilizando-se a perspectiva do ciclo de vida.

2.11 Análise de Ciclo de Vida

Para a UNEP (2009), a Análise de Ciclo de Vida é uma ferramenta para avaliação dos efeitos que um produto tem sobre o meio ambiente, desde a extração e processamento das matérias-primas constituintes, passando pela fabricação, embalagem e processos de venda, uso, reuso e manutenção do produto até a sua eventual reciclagem ou disposição como lixo ao final de sua vida útil.

As normas ISO 14040 e ISO 14044 (ABNT, 2009b) fornecem as diretrizes para a realização de uma ACV. As normas da *International Organization for Standardization* (ISO) estabeleceram um conjunto de

regras visando assegurar que os estudos de ACV fossem realizados num modo consistente e reproduzível em todo o mundo (MONTEIRO; COSTA, 2011).

A norma ISO 14040 estabelece que uma ACV deve contemplar 4 fases, sejam elas:

Fase 1 – Definição do Objetivo e Escopo

Esta fase do estudo deve declarar: a aplicação pretendida; as razões para execução do estudo; a quem se destina o estudo (quem será comunicado de seus resultados) e se existe a intenção de utilizar os resultados em afirmações comparativas a serem divulgadas publicamente.

Fase 2 – Análise do Inventário do Ciclo de Vida (ICV)

É a fase que contempla o levantamento, a compilação e a quantificação das entradas e saídas de um sistema em termos de energia, recursos naturais e emissões para água, terra e ar, considerando as categorias de impacto³ e as fronteiras definidas, com resultados ponderados pela unidade funcional. (MOURARD *et al.*, 2002).

Fase 3 – Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV)

A fase da AICV tem como objetivo estudar a significância dos impactos ambientais potenciais, utilizando os resultados do ICV (ABNT NBR ISO 14040:2009).

Os resultados do ICV podem ser expressos de duas formas, como danos decorrentes dos impactos (categorias *endpoint*) e como os causadores destes danos (categorias *midpoint*), efeitos estes que podem ser sobre o meio ambiente ou para a integridade física e/ou orgânica das pessoas (MOTTA, 2016; UNEP, 2009).

Fase 4 – Interpretação

O objetivo desta fase é analisar os resultados obtidos nas duas fases anteriores, tirar conclusões, explicar as limitações do estudo, identificar oportunidades de melhorias de acordo com o objetivo e fornecer recomendações para aperfeiçoamento do próprio estudo de ACV. (CHEHEBE, 2002; KIPERSTOCK, 2002)

A mesma norma estabelece que, em geral, é conveniente usar a informação desenvolvida em um estudo de ACV como parte de um processo de decisão muito mais abrangente, ou usá-la para compreender as soluções de compromissos amplas ou gerais (ABNT NBR ISO 14040:2009).

A partir desta norma, D'Agosto (2004) criou um procedimento voltado para a aplicação da ACV para fontes de energia empregadas em transportes. D'Agosto e Ribeiro (2009) consideram 4 fases de uma estrutura normatizada para analisar os insumos e cargas ambientais no ciclo de vida, composto por cinco

meso-estágios (produção de matéria-prima, transporte de matéria-prima, produção da fonte de energia, distribuição da fonte de energia e uso final), de alternativas energéticas para transporte.

Essas diretrizes, no entanto, deixam o executor da ACV com uma gama de opções, que podem afetar a legitimidade dos resultados de um estudo de ACV. A flexibilidade é essencial para responder à grande variedade de questões abordadas, mas a orientação é necessária mais para assegurar a consistência e qualidade do estudo. O *International reference life cycle data system* (ILCD) foi desenvolvido com o intuito de fornecer essa orientação e os dados necessários. O ILCD é um sistema de dados de ciclo de vida, que pretende ser internacional, e consiste, principalmente, de um manual e uma rede de base de dados. O manual do ILCD traz uma série de orientações técnicas para as avaliações do ciclo de vida e a uma base de dados de inventário de ciclo de vida de emissões e uso de recursos (MONTEIRO; COSTA, 2011).

Segundo o IBICT (2005), uma restrição básica nos estudos de ACV é a grande quantidade de dados necessária. Um estudo de ciclo de vida é, por definição, rico em dados e informações, todavia, a obtenção destes talvez seja o maior desafio de um estudo de ACV no Brasil. As fontes de informação, em geral, são diversas entidades como empresas privadas, públicas e órgãos do governo e este ambiente onde as informações estão descentralizadas, naturalmente já impõe a primeira dificuldade, por concentrar dados que se encontram pulverizados (HILL, 2010).

Mesmo havendo bases de dados que descrevam o inventário dos ciclos de vida (ICV) de *commodities* básicas (energia, transporte, matérias-primas básicas), os processos de produção são específicos caso a caso, e assentam em parâmetros técnicos distintos. Isso faz com que seja difícil a coleta e o fornecimento de informações técnicas gerais, o que exige maior quantidade de pesquisas para aprofundar o conhecimento sobre o tratamento de cada processo de manufatura na ACV.

Dados de um Inventário de Ciclo de Vida (ICV) são informações que descrevem os fluxos de entrada e saída de um determinado modelo de um sistema técnico, que sejam ambientalmente relevantes. Matéria e energia são usadas nesses sistemas técnicos de forma a preencher sua função. A maior parte dos sistemas produtivos é baseada em processos de manufatura e o projeto ambientalmente amigável de novos produtos e processos não é somente dependente de novos materiais. Nesse contexto, é necessário utilizar-se dados de ACV já consolidados para a etapa de coleta de dados e do seu uso nos processos de manufatura, além de modelos confiáveis de ACV para os seus próprios processos considerados relevantes na cadeia decisória (IBICT, 2005).

Em uma aplicação posterior, D'Agosto *et al.*(2014) conclui que o procedimento de ICV possibilita uma análise sistemática e crítica, comparando resultados de consumo de energia e a emissão líquida de CO₂

para seis alternativas energéticas para o transporte público urbano no Rio de Janeiro. Isto ratifica a adequação da metodologia e representa uma contribuição para o desenvolvimento e divulgação de conhecimento do ciclo de vida de alternativas energéticas para o transporte em países em desenvolvimento, uma vez que considera dados representativos de parte da realidade brasileira e trata-se de resultados inéditos.

A abordagem do ciclo de vida demonstra ser instrumento apropriado e abrangente de apoio à tomada de decisões relacionadas às questões ambientais e capaz de direcionar esforços para a elaboração de novas tecnologias e processos que tragam benefícios ambientais. O conhecimento dos detalhes relacionados aos impactos ambientais provenientes de todo o ciclo de vida do produto possibilitam o reconhecimento dos pontos vulneráveis e favorecem a busca de novas opções para a melhoria do desempenho ambiental das fontes energéticas estudadas (MOTTA, 2016).

A Figura 3 apresenta um diagrama que esquematiza a concepção do ciclo de vida de um automóvel, com amplo destaque para a fase de operação do veículo, por ser a fase de mais longa duração, que pode atingir décadas, sendo marcada por um intenso consumo energético e por emissões de GEE, diretamente relacionados à operação contínua do veículo que, segundo Ellingsen e Strømman (2017) representa de 60 a 70% dos impactos ambientais durante o ciclo de vida do mesmo, sobre o qual se dará o foco desta pesquisa.

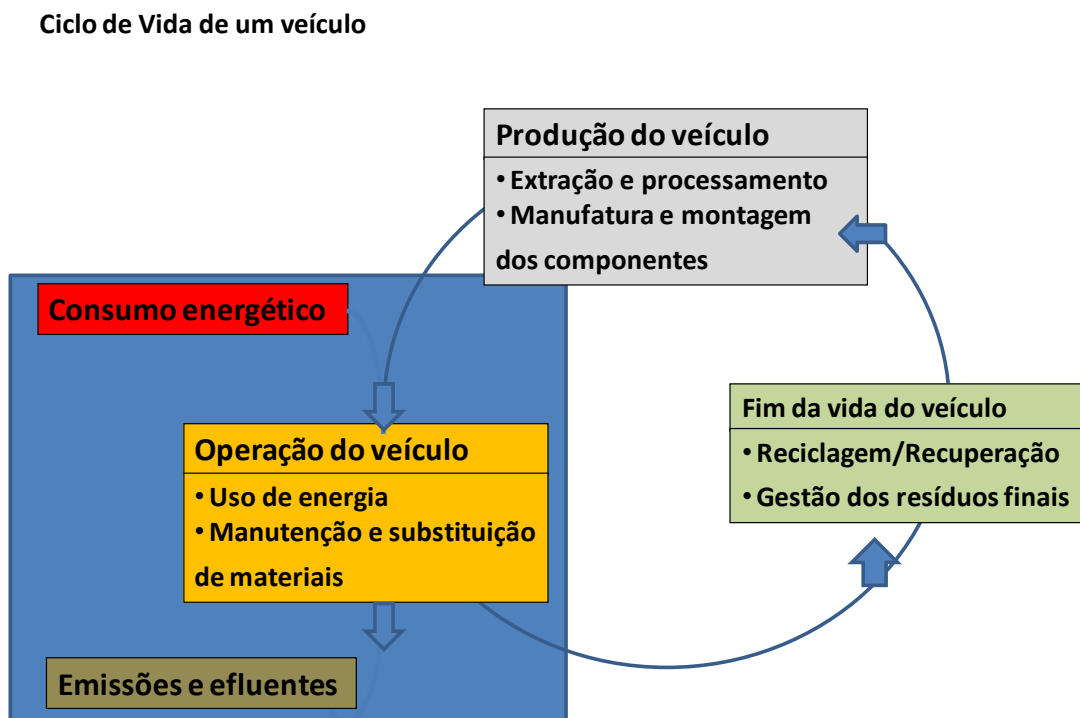


Figura 3 Análise de Ciclo de Vida para veículos
Fonte: Adaptado de Ellingsen e Strømman, 2017.

Pallaro *et al.*(2015) apresentou uma análise referente ao ciclo de vida de um automóvel sob o ponto de vista da sua produção e consumo, e destacam que a análise dos estágios do ciclo de vida indicam o esforço feito para se compreender em mais detalhes como a sustentabilidade pode ser alcançada em cada atividade de produção e consumo. Durante o estágio da produção, a adoção sistemática de design para o meio ambiente e design para a remanufatura, quando utilizados para definir especificações técnicas, podem colaborar para o nível de sustentabilidade dos veículos (GERRARD; KANDLIKAR,2007).

E como no âmbito da Avaliação da Ecoeficiência, os impactos ambientais devem ser avaliados com a utilização da ACV (ABNT, 2014), a análise comparativa entre ciclos de vida de fontes energéticas para transportes pode trazer informações que ajudem a traçar marcos regulatórios e futuras políticas energéticas no setor, bem como subsidiar informações para programas de eficiência energética e mobilidade sustentável.

Porém, Usón *et al.* (2011) destaca que o consumo de energia não ocorre apenas na fase de uso do veículo, pois deve ser contabilizado na ACV o consumo de energia referente às fases de manufatura e durante a reciclagem dos componentes de um automóvel em fim de vida. Porém, é fundamental compreender que o impacto ambiental de cada processo tem diferentes graus de significância e de grandeza (ARNOLD; BART, 2006). Segundo dados de ICV da Ecoinvest, a relação entre Consumo de Energia/Emissões, de um veículo de passeio padrão atual é da ordem de 10% entre as fases de fabricação e uso do veículo (USÓN *et al.*, 2011)

Souza *et al.* (2016) apresentam um estudo de ACV comparativo entre veículos movidos a combustão, elétricos, híbridos, confrontando os diferentes cenários de tecnologia veicular e de combustíveis, a fim de conhecer os impactos ambientais causados por cada um dos sistemas. Os resultados divulgados demonstram que veículos movidos a etanol têm maior potencial de impacto para acidificação atmosférica, ao passo que os a gasolina tem maior potencial de impacto para aquecimento global, sendo 60% dos gases de CO₂ emitidos na fase de operação destes veículos. Os veículos elétricos e híbridos que utilizam baterias de íon lítio apresentam maiores impactos para a toxicidade humana. Porém, no caso de veículos elétricos e híbridos, o maior potencial de emissão de CO₂ se dá nas fases de fabricação do veículo e da bateria (85%).

O Quadro 6 apresenta um resumo dos principais aspectos e impactos negativos de cada fonte energética utilizada para transporte rodoviário, identificados a partir da revisão da literatura. Segundo a metodologia de caracterização da AICV estabelecida na norma ISO 14044 (ABNT, 2009b), para cada um dos impactos foi atribuída uma significância em termos de categorias *midpoint* e *endpoint*.

Quadro 6: Resumo do levantamento de impactos das fontes energéticas utilizadas em sistemas de transporte.

| Fonte energética aplicada à mobilidade | Principais aspectos e impactos negativos | Categorias <i>Midpoint</i> / <i>Endpoint</i> segundo metodologia ACV |
|---|--|--|
| Combustíveis fósseis | <p>Gases do efeito estufa, responsável por 20% das emissões globais de CO₂ (RIEVAJ e SYNÁK, 2017)</p> <p>Hoje, entre 70% e 90% dos poluentes do ar são produzidos pelos veículos (EPELBAUM, 2002).</p> <p>Óxidos de nitrogênio se transformam em ácido nítrico e ácido nitroso em altos níveis de concentração (MMA, 2014).</p> <p>No Brasil, o setor de transporte responde a 9% do total das emissões de CO₂ (CARVALHO, 2009).</p> | <p>Mudança Climática.</p> <p>Alteração da qualidade do ar</p> <p>Efeitos Respiratórios / Saúde Humana</p> <p>Depleção da camada de ozônio / Perda da biodiversidade</p> <p>Energia não renovável + Extração mineral / Depleção de recursos</p> |
| Biocombustível | <p>Intensivos em uso de terra, (BLOTTNITZ e CURRAN, 2006).</p> <p>Poluentes de fertilizantes e pesticidas em cursos de água potável (BLOTTNITZ e CURRAN, 2006).</p> <p>Conversão da biomassa em biocombustível requer energia na maioria das vezes provida por alguma forma de combustível fóssil. (BLOTTNITZ e CURRAN, 2006).</p> | <p>Ocupação da Terra / Qualidade do Ecossistema</p> <p>Ecotoxicidade aquática + Acidificação aquática + Eutrofização aquática / Qualidade do Ecossistema</p> <p>Energia não renovável + Extração mineral / Depleção da recursos</p> |
| Hidrogênio | <p>Questões relacionadas com a produção e o armazenamento energético do hidrogênio Miranda (2017).</p> <p>A maior parte da produção de hidrogênio vem de combustíveis fósseis (IPHE, 2017)</p> | <p>Extração mineral / Depleção da recursos</p> <p>Aquecimento Global / Mudança Climática.</p> |
| Híbrido ou Elétrico Plug-in | <p>Bateria de lítio alto custo (SANNA, 2005).</p> <p>Alto CO₂ emitido para produzir o carro e suas baterias. (Lomborg ,2017)</p> <p>A mineração do lítio responsável pela emissão de mais de 11.340 kg de dióxido de carbono (Lomborg ,2017),</p> <p>Íons de lítio, mineral não renovável e processo de reciclagem custoso e complexo (SANTOS <i>et al.</i>, 2014).</p> <p>Demanda maior geração de energia Francischetti (2014),</p> <p>Uso intensivo de materiais (PEHLKEN, YOUNG e CHEN, 2017)</p> <p>Vida útil das baterias (CASALS <i>et al.</i>, 2016).</p> | <p>Extração mineral / Depleção da recursos</p> <p>Aquecimento Global / Mudança Climática.</p> <p>Toxicidade/ Saúde Humana</p> |

Fonte: elaborado pelo autor (2019).

O Quadro 6 demonstra os impactos ambientais de um sistema de transporte rodoviário, quantificados a partir da aplicação da ACV, que devem ser considerados em uma avaliação para tomadas de decisão visando a busca pela sustentabilidade nos transportes, seja qual for a fonte energética.

Entende-se por *midpoint* a caracterização que utiliza as variáveis localizadas ao longo do sistema de processos físicos, químicos e biológicos, para uma dada categoria de impacto, antes de se chegar ao atributo relacionado ao aspecto ambiental, saúde humana ou recursos naturais. *Endpoint* é a caracterização que considera todo o sistema de processos até efetivamente causar um dano ambiental, à saúde humana ou aos recursos naturais (MOTTA, 2016).

A metodologia ACV, no entanto, tem uma série de fatores que dificultam sua aplicação metodológica, em especialmente a falta de dados e acordos sobre tópicos como a unidade funcional a ser empregada, escopo, etc. Da mesma forma, a ACV é uma metodologia complexa que leva muito tempo para ser executada. Esta característica dificulta a aplicação em projetos de aplicação mais imediata, para os quais é conveniente usar metodologias mais reduzidas ou uma análise simplificada do ciclo de vida, que identificam as áreas da ACV que podem ser omitidos ou simplificados, sem alterar significativamente os resultados gerais. (BENITÉZ *et al.*, 2014).

Já para Usón *et al.* (2011), a metodologia de ACV atual precisa ser adaptada às necessidades dos usuários e, portanto, é necessário torná-la mais eficiente. Uma ACV parcial pode ser criticada, embora seja importante e necessária uma metodologia simplificada para difundir seu uso. Algumas abordagens já foram desenvolvidas para simplificar a atual metodologia e adapta-la para estudos de Ecoeficiência.

A norma UNE 150041 EX (AENOR; 1998) estabelece princípios básicos para o desenvolvimento e apresentação de estudos de ACV simplificados para sistemas de produto. Algumas aproximações desenvolvidas para simplificar a metodologia atual de ACV e adaptá-la aos estudos de ecoeficiência são:

- a) limitar ou eliminar etapas: essa aproximação consiste em reduzir a cobertura do inventário por meio da seleção de uma questão ambiental e avaliar seu ciclo de vida sob essa ótica, como estudos de consumos de energia e emissões de GEE, e excluindo questões ambientais, como perda de recursos, perda de bem-estar, etc., que não são facilmente quantificáveis.
- b) simplificar os cálculos, focando em apenas algumas categorias de impacto: essa abordagem consiste em reduzir a cobertura de inventários, por meio da seleção de aspectos ambientais mais críticos e com dados disponíveis, como o consumo de energia e a emissão de GEE, excluindo-se aspectos mais difíceis de se quantificar, como a depleção de recursos, redução do bem-estar, etc.;

- c) uso de informações qualitativas e quantitativas: o principal problema que se procura resolver com a ACV simplificada é evitar informações quantitativas confiáveis para a etapa de inventário, fazendo aproximações com informações qualitativas.
- d) uso de dados compatíveis: é difícil ou mesmo impossível em alguns casos obter informações e dados de estoque para um determinado produto ou processo. Nesse caso, usamos as informações relativas disponíveis para processos e materiais semelhantes.
- e) limitar os componentes a serem avaliados: Eliminar os componentes com menos de 5% do peso total ou dos impactos ambientais do produto ou processo avaliados.

Apesar de ser objeto de crítica, uma metodologia de ACV parcial é imprescindível para disseminar seu uso e, para a consecução deste trabalho, auxiliando a conduzir uma avaliação mais precisa sobre qual a alternativa de transporte mais adequada ao uso, considerando a interação entre as variáveis econômicas e ambientais, bem como os interesses políticos e sociais no tema, além da aplicação da ACV parcial, entende-se necessário buscar os conceitos da teoria de sistemas para contemplar os demais aspectos importantes a serem considerados neste estudo.

2.12 Teoria de Sistemas e a Complexidade Dinâmica

A teoria dos sistemas introduz o conceito de um pensamento unificado onde todos os sistemas estão incluídos em uma teoria geral. A teoria foi proposta inicialmente por Bertalanffy (1973) no intuito de compreender os sistemas vivos como um todo e a relação destes com o meio ambiente. A teoria geral dos sistemas foi idealizada com o propósito de solucionar as dificuldades que as ciências naturais encontravam para explicar os fenômenos biológicos, devido ao predomínio da aplicação de métodos reducionistas. Esse modelo permite a compreensão conjunta de vários fenômenos inerentes à vida, tais como: crescimento, regulação e equilíbrio.

Segundo Bertalanffy (1973) a origem do pensamento sistêmico propunha a unificação das ciências sob um pensamento holístico e sistêmico que permite compreender o mundo como uma totalidade harmoniosa na diversidade de suas manifestações da arte de ver, descobrir e reconhecer conexões entre as entidades observadas, ressaltando ainda a importância de descobrir as leis da organização que regem o funcionamento das diferentes classes de sistemas. A análise de sistemas é contemporânea ao desenvolvimento do conceito de ecossistemas e funcionou, em um primeiro momento, como forma de estruturação do pensamento sistêmico.

Para Senge (1990), a essência do pensamento sistêmico envolve identificar círculos de causalidade, no lugar de cadeias lineares de relações causa e efeito. A realidade é circular, embora a percepção com uma leve tendência para ver retas e os processos de mudança, mais do que a inter-relação dos elementos em si. Uma simulação com muitas variáveis pode levar à perda da capacidade de identificar padrões de mudança e de identificar as principais inter-relações.

Depois da sua introdução, a expansão crescente do pensamento sistêmico permitiu a definição de uma Teoria Geral dos Sistemas (TGS), que tem por objetivo a formulação de teorias e a construção de conceitos para aplicação em estudos empíricos de diversas ciências. Tal teoria afirma que as propriedades dos sistemas não podem ser descritas significativamente e completamente a partir de seus elementos separados, sendo essencialmente totalizante (BERTALANFFY, 1973).

Nesse contexto, um sistema é definido como a combinação de partes interligadas formando um todo organizado ou complexo. Em um esquema hierárquico de composição, o conjunto de sistemas representa o supersistema, enquanto os subsistemas dizem respeito às partes integradas que formam os sistemas. Os supersistemas estão inseridos dentro de um hipersistema. Dentro dessa lógica, são desenvolvidas as políticas de sustentabilidade no transporte e as respostas tecnológicas por parte da indústria, que se retroalimentam.

O Pensamento Sistêmico tem a sua origem em dois conceitos fundamentais da teoria dos sistemas e do controle (SENGE, 1990). Atualmente, o Pensamento Sistêmico é cada vez mais necessário, atendendo ao nível de complexidade crescente dos assuntos que afetam a vida da humanidade. Muitos dos problemas do mundo atual apresentam uma complexidade dinâmica onde as relações causa-efeito são sutis e onde os efeitos diluídos no tempo, resultantes das nossas ações, não são óbvios.

Complexidade dinâmica é associada à complexidade dos problemas de sistemas dinâmicos. Quando uma mesma ação tem consequências muito diferentes no curto e no longo prazo, ou quando uma ação tem determinadas consequências localmente e consequências muito diferentes em outras partes do sistema, se tem uma situação de complexidade dinâmica. Sempre que o resultado de quaisquer intervenções não é óbvio, existe um cenário de complexidade dinâmica (TEMIDO; SOUSA, 2010). Melhorar o consumo, reduzir os custos e as emissões, e satisfazer as necessidades de transporte dos clientes de um modo sustentável, ao longo do tempo, é um problema dinâmico.

Os problemas sistêmicos envolvem inter-relações entre um grande número de variáveis, onde as relações causa-efeito entre essas variáveis são circulares, dada a importância do conceito de *feedback*, contrariando assim o pensamento linear comum, e alterando a ideia tradicional de causalidade.

Closs, Aramburú, e Antunes (2009) destacam a necessidade da compreensão da complexidade dinâmica para enfrentar tomadas de decisão em que variáveis econômicas, políticas, psicológicas, sociais e financeiras se inter-relacionam, exigindo do tomador de decisão a capacidade de conceber estratégias e

identificar alternativas sobre situações complexas. É necessário conectar fatores críticos, analisar contextos dos problemas, avaliar possíveis consequências de uma decisão, projetar cenários futuros, além de enfrentar situações envolvendo aspectos éticos, conciliando interesses organizacionais aos da sociedade.

As aplicações mais recentes das teorias de sistemas de complexidade dinâmica consistem na formulação de métodos quantitativos nos sistemas, através da modelagem matemática. Um modelo matemático pode representar qualquer sistema ou processo, mas é a modelagem matemática que vem se transformando no instrumento mais eficaz da previsão de mudanças em ecossistemas. Os modelos são comumente construídos para organizar a compreensão dos sistemas e ideias, avaliar dados observados, fornecer o entendimento das ligações entre os componentes, definir os problemas e fazer previsões.

O desenvolvimento histórico da modelagem, em todos os níveis de organização, vem atender à demanda pela crescente necessidade de respostas imediatas para problemas globais que não podem ser analisados, explicados ou preditos pelas disciplinas tradicionais, de forma isolada, sem uma ferramenta holística, que seja hábil para o trabalho com fenômenos complexos.

Segundo Jørgensen (1994), construir um modelo perpassa pelas etapas de; definição do escopo, reconhecendo e delimitando o sistema de interesse de acordo com os objetivos, através de um diagrama conceitual para identificar os componentes e visualizar as interações entre estes; reconhecimento dos fenômenos do sistema com base em outros modelos; modelagem da estrutura quantitativa geral, selecionando as formas funcionais das equações e a unidade básica de tempo; observação da validade do modelo, a fim de confirmar se este é adequado para satisfazer os objetivos propostos. Esta fase compreende:

a) análise de sensibilidade: mede-se a sensibilidade dos parâmetros, isto é, em que medida os parâmetros modificam os resultados do modelo e, conseqüentemente, do sistema;

b) verificação e calibração: descobre-se que valores minimizam a diferença entre os dados observados e os calculados pelo modelo;

c) validação: é o teste que o modelador fará para saber se os parâmetros encontrados na modelagem do sistema são válidos para outros períodos do mesmo sistema.

Ao final, deve-se fazer a análise e interpretação dos resultados da simulação e registrar cada etapa de forma clara para que o modelo possa ser generalizado para replica-lo em outros sistemas. (JØRGENSEN, 1994)

O entendimento dos conceitos de sistemas e da complexidade dinâmica no contexto desta pesquisa é pertinente e de fundamental importância para a avaliação da sustentabilidade das alternativas de transporte de carga. Tais conceitos permitirão analisar as interações e os conflitos de escolha existentes entre os

atributos econômicos e ambientais, representados pela capacidade de realizar as funções esperadas, pelo consumo energético e pelas emissões veiculares resultantes, no âmbito de um programa de rotulagem ambiental. Assim, o pano de fundo desta pesquisa foi baseado na complexidade dinâmica dos elementos que compõem a sustentabilidade do transporte de cargas e os parâmetros necessários para o cálculo dos indicadores de Ecoeficiência, assim como os impactos desejáveis e indesejáveis que eles provocam, de maneira sistêmica.

Considerando que a proposta desta pesquisa permitirá auxiliar uma tomada de decisão, de tal forma que seja possível identificar e criar parâmetros através de indicadores para a caracterização e avaliação das possíveis alternativas, bem como evidenciar para o tomador de decisão as potencialidades e vulnerabilidades associadas a essas cada uma delas, foi feita, uma revisão dos processos de apoio à tomada de decisão.

2.13 O Processo Decisório

Para a consecução do objetivo proposto para esta pesquisa, a saber, um modelo de auxílio para a seleção de veículos de carga, é necessário o uso de metodologias de apoio à decisão aplicadas à sustentabilidade no transporte. Enquanto etapa necessária para o atendimento deste objetivo realizou-se, uma revisão da literatura sobre os métodos de apoio à decisão que consideram o uso demais de um critério para avaliação de alternativas, definidos na literatura como métodos de decisão multicritério.

O apoio científico à tomada de decisões é objeto de interesse há muito tempo e os primeiros registros de estudos com princípios científicos sobre o processo decisório tiveram sua origem na época da Revolução Francesa. Os pioneiros Jean Charles de Borda (1733 – 1799) e o Marquês de Condorcet (1743 – 1794) desenvolveram aplicações jurídicas para a tomada de decisões em grupo e que são muito utilizadas até hoje em pontuações de competições esportivas (POMEROL; BARBA-ROMERO,2012).

Um marco importante para os estudos de apoio à decisão ocorreu em 1969, em um simpósio de programação matemática, quando Bernard Roy apresentou seu trabalho sobre organização de objetivos múltiplos, pelo método, de origem francesa, que ficou conhecido como ELECTRE – *Elimination Et Choix Traduisant La Réalité*. A partir de 1970, então, a abordagem multicritério para melhorar o apoio à decisão ganhou caráter formal e foi consolidada como área da pesquisa operacional (GOMES *et al.*, 2004).

Nas organizações, sejam elas públicas ou privadas, as decisões têm envolvido de forma crescente, um processo transparente de participação e colaboração entre diversas partes interessadas, ou agentes de decisão (ALMEIDA *et al.*, 2012). Surge assim a necessidade de maior interação entre os distintos atores envolvidos nestas decisões, ampliando importância dos debates no âmbito da administração pública sobre a decisão em

grupo, uma vez que o processo decisório em um ambiente complexo envolve a consideração de múltiplas variáveis, denominadas critérios (ALMEIDA, 2013; COSTA, 2017).

Para Löbler *et al.* (2008), o modelo racional de tomada de decisão pode ser descrito como um processo de construção de opções em que se calculam níveis ótimos de risco e escolhe-se a alternativa que tiver melhores chances de sucesso. Tal modelo identifica o processo decisório como uma questão de maximização de utilidades, incorporando a racionalidade econômica na escolha.

Os modelos racionais tendem a pressupor que os tomadores de decisão têm grande controle sobre a situação de tomada de decisão (LÖBLER *et al.*, 2008), exercendo um papel de racionalizar o processo decisório. Modelos quantitativos, como a teoria dos jogos, a teoria da informação, a programação linear e a teoria estatística da decisão, de acordo com Brasil (1993), buscam possibilitar a formulação de regras para a tomada de decisões sobre nível de estoque, utilização de capacidade de produção, controle de qualidade e melhor alocação de recursos, sendo totalmente aplicáveis nessas áreas de estudo.

Esses métodos constituem um importante conjunto de ferramentas para abordar difíceis decisões em organizações, porque auxiliam os gestores em situações de incerteza, complexidade e objetivos conflitantes (HWANG, 1993).

A modelagem multicritério tem sido aplicada à solução de problemas em diversas áreas do conhecimento. Roy (1990) relata a consolidação de duas vertentes: a tomada de decisão multicritério, em inglês *Multicriteria Decision Making* (MCDM), e o auxílio multicritério à decisão (AMD), em inglês *Multicriteria Decision Aid* (MCDA). A MCDM lida com modelos associados à otimização e demandam que os mesmos sejam capazes de suportar validações axiomáticas. Por outro lado, ao abrir mão da obrigatoriedade de validações axiomáticas, a MCDA se aprofunda em outros tipos de validação, associados à análise de coerência, que possibilitam identificar e tratar dualidades e conflitos no processo decisório, configurando-se como uma alternativa à modelagem de problemas mais próximos da realidade, nos quais estejam presentes elementos complexos como subjetividade, incertezas e ambiguidades (CARMO *et al.*, 2013).

A MCDA permite a análise de problemas complexos, envolvendo aspectos (critérios) qualitativos e quantitativos que, por vezes, são conflitantes. Os métodos de apoio multicritério à decisão visam auxiliar nesse tipo de situação, na qual se deseja atender múltiplos objetivos da melhor forma. Tais métodos têm um caráter científico e, ao mesmo tempo, subjetivo, trazendo consigo a capacidade de agregar, de forma ampliada, as condições consideradas importantes com a finalidade de possibilitar a transparência e a sistematização do processo referente aos problemas de tomada de decisão (GOMES *et al.*, 2004). Esses

métodos dependem diretamente do decisor, ou do grupo de decisores, que avaliarão a importância de cada critério de acordo com seus objetivos, dessa forma não há uma solução única para um problema de multicritério e, sim, uma solução que se ajuste melhor as necessidades dos decisores (RANGEL, 2002).

Métodos MCDM são utilizados para desenvolver modelos de decisão visando à resolução de problemas em diversas áreas do conhecimento. O ponto é que existem vários objetivos importantes para uma organização e seus tomadores de decisão, que precisam considerar vários objetivos, muitas vezes conflitantes, em suas decisões. Porém, segundo Almeida *et al.* (2012), vários atores podem participar em um processo decisório, como analista, cliente, especialista ou decisor. O especialista raramente é citado na literatura de MCDM, mas está sempre presente na literatura de teoria da decisão. Trata-se daquele profissional que conhece os mecanismos de comportamento do sistema objeto de estudo e do seu ambiente que influenciam variáveis relacionadas ao problema de decisão em questão, que são chamadas de estados da natureza em teoria da decisão (ALMEIDA, 2011).

Para a resolução de um problema de decisão multicritério, métodos MCDM, técnicas de gestão e de inteligência artificial podem ser aplicados de forma isolada ou de forma combinada. Uma vez que todas as técnicas possuem vantagens de uso e limitações, a combinação de técnicas pode ser feita com a finalidade de usufruir de algumas vantagens específicas de cada uma (LIMA JUNIOR; CARPINETTI, 2015).

Segundo Rangel e Gomes (2010), muitas classificações são empregadas para designar os métodos do MCDA. Dentre elas, a de maior repercussão é a que subdivide os métodos da Escola Americana e os métodos da Escola Francesa, também designada Escola Europeia.

Os métodos da Escola Europeia são baseados em dominância, ou seja, a busca por um grupo de alternativas cujo desempenho é melhor (ou no mínimo igual) que todas as demais alternativas em todos os critérios. Na Europa, as técnicas de sobreposição (Electre e Promethee) ou de ordenação (Borda e Condorcet) são bastante populares, de forma que seus métodos admitem um modelo mais flexível do problema, pois não pressupõe necessariamente a comparação entre as alternativas e não impõe ao analista de decisão uma estrutura hierárquica dos critérios existentes (GOMES *et al.*, 2011).

Já os métodos da escola americana são baseados na função da utilidade multiatributo, que se baseia na hipótese de que, em qualquer problema de decisão, existe uma função de valor real sobre o conjunto de alternativas, que deve expressar o grau de satisfação do tomador de decisão mediante a escolha de cada alternativa (OLSON, 1995; ALMEIDA, 2013).

Outra possível classificação para Métodos de Apoio Multicritério à Decisão é a sua divisão entre métodos multiatributo (*Multiple Attribute Decision Making* - MADM) e métodos multiobjetivo (*Multiple*

Objective Decision Making - MODM). Métodos multiatributo modelam problemas em que as alternativas são predeterminadas e descritas por meio de seus múltiplos atributos relacionados. Essa abordagem é amplamente utilizada para lidar com a seleção de alternativas na qualificação de diversos candidatos e com a ordenação de alternativas para a escolha final. Já os métodos multiobjetivo delimitam um conjunto de soluções possíveis e geralmente são usados na etapa de avaliação final dos candidatos, para permitir a alocação de diferentes demandas para mais de um candidato selecionado (LIMA JUNIOR; CARPINETTI, 2015).

Segundo Costa (2017) há diferentes maneiras de se classificar um problema de decisão: quanto ao nível de conhecimento dos cenários futuros (certeza, incerteza e risco), quanto ao número de critérios (monocritério ou multicritério), quanto à presença ou não de flutuações estatísticas (determinísticas ou estocásticas) e quanto à situação de decisão, sendo possível agrupar as situações de decisão em quatro problemáticas:

- Ordenação, que busca construir uma lista ordenada das alternativas, das melhores para as piores.
- Escolha, na qual se busca identificar a melhor alternativa ou selecionar um conjunto limitado das melhores alternativas.
- Classificação, cuja intenção é classificar as alternativas em grupos homogêneos pré-definidos e que guardem algum tipo de ordem de preferência ou importância entre si, tal como acontece em classificações do tipo ABC de Pareto.
- Descrição, cujo propósito é identificar e descrever as principais características que distinguem as alternativas.
- Priorização ou distribuição, onde se enquadraram problemas nos quais recursos finitos devem ser compartilhados ou distribuídos por um grupo de elementos. Por exemplo, situações de decisão nas quais se pretende distribuir recursos entre um conjunto de alternativas, identificando-se o percentual dos recursos que cabem a cada alternativa (COSTA, 2017).

A hierarquia mais simples envolveria valor como objetivo, com alternativas disponíveis ramificadas a partir desse nó de valor. As hierarquias geralmente envolvem camadas adicionais de objetivos quando o número de ramificações de qualquer nó excede algum valor determinado. A psicologia cognitiva descobriu que as pessoas geralmente têm dificuldade em assimilar grandes quantidades de informações sobre problemas, e Saaty (1980) usou esse conceito como um princípio no desenvolvimento da hierarquia analítica (AHP) (OLSON, 1995).

A teoria do valor está diretamente interessada na necessidade de tomar decisões diante de dilemas. O valor de um bem é determinado por várias características. No contexto da tomada de decisão, no entanto, a escala do valor de mercado não é representativa da utilidade. O valor monetário tem um objetivo residual de refletir o valor da troca. Mas mesmo essa escala não é suficiente em todos os casos (OLSON, 1995). A função valor pode ser vista como uma ferramenta aceita pelos tomadores de decisão para auxiliar na articulação de suas preferências que, segundo Ensslin *et al.* (2001) é usada para ordenar a intensidade de preferência entre pares de níveis de impacto ou ações potenciais. Assim, a função valor deve ser considerada para um grupo de decisores, com o objetivo de avaliar as ações segundo um determinado ponto de vista (LÖBLER *et al.*, 2008), e quando o grupo de decisores necessita efetuar uma ordenação das alternativas disponíveis, quando cada um tem um objetivo específico (multicritério), que podem ser comuns ou não, cada decisor pode considerar diferentes critérios para avaliar as alternativas, quando na etapa final é utilizado um modelo de agregação do grupo de decisores como avaliação global das alternativas (ALMEIDA *et al.*, 2012).

Num cenário de avaliação de diferentes alternativas para escolha e classificação, muitos são os critérios conflitantes de avaliação das mesmas, assim, a necessidade de uma metodologia de avaliação que possibilite a incorporação em seu modelo matemático desses diferentes critérios, justifica o emprego do Apoio Multicritério à Decisão (RANGEL, 2002).

2.13.1 Decisão em Grupo

Para Almeida *et al.* (2012), a decisão em grupo pode ser vista como uma decisão envolvendo dois ou mais decisores, os quais assumirão alguma responsabilidade pela escolha. Procedimentos para agregação de preferências de um grupo de decisores envolvem a redução das diferentes preferências individuais a um conjunto de preferências coletivas.

O método AHP, proposto por Saaty (1980) objetiva a seleção de alternativas levando em consideração diferentes critérios de avaliação, baseado na construção de hierarquias, na definição de prioridades e na sua consciência lógica. Assim, um dos aspectos importantes do AHP é que toda a definição de pesos de um critério é feita indiretamente por meio do julgamento de valores a serem dados pelos especialistas.

É importante destacar o papel da teoria da escolha social nos sistemas de votação, para esclarecer que o propósito desses sistemas está relacionado ao apoio à decisão de um grupo de pessoas que pretende ter suas preferências consideradas no processo de decisão. A teoria da escolha social é a base para os

procedimentos de votação, pois a seleção das alternativas sob aspectos comportamentais é determinada pelo perfil de preferência dos decisores e pelo procedimento de votação (ALMEIDA *et al.*, 2012).

2.13.2 Métodos Ordinais

Segundo Barba-Romero e Pomerol (1997), os métodos multicritério ordinais são comumente aplicados em competições esportivas e sua principal vantagem é o entendimento descomplicado. Seus precursores foram os métodos de escolha social, nos quais as preferências individuais de um grupo de votantes em relação aos candidatos a serem eleitos são agregadas por meio de algum procedimento, passando a representar a preferência do grupo de indivíduos votantes. Nos Métodos Ordinais os critérios que avaliam as alternativas utilizam somente a ordem entre as alternativas para realizar uma avaliação.

Ainda hoje, existem muitas formas de se eleger os representantes de uma determinada associação ou grupo de pessoas pelo uso dos métodos ordinais. Segundo Almeida (2013), em alguns problemas a avaliação intracritério das alternativas só pode ser obtida com uma escala ordinal. Nesses casos, não seria possível a aplicação de uma metodologia de apoio à decisão baseada em métodos de agregação por meio de critério único de síntese, ou com função valor aditiva. Nesses casos, a avaliação intercritério deve ser efetuada com base nas limitações oferecidas pela escala ordinal obtida na mesma.

Barba-Romero e Pomerol (1997) destacam a grande vantagem no uso dos Métodos Ordinais que, apesar das suas particularidades, todos visam à ordenação de candidatos em um processo seletivo. Assim, os métodos ordinais são comumente utilizados em competições esportivas, na ordenação de projetos, na avaliação de desempenho de pessoas, e outras situações análogas. Os Métodos Ordinais apresentam muitas semelhanças com aqueles que utilizam a abordagem da sobreclassificação, por suas características não compensatórias. Na literatura, são encontradas referências a três métodos multicritério ordinais: método de Borda, de Condorcet e de Copeland.

2.13.3 O Método de Condorcet

De acordo com Almeida *et al.*(2012), o método foi proposto pelo Marquês de Condorcet em 1785, e teve a sua origem em um contexto de agregação de votos em um júri, sendo considerado o método precursor da atual escola francesa de multicritério.

Para Meza *et al.* (2014), neste método, as alternativas são comparadas por pares e trabalha com relações de superação, ou dominação, exigindo que cada decisor ordene todas as alternativas de acordo com

sua preferência, para que em cada par de alternativas, seja verificada qual delas é priorizada pela maioria dos decisores. Na comparação entre duas alternativas, será vencedora aquela que obtiver vantagem sobre a outra para um maior número de decisores, fornecendo assim uma alternativa majoritária, como opção vencedora de Condorcet e uma ordenação das demais alternativas. Em caso de empate, configura-se uma situação de indiferença entre as alternativas (ALMEIDA *et al.*, 2012).

Meza *et al.* (2014) assevera que a comparação par a par do método de Condorcet, em certas situações, pode complicar a obtenção direta de uma ordenação imediata das alternativas, podendo se mostrar inconsistente, por conduzir a situações de intransitividade, que não resultam em uma ordenação lógica das alternativas e levando ao dilema conhecido como paradoxo de Condorcet. O paradoxo pode ocorrer em uma comparação entre três alternativas, quando ocorre um circuito de preferências cíclicas, como em um jogo de pedra, papel e tesoura, onde é impossível definir um ganhador absoluto entre os candidatos apresentados, impedindo assim a obtenção da ordenação esperada para a solução das alternativas.

2.13.4 O Método de Copeland

De acordo com Almeida *et al.* (2012), o procedimento de Copeland também se baseia em comparações entre pares para determinar o valor de cada alternativa, possibilitando a escolha da alternativa com maior valor. Neste método, o valor atribuído a uma alternativa depende do número de alternativas que ela vence, subtraído do número de alternativas que vencem ela. As alternativas são então ordenadas pelo resultado da soma desses valores. Os resultados obtidos neste método se alinham com os resultados obtidos pelo método de Condorcet.

Quando existem ciclos de intransitividade, o método de Copeland permite fazer a ordenação e mantém a classificação das alternativas que não pertencem a nenhum ciclo de intransitividade.

Porém, como qualquer método multicritério não ditatorial, o método de Copeland não atende todos os axiomas de Arrow (2010): universalidade, transitividade, unanimidade e independência das alternativas irrelevantes (BARBA-ROMERO; POMEROL, 1997).

2.13.5 O Método de Borda

De acordo com Almeida *et al.* (2012), o método de Borda foi proposto por Jean-Charles de Borda, em 1781, durante a Revolução Francesa para a realização de votações em sistemas multidecisor, com o objetivo de agregar o julgamento de vários membros de um júri. Devido às suas características, o mesmo pode ser

adaptado para problemas multicritério para ser aplicado em comitês compostos por mais de um indivíduo, problema multidecisor, que busca a alternativa de maior pontuação com base no seu posicionamento relativo para todos os decisores.

Segundo Mello *et al.* (2005), o método de Borda foi projetado para ser usado por múltiplos tomadores de decisão, e aplicados a problemas de votação, sendo seu algoritmo direcionado para elaborar um ranqueamento que busque construir uma lista ordenada de alternativas, da melhor até a pior, expressas por meio de ordens lineares, com relações nítidas, assimétricas e transitivas.

Para Arrow *et al.* (2010), no método de votação de Borda, os eleitores demonstram as suas preferências em seus candidatos por meio de pontuação escalonada, numa configuração imparcial, em que a regra de votação é anônima e neutra. Este método ocupa um lugar especial entre todas as regras de pontuação posicionais, uma vez que é menos suscetível que todas as outras regras a muitas possibilidades. A implementação do método de Borda na sua proposição original consiste na adição de coeficientes Borda, obtidos por um candidato ou uma alternativa, em cada um dos eleitores ou critérios.

Para o uso do método de Borda, cada decisor deve ordenar as alternativas de acordo com as suas preferências. O método consiste em ordenar todas as alternativas para cada critério, atribuindo pontos para cada uma delas e uma agregação que consiste na soma de pontos que cada alternativa obtém para cada critério, sendo a ideia central do método estabelecer uma combinação das ordenações ou ranking individuais estabelecidos por cada um dos tomadores de decisão e um ranking global, com a ordenação final das alternativas (ALMEIDA, 2013).

Para a utilização do método de Borda, o tomador de decisão deve ordenar as alternativas para cada critério, de modo que se existem “n” alternativas a serem avaliadas, haverá “ x_n ” como coeficiente de Borda. Assim, para a determinação do coeficiente de Borda, pode-se adotar a seguinte parametrização: a pior alternativa receberá o valor “a”, a segunda pior alternativa será “a + b”, a terceira pior alternativa será “a + 2b” e assim sucessivamente até a melhor alternativa, que será parametrizada por “a + (n - 1)b”. A finalização do método consiste em somar os pontos que cada alternativa obteve para cada critério, sendo a alternativa vencedora aquela que possuir maior número de pontos em seu somatório. O ranqueamento das alternativas segue essa lógica até a última alternativa, que for a menor detentora de pontos. (MELLO *et al.*, 2005).

Segundo Kansas *et al.* (2006), o método Borda é considerado um método de avaliação multicritério ordinal, sendo, em sua essência, a avaliação das alternativas que melhor se ajustem aos critérios definidos. Para uso deste método, o decisor deve ordenar as alternativas de acordo com as suas preferências, onde a alternativa preferida recebe o maior ponto, a segunda alternativa recebe a segunda maior pontuação, e assim

sucessivamente. Ao final, os pontos atribuídos pelos eleitores a cada alternativa são somados, e a alternativa que tiver obtido a maior pontuação é escolhida.

De acordo com Gomes e Gomes (2014), uma situação corriqueira nos problemas multicritério é a diferença de relevância de alguns critérios em relação a outros, por motivos diversos, entre as quais, motivos pessoais explícitos ou subjetivos que levam os agentes de decisão a considerar certos critérios menos ou mais importantes que os demais. Nestes casos, as medidas que expressam a importância relativa entre diferentes critérios são denominadas coeficientes de Borda. Por serem informação crucial para a resolução dos problemas multicritério, a atribuição de valores aos coeficientes dos critérios deve seguir técnicas que reflitam fielmente a preferência dos agentes decisores (GOMES e GOMES, 2014).

Para determinação dos coeficientes de Borda, Pomerol e Barba-Romero (2012) recomendam ordenar as alternativas para cada critério e atribuir escalas com cinco ou dez posições, sendo, nesses casos, usual empregar uma técnica para validar a consistência dos coeficientes, ou análise de sensibilidade. O procedimento de Borda pode ser utilizado também em métodos híbridos e em procedimentos de decisão multicritério com base em avaliações ordinais (ALMEIDA *et al.*, 2012)

Para Mello *et al.* (2005), a escala tradicional para a atribuição dos números de ordem no método de Borda é uma escala intervalar que funciona como uma progressão aritmética com intervalo igual a 1. Ou seja, pode ser atribuído o número de ordem igual 1 para a alternativa de melhor desempenho, o número de ordem 2 para a alternativa com o segundo melhor desempenho, o número de ordem 3 para a alternativa com o terceiro melhor desempenho, etc. Há situações em que se deseja dar maior importância às alternativas que estão em primeiro lugar. Nestes casos, é usual a escala de Borda invertida, atribuindo o maior número de pontos à alternativa vencedora.

Costa (2017) ainda descreve uma métrica para se adotar uma variação do método, para se considerar a ponderação dos critérios. A partir do coeficiente de cada critério, que deve ser multiplicado pelo desempenho das alternativas, como sendo o peso usual abordagem de soma.

Para definir coeficientes aos critérios, Gomes e Gomes (2014) recomendam a adoção de um procedimento de comparação de importância, atribuindo o maior coeficiente ao critério julgado como mais importante e identificar, segundo uma escala, a distância em importância entre um critério e outro, atribuindo assim o peso devido.

O algoritmo de Borda com critérios de ponderação executa as seguintes etapas:

- a) Obter os avaliadores, tomadores de decisão, juízes ou membros do júri;
- b) Definir os elementos ou alternativas a serem classificados;

- c) Seleção do conjunto de critérios;
- d) Obter as avaliações ou julgamentos estabelecidos por cada decisor para cada uma das alternativas;
- e) Avaliar as alternativas sob cada critério;
- f) Com base nas avaliações obtidas na etapa anterior, associe uma pontuação de classificação para todas as alternativas, em cada critério;
- g) Para cada alternativa, obtenha a soma ponderada da classificação, obtendo uma classificação geral;
- h) Obter a classificação final das alternativas, com base nos números de classificação geral.

Utilizando-se o método de Borda para obter um ranking de alternativas, em termos das necessidades dos coeficientes atribuídos como dados de entrada, se encaixa em um problema de compartilhamento. Geralmente, a distribuição da ponderação ocorre intuitivamente assumindo-se o coeficiente do critério como uma informação de entrada, obtida antes da modelagem do problema para um método multicritério e pode ser usado um sistema de votação baseado em escalas do tipo *Likert* para atribuir a ponderação, adotando-se a repartição dos coeficientes de Borda, geralmente tornando a soma dos coeficientes igual a 100 (COSTA, 2017).

Assim, verifica-se que os métodos de apoio multicritério à decisão oferecem um ferramental adequado para a consecução dos objetivos desta pesquisa, pois além de voltados para tratar problemas de decisão que envolvam mais de um critérios de escolha, eles conferem transparência ao processo de decisão, evidenciando as preferências dos decisores pelo uso de um modelo apresentado de forma clara, que esclarece a decisão a ser tomada (GOMES *et al.*, 2004).

Sobre a seleção dos decisores participantes, o método Borda não faz nenhuma exigência sobre o método de escolha destes participantes ou sobre a necessidade de especializações, Porém, como o processo de tomada de decisão irá contemplar termos e conhecimentos técnicos específicos, estes devem ser dominados pelos participantes. Assim, o método Borda é de usualmente aplicado, por ser considerado de difícil manipulação pelos decisores, em relação a outros métodos de votação, sendo um dos mais aplicados em situações práticas, em decorrência da sua naturalidade de cálculo.

Considerando as peculiaridades evidenciadas nas pesquisas dos métodos de apoio à decisão e o contexto do problema em desenvolvimento neste trabalho, identificou-se a necessidade do uso de um método de ordenação pela robustez da sua aplicação, bastante alinhada com os objetivos do estudo de caso abordado nesta pesquisa.

A partir desta análise, o Método Ordinal, por meio do uso do procedimento de Borda foi escolhido para aplicação nesta pesquisa, pois apresenta características peculiares que lhe permitem ser utilizado como ferramenta adequada para a ordenação de alternativas segundo os critérios de Ecoeficiência para uso no transporte de cargas e deverá ser aplicado neste estudo como metodologia de apoio à decisão, conforme detalhado no Capítulo 3.

3. Metodologia de Pesquisa

Este trabalho foi baseado em pesquisa qualitativa e quantitativa, de natureza exploratória e aplicada. A pesquisa foi estruturada para ser desenvolvida em quatro etapas, que serão explicitadas neste capítulo. A Figura 4 apresenta um resumo detalhado dos objetivos, dos métodos adotados e os resultados esperados de cada uma das quatro etapas:

| | Etapa 1: Visão geral dos temas de pesquisa | Etapa 2: Aplicação da metodologia AEE | Etapa 3: Aplicação de metodologia de apoio à decisão | Etapa 4: Conclusões do estudo |
|----------------------|---|--|--|---|
| | FUNDAMENTAÇÃO | MODELAGEM | APLICAÇÃO DO MODELO | ANÁLISE CRÍTICA DO MODELO |
| OBJETIVO | Contextualização das fontes energéticas para transporte; e compilação de informações referentes aos impactos ambientais associados aplicados a cada sistema | Avaliação Ambiental e Avaliação do Valor do Sistema de Produto Definição de categorias de impactos e do valor do sistema de produto | Coleta de Dados Quantificação da Ecoeficiência Cálculo dos Indicadores de Ecoeficiência | Interpretação dos resultados da Avaliação da Ecoeficiência |
| MÉTODO | Revisão Bibliográfica e coleta de dados | Metodologia NBR 14045 Modelagem das entradas e saídas de Informações para AEE | Consulta a Especialistas e aplicação do Método de Borda para obter ponderação dos indicadores de Ecoeficiência | Análise de sensibilidade para comparação de resultados Avaliar as consequências da escolha da metodologia e dos indicadores |
| RESULTADOS ESPERADOS | Definição de Objetivo e Escopo para AEE; Mapeamento dos indicadores, definição de fronteiras e limitações para a perspectiva da Ecoeficiência | Escolha dos Indicadores de Ecoeficiência e do indicador de valor do sistema de produto | Classificação das alternativas segundo indicadores de ecoeficiência | Relato e Divulgação dos resultados dos indicadores de ecoeficiência calculados Conclusões e Recomendações para estudos futuros |

Figura 4: Etapas da metodologia aplicada a esta pesquisa

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Na primeira etapa, de caráter qualitativo e exploratório, pretendeu-se organizar uma visão geral dos temas de pesquisa, por via da revisão bibliográfica, visando proporcionar a fundamentação teórica necessária para se analisar uma área que ainda possui pouco conhecimento sistematizado, a saber, o levantamento das fontes energéticas utilizadas e a compilação de informações referentes aos impactos ambientais associados aplicados a cada sistema. Compõe essa etapa uma revisão de estudos acadêmicos que utilizam a metodologia de Avaliação da Ecoeficiência, pela coleta de dados de aspectos e impactos ambientais típicos para sistemas de transporte rodoviário.

A partir das referências bibliográficas selecionadas, foi proposto um procedimento quantitativo, baseado na técnica de AEE para uma primeira abordagem na comparação dos índices de Ecoeficiência para o transporte de cargas, sob a óptica dos impactos ambientais e dos benefícios econômicos associados.

A segunda etapa deste estudo segue os passos definidos na estrutura metodológica para modelagem da AEE, estabelecida na norma ABNT NBR ISO 14045 (2014). A AEE é constituída por quatro fases: definição de objetivo e escopo; avaliação ambiental e avaliação do valor do sistema de produto; quantificação da Ecoeficiência e interpretação. Assim, serão definidos o objetivo e o escopo da AEE, bem como a avaliação do valor do sistema de produto e o cálculo da Ecoeficiência por meio da pesquisa com especialistas na área automotiva. A orientação para esta fase seguiu o postulado por Hung (2003), que definiu as características que diferenciam indivíduos especialistas de novatos, destacando que os especialistas caracterizam-se por possuir esquemas conceituais ricos, que contém muito conhecimento sobre o domínio, possuem unidades de conhecimento organizadas e interconectadas em estruturas lógicas, necessitando de menor tempo para chegar à solução de um problema, enquanto os novatos possuem menos conhecimento sobre o assunto e possuem esquemas conceituais dispersos e conectados fracamente.

Na primeira fase da AEE, foi necessário definir o escopo, e considerar os limites de abrangência geográfica, temporal e tecnológica, que restringiu e relacionou as fontes de energia associadas e aos sistemas de propulsão de cada alternativa de veículo. Cada fonte de energia e sistema de propulsão deve ser caracterizado de modo específico e detalhado, qualitativamente, para reduzir as incertezas do estudo.

Posteriormente, segue a etapa de avaliação ambiental quantitativa para cada fonte energética e sistemas de propulsão analisados, aos quais deverão ser associados indicadores que estabelecem as dimensões dos impactos ambientais a serem considerados. Sob a ótica dos impactos a serem mensurados, os estudos de AEE devem avaliar o consumo energético para cada alternativa, avaliando os fluxos de energia total, e os GEE oriundos deste consumo de energia.

A metodologia Análise do Ciclo de Vida permite uma abordagem para a avaliação de sistemas industriais, do berço ao túmulo, que envolve o controle de impactos no meio ambiente de um produto específico, desde a extração das matérias primas de seus fornecedores, passando por sua produção, consumo e uso até o descarte final. Uma avaliação de Ecoeficiência, conforme metodologia da norma NBR ISO 14045 (ABNT, 2014), deve considerar todo o ciclo de vida, desde a extração e produção de energia e materiais, uso, tratamento de fim de vida até a disposição final. Porém, esta análise pode ser segmentada, em função do interesse específico no escopo de avaliação da AEE. Com base nesta visão sistêmica, a Ecoeficiência pode ser avaliada dentro de uma perspectiva global ou parcial. Assim, os dados do PBEV

foram utilizados como o inventário de dados que forneceu as informações que auxiliam na tomada de decisão, por meio de dados ambientais quantitativos relacionados ao impacto de cada veículo.

Após esta etapa, segue a avaliação do valor do sistema de produto. Há muitas maneiras de se avaliar o valor do sistema de produto, pois este pode abranger diferentes aspectos de valor, incluindo aspectos funcionais, monetários ou estéticos. Como diferentes partes interessadas podem atribuir diferentes valores para um mesmo sistema de produto, esta etapa da pesquisa avaliou quais os valores para as partes interessadas significativas, com vistas a determinar os valores funcionais ou financeiros do sistema de produto que foram aplicados na AEE. A fim de investigar os valores do sistema de produto em análise, foram aplicados questionários para levantamento de opiniões entre especialistas que atuam na área de eficiência energética veicular, em diferentes setores da cadeia.

Os especialistas selecionados para a participação nesta pesquisa foram escolhidos por conveniência, por possuírem expertise no tema e o perfil de cada um dos respondentes está caracterizado na seção 4.9. A quantificação do valor do sistema de produto deve ser conduzida com a utilização dos indicadores que serão propostos para a consecução desta pesquisa.

A quarta parte desta pesquisa traz a quantificação da Ecoeficiência, que se deu pela aplicação de metodologia de apoio à decisão, com o objetivo de relacionar os resultados da avaliação ambiental com a avaliação de valor do sistema de produto e classificar as alternativas, de modo a ranquear as opções segundo critérios de Ecoeficiência.

Foi utilizado um Método Ordinal para apoio à decisão, primeiramente por meio da ordenação dos indicadores segundo a percepção de cada avaliador e agregação final dos mesmos segundo o procedimento de Borda, para então ordenar as alternativas segundo seu desempenho sob a ótica da Ecoeficiência. Para Almeida *et al.* (2012), os métodos ordinais são uma opção recomendável no uso de técnicas de apoio à decisão, por classificar e comparar as várias alternativas, permitindo então escolher a melhor dentre elas. Esta técnica apresenta a vantagem de observar as ponderações consideradas por diferentes decisores na comparação das diferentes alternativas, que possuem variadas opiniões sobre os indicadores. A partir do Método de Borda foram atribuídos graus diferenciados de importância a cada critério em análise, a partir de consulta feita junto a especialistas no tema apoio à decisão.

Enquanto metodologia de apoio multicritério à decisão, o algoritmo de ordenação de Borda se baseia no método de ordenação para problemas envolvendo múltiplos decisores, entendendo que uma solução de consenso seja aquela com menor índice de rejeição. Assim, é possível afirmar que o método de Borda

aponta, por via de um sistema de votação, uma solução mais próxima do consenso do que o sistema tradicional de eleição, que pode ser confundido, em alguns casos, como imposição da vontade da maioria.

A última etapa contempla a interpretação da avaliação da Ecoeficiência, que compreende a identificação de questões significativas para a validação do modelo desenvolvido, considerando o relacionamento entre os resultados ambientais e os resultados do valor do sistema de produto. Por fim, serão formuladas as conclusões, limitações e recomendações, a partir da interpretação dos resultados da AEE, e da verificação de completeza, consistência e sensibilidade do estudo.

A Figura 5 traz um *framework* básico para explicitar o sequenciamento lógico das etapas que compõem esta pesquisa.

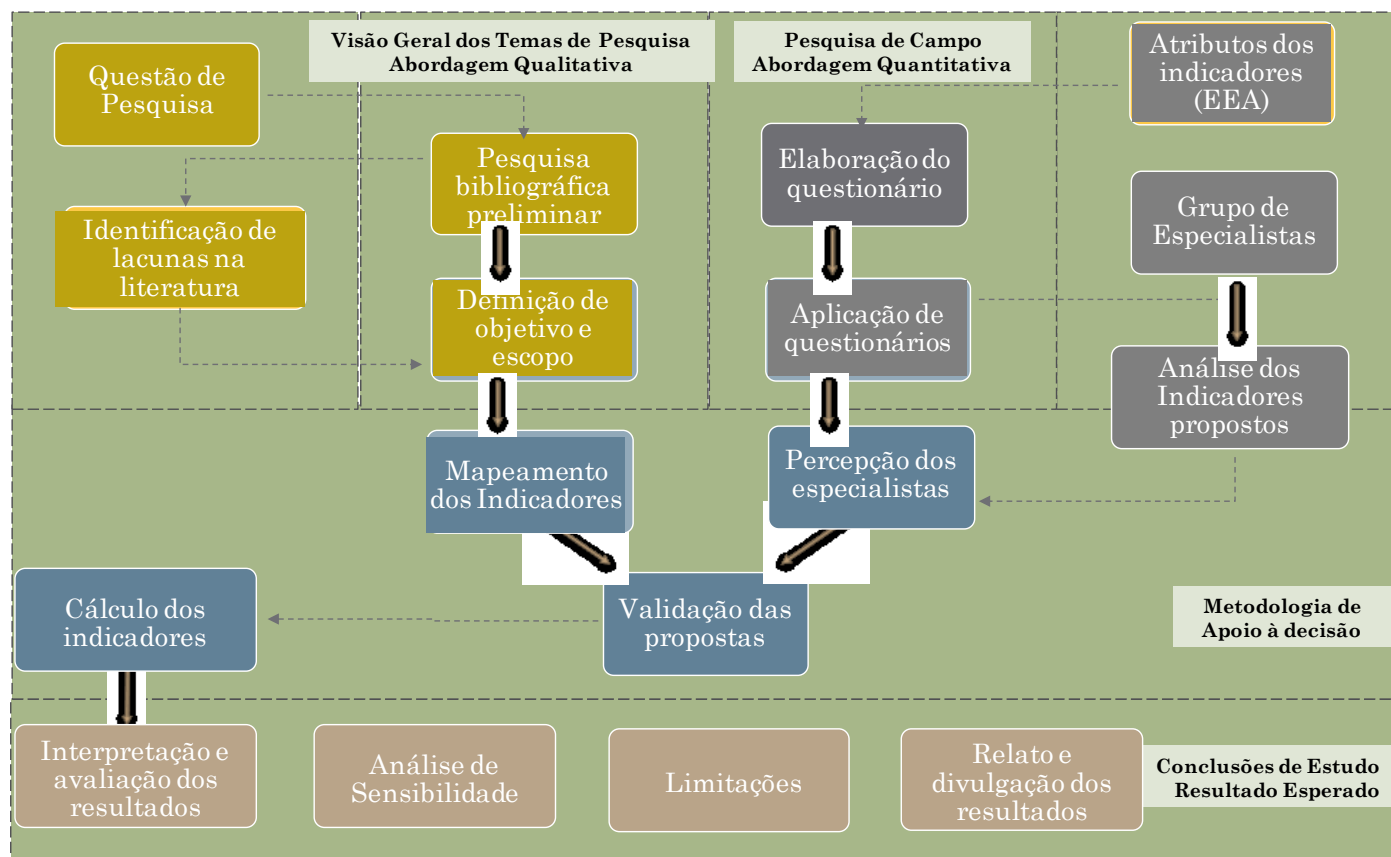


Figura 5 - Framework para elaboração da pesquisa

Fonte: elaborado pelo autor (2019)

O desenvolvimento desta pesquisa evidencia a complexidade das causas dos problemas de eficiência dos transportes, que necessitam de apoio técnico de distintas áreas do conhecimento humano, tais como as ciências sociais, as engenharias mecânica, elétrica e produção, a logística, gestão energética, gestão ambiental e apoio à decisão. Assim, na última etapa deste estudo, os resultados dos impactos obtidos a partir

da AEE serão apresentados no formato de propostas para políticas públicas de regulamentação da Ecoeficiência para a mobilidade humana e o transporte de cargas.

Espera-se assim que, ao fim dessa pesquisa, possam ser estabelecidos indicadores necessários para a avaliação da Ecoeficiência, que permitam realizar declarações comparativas no âmbito do Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular. Tais declarações devem ser claras e suficiente para informar ao público novos critérios para a aquisição de veículos, que viabilizem o transporte de cargas com redução nas emissões e no consumo, e maximizando o seu valor de uso.

Entende-se ainda que o uso das técnicas de AEE serão capazes de oferecer uma visão mais ampla sobre o alcance e as limitações de cada alternativa de veículo para o transporte de cargas, considerando tanto os aspectos ambientais quanto os aspectos de valor, devendo a interpretação dos resultados ser feita de modo transparente e com justificativa apropriada.

A Figura 6 apresenta o framework explicitando as etapas lógicas para a aplicação do questionário.

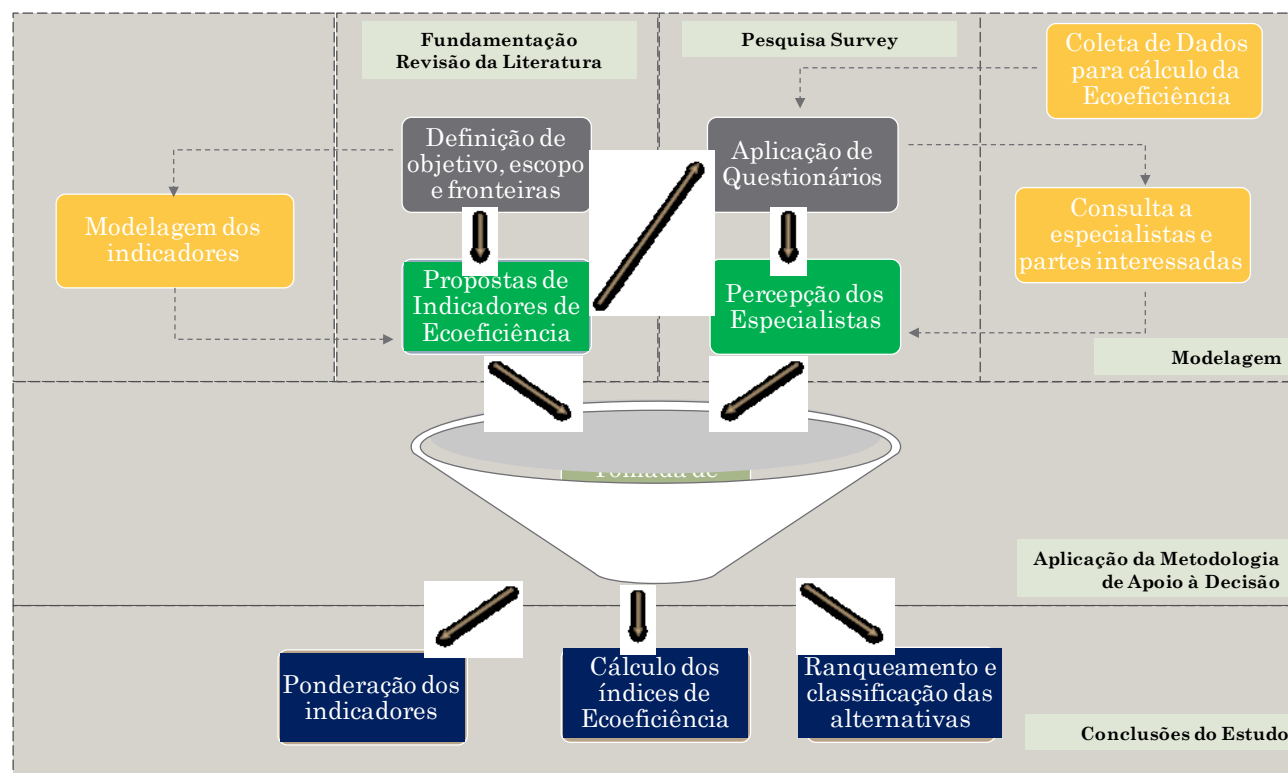


Figura 6 - Framework para aplicação dos questionários
Fonte: elaborado pelo autor (2019)

Segue o Capítulo 4 que explicita como foi executada a aplicação das metodologias aqui apresentadas para o atingimento dos propósitos desta pesquisa.

4. Modelo para Avaliação da Ecoeficiência aplicada ao Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular

Este capítulo apresenta o procedimento que foi desenvolvido nesta pesquisa para a aplicação prática da Avaliação da Ecoeficiência voltada para o transporte de cargas, aplicada ao caso dos veículos participantes do PBEV.

A literatura referenciada no Capítulo 2 sugere distintas abordagens para a seleção de indicadores de sustentabilidade, ou seja, aqueles que devem refletir os atributos ambientais, econômicos e sociais da finalidade para a qual eles sejam aplicados.

Segundo a Agência Europeia do Ambiente (EEA, 2005), um conjunto de indicadores de sustentabilidade, integrando dados espaciais de diferentes domínios, que defina mudanças climáticas, poluição do ar, destruição a camada de ozônio, mudanças na qualidade da água, fluxos de resíduos e materiais, energia, transporte e agricultura pode refletir uma combinação mais bem desenvolvida de fatores reconhecidos para indicadores de maior valor agregado para a formulação de políticas. Tal estrutura tem sido usada como um ponto de partida para se desenvolver o conjunto principal de indicadores, que pode ser considerado como uma ferramenta para organizar informações relevantes e apresentar ligações causais entre indicadores ambientais e tomadores de decisão. O objetivo primordial da EEA é desenvolver, na medida do possível, um conjunto comum de indicadores suportado por um sistema compartilhado de informações relevantes sobre dados ambientais, nas quais todas as partes interessadas cooperariam e desempenhariam um papel efetivo (EEA, 2005).

Deste modo, foram consideradas para o desenvolvimento da proposta feita nesta pesquisa, as prescrições para avaliação da Ecoeficiência de sistemas de produto, conforme apresentado na norma NBR ISO 14045 (ABNT, 2014), que é considerada na literatura como a principal referência que descreve os princípios, requisitos e orientações para esse fim.

As principais fontes para a obtenção de dados foram as tabelas do PBEV, publicadas e atualizadas anualmente pelo Inmetro/Conpet, que trazem a público as informações relacionadas às emissões de poluentes, ao uso de fontes energéticas, consumo de combustível e os índices de eficiência energética de cada modelo de veículo comercializado no mercado brasileiro e participante do Programa Rota 2030, por meio do qual recebem benefícios fiscais referentes ao seu desempenho nos critérios avaliados.

Assim, os dados necessários para os cálculos dos indicadores de Ecoeficiência propostos nesta pesquisa foram obtidos a partir da tabela de acesso público, disponível no portal do CONPET (2019), que, no momento de realização desta pesquisa, contava com 36 marcas e 1118 Modelos/Versões de veículos, tendo sido atualizado em 14/05/2019.

O procedimento de avaliação da Ecoeficiência que é definido aqui se seguirá incorporado nas seguintes 4 etapas intimamente relacionadas:

1. Seleção dos indicadores do conjunto de dados padrão;
2. Classificação dos indicadores selecionados segundo critérios de relevância, importância e pertinência, definidos a partir de pesquisa *survey*;
3. Ponderação dos indicadores;
4. Ranking dos indicadores.

A partir das fontes de dados identificadas, foi estruturado o Quadro 7, que contempla a correlação entre as etapas da metodologia de Avaliação da Ecoeficiência, segundo procedimentos da norma ISO 14045 (ABNT,2014), e as ações elaboradas para a consecução deste estudo.

Quadro 7: Correlação entre as etapas da metodologia de Avaliação da Ecoeficiência, segundo a norma NBR ISO 14045, aplicadas a esta pesquisa.

| | |
|--|--|
| Definição de Objetivo | |
| Finalidade da avaliação de Ecoeficiência | Prover informações para a tomada de decisão em relação à seleção de veículos leves para transporte de carga, pela demonstração dos valores obtidos entre os indicadores de Ecoeficiência destes produtos. |
| Público-alvo | Frotistas, operadores logísticos e usuários de veículos leves para transporte de cargas. |
| Uso pretendido dos resultados | Definição de uma metodologia para cálculo do indicador de Ecoeficiência, para inclusão desta informação adicional no PBEV. |
| Definição do Escopo | |
| Sistema de produto a ser avaliado | |
| Nome | Veículos participantes do PBEV das categorias comercial, picapes e picapes compactas. |
| Dados temporais | Veículos novos em comercialização no ano de 2019. |
| Principais partes interessadas envolvidas | - Montadoras, importadores e revendedores de automóveis - Clientes e usuários destas categorias de veículos - MME, MMA, Inmetro, Petrobras/Conpet, Ibama, Cetesb. |
| Definição da função e unidade funcional | A função do sistema de produto selecionado é o transporte de cargas. A razão para esta escolha é baseada no fato que a capacidade de transporte de cargas indica uma característica primária deste tipo de veículo, representando o benefício econômico pretendido com seu uso. |

| | |
|---|--|
| Definição da fronteira do Sistema | A avaliação do valor do sistema de produto, se dará na fase de uso do veículo, por representar aquela de maior impacto, que dura mais tempo e que, portanto, compreende o maior consumo de energia e as emissões mais significativas no ciclo de vida completo de um automóvel. |
| Método de avaliação ambiental e tipos de impactos | <p>Uma avaliação resumida foi realizada de acordo com os dados oriundos da Tabela PBEV (Conpet, 2019) e da EPE (2019), em relação às fontes energéticas e às emissões de GEE associadas ao uso no transporte.</p> <p>As emissões de GEE na fase de uso no ciclo de vida foram selecionadas para avaliação de impacto, devido aos seus efeitos significativos sobre o aquecimento global.</p> |
| Indicadores de impacto ambiental | <p>Índices de emissões totais de CO_{2eq} (em gramas) e o consumo de combustível pelo veículo (em litros), para cada quilômetro percorrido em seu uso, calculado conforme a Equação 1.</p> <p>Outras categorias de impactos gerados no ciclo de vida de um veículo não foram consideradas no escopo deste estudo, pois seus impactos são considerados irrisórios, em comparação com as emissões de GEE decorrentes da queima de combustível na fase de uso do produto.</p> |
| Método de avaliação do valor do sistema de produto | <p>O indicador de valor do sistema de produto (transporte de cargas), que representa o seu valor funcional, foi considerado como sendo a capacidade de transporte de carga, em volume e peso, para cada alternativa selecionada para esta análise, baseada em uma utilização em condições médias e constantes.</p> <p>O indicador deve ser então normalizado de acordo com a unidade funcional.</p> |
| Escolha dos indicadores de Ecoeficiência | O indicador de Ecoeficiência será obtido a partir do cálculo matemático da razão entre o valor do sistema de produto e indicador de impactos ambientais, conforme demonstrado na Equação 2, definida pela ISO 14045 (ABNT, 2014). |
| Interpretação a ser utilizada | A interpretação dos resultados será baseada na condição de comparação dos resultados obtidos para os indicadores de cada veículo em suas respectivas categorias, enquanto alternativas para o transporte de cargas. |
| Limitações | <p>Os estudos de AEE de cada veículo e de cada fonte energética não irão contemplar as fases da ACV de extração, produção e descarte após a fase de uso na composição do indicador ambiental.</p> <p>Na avaliação do sistema de produto, outros valores funcionais do veículo, que não a sua capacidade de carga, não serão considerados na composição do indicador de valor do sistema de produto.</p> |

| | |
|---|--|
| Relato e divulgação dos resultados | <p>Para validar o modelo proposto, foi realizada uma consulta a especialistas e partes interessadas na área de eficiência energética de transportes, para avaliar e criticar a aplicabilidade do modelo desenvolvido nesta pesquisa.</p> <p>Após validado o método, propõe-se a inclusão do indicador de Ecoeficiência como informação adicional para auxílio na tomada de decisão de escolha dos veículos de transporte de cargas, participantes do PBEV.</p> <p>Além disso, será desenvolvido material informativo para a divulgação da nova metodologia e da proposta de inclusão do indicador de Ecoeficiência nos dados públicos do PBEV, a fim de se disseminar a importância do novo parâmetro de apoio à decisão de escolha.</p> |
|---|--|

Fonte: elaborado pelo autor, 2019.

Segundo a métrica proposta na norma ISO 14045 (ABNT, 2014), serão determinados e caracterizados adiante os impactos econômicos e ambientais dos objetos deste estudo, para fins de aplicação da metodologia de Avaliação da Ecoeficiência.

4.1. Determinação de Impactos Econômicos

Como visto no Capítulo 2, a Avaliação de Ecoeficiência mensura o impacto ambiental total de um produto ou processo ao longo do seu ciclo de vida, para determinar o valor total dos benefícios deste para o cliente. A abordagem específica usada para realizar uma análise de custo do ciclo de vida (LCC) depende do benefício do produto para o seu cliente ou usuário, bem como dos limites e alternativas do sistema considerado. A contabilidade dos custos deve incluir os custos iniciais e todos os impactos ou benefícios futuros dos custos dos produtos, bem como quaisquer custos associados a um impacto ambiental. As métricas econômicas normalmente consideradas para cada alternativa incluem os custos de matérias-primas, mão de obra, energia, investimento de capital, atividades de manutenção, transporte, perdas, doenças, acidentes, desperdícios e destinação de resíduos, entre outros.

Essa contabilidade rigorosa dos impactos nos custos do ciclo de vida identifica os benefícios econômicos de um produto em seu uso e aplicação, bem como ajudar os fabricantes a entender melhor sua proposta de valor econômico. Também permite descobrir custos ocultos e atividades de alto custo no ciclo de vida que podem apresentar oportunidades de otimização.

Para fins de avaliação da Ecoeficiência no âmbito desta pesquisa, serão considerados como benefícios econômicos dos veículos para transporte de carga, as respectivas capacidades de carga em peso (kg) e volume (m³) de cada alternativa. Estes aspectos são relevantes apenas sobre a fase de uso no ciclo de vida

dos veículos, sendo a mais significativa em termos de impactos econômicos para o usuário, a partir de uma simplificação das metodologias de ACV e AEE proposta por Usón *et al.* (2011).

Tendo em consideração que este trabalho se dá no âmbito de um programa de eficiência energética, fruto de uma política pública governamental, para orientação ao consumidor e incentivo a melhorias tecnológicas na indústria, não serão contabilizados aqui os custos de investimentos de capital para a aquisição e a manutenção dos respectivos veículos, uma vez que estes custos não são fixos e são dependentes de variáveis econômicas diversas e alheias aos propósitos deste estudo.

Os dados de capacidades de carga são fornecidos pelas montadoras e importadores dos veículos participantes do programa, em suas declarações de dados sobre cada veículo, anualmente, ao Inmetro. O consumo de combustível é avaliado através de ensaios realizados em cada veículo, e os dados estão disponíveis ao público no portal do CONPET (2019).

4.2 Determinação de Impactos Ambientais

Os impactos ambientais gerais oriundos do ciclo de vida completo de muitos produtos de consumo, frequentemente, não são totalmente revelados aos consumidores. Em vez de focar apenas algumas métricas individuais ou considerar apenas uma parte do ciclo de vida de um produto, o método de avaliação de Ecoeficiência, segundo ABNT (2014) mede, no mínimo, 11 impactos ambientais em seis categorias principais: consumo de energia, consumo de recursos, emissões (para o ar, água e terra), uso da terra, potencial de toxicidade e potencial de risco.

A aquisição e o cálculo dos dados são realizados de acordo com os requisitos da ISO 14040 e ISO 14044 para cada categoria de impacto, conforme definido pelo escopo do estudo, condições de contorno e benefício esperado para o cliente. Esse processo é conhecido como estágio de análise de inventário. O segundo estágio da análise consiste na avaliação de impacto, que se inicia classificando e caracterizando sistematicamente todas as informações coletadas durante a análise de inventário. Os impactos ambientais são então agregados usando cálculos de normalização e ponderação para cada categoria de impacto.

A partir da simplificação das metodologias de ACV e AEE, proposta por Usón *et al.* (2011) e adotada de acordo com os objetivos pretendidos para este estudo, os impactos do potencial de aquecimento global e do consumo de energia primária durante a fase de uso do veículo serão consideradas como categorias de impacto ambiental *end point* nesta pesquisa.

Assim, serão consideradas duas categorias de impactos ambientais como os causadores destes danos (categorias *midpoint*): o consumo energético e as emissões atmosféricas derivadas da fase de uso dos veículos para transporte de carga.

4.3 Caracterização dos Impactos Ambientais

O consumo de recursos considera os principais materiais consumidos durante o ciclo de vida de cada alternativa. As quantidades das diferentes matérias-primas utilizadas são agregadas em uma unidade de consumo comum, como kg, aplicando fatores de ponderação que levam em consideração as reservas exploráveis de cada material e seu nível atual de consumo pela sociedade (todos os usos). Dessa forma, materiais escassos ou com uma taxa de consumo muito alta devem avaliados de modo a ponderar que seu consumo seja fracamente incentivado. Considera-se que as matérias-primas renováveis produzidas por práticas de gestão sustentável têm uma reserva teoricamente infinita e, portanto, teriam um fator de ponderação zero.

O ciclo de vida dos combustíveis fósseis deve ser incluído antes da produção e das energias renováveis antes de sua colheita ou uso. O consumo das fontes de energia primária individuais também deve fazer parte da categoria de consumo de matérias-primas ou recursos.

Os impactos energéticos podem ser expressos em termos de fontes de energia primária, como derivados de petróleo, gás ou etanol. A quantidade acumulada de energia consumida durante o ciclo de vida de cada alternativa é medida e normalmente expressa em megajoules (MJ) por unidade de benefício proporcionado ao cliente/usuário. No caso desta pesquisa, a medição incide sobre a energia consumida, em megajoules, para cada quilômetro percorrido (MJ/km), representando o consumo de combustível médio de cada alternativa, que depois pode ser convertida de volta à fonte de energia primária apropriada (etanol, gasolina, diesel, gás natural ou eletricidade).

As emissões são classificadas em emissões para o ar, água e solo. O inventário de emissões atmosféricas é classificado em quatro subcategorias: potencial de aquecimento global (GWP), potencial de depleção de ozônio (ODP), potencial fotoquímico de ozônio (*smog* de verão) - potencial de criação (POCP) e potencial de acidificação (AP). Algumas emissões atmosféricas, como o metano, podem ser incluídas em mais de uma subcategoria. Ponderações podem ser aplicadas a cada emissão para permitir agregação dentro de cada sub categoria. Assim, o potencial de aquecimento global é expresso como a quantidade total de equivalentes de CO₂ emitidas na atmosfera, de modo que o GWP de uma substância específica é expresso em relação ao CO₂. O potencial de aquecimento global do metano é 25, ou seja, cada 1 kg de metano emitido para o ar é equivalente a 25 kg de emissões de CO₂. Os valores de POCP são comparados em relação ao eteno (POCP = 1), que é mais de 140 vezes mais potente que o metano, cujo POCP é de apenas 0,007.

Para a determinação dos indicadores de Ecoeficiência propostos para esta pesquisa, serão abordados os impactos ambientais que elevam o potencial de aquecimento global (GWP) oriundos das emissões e o

consumo energético gerados durante a fase de uso, do ciclo de vida dos veículos para transporte de carga, considerados neste estudo.

4.4 Medição de Emissões de Poluentes e Consumo Energético

Os ensaios realizados no âmbito do PBEV têm como objetivo medir as emissões e o consumo energético do veículo, por meio de ensaio sem dinamômetro, simulando o funcionamento do veículo ao rodar em ciclos urbano e rodoviário. O consumo é mensurado a partir do Método do Balanço de Carbono, previsto na norma NBR 7024 (ABNT, 2017), que avalia veículos rodoviários automotores leves em um dinamômetro de chassi, em simulação de uma condição de uso normal médio, sejam eles movidos a etanol, gasolina ou Diesel. As emissões de escapamento dos gases que contêm carbono na composição são medidos pela norma NBR 6601 (ABNT, 2012), que especifica um método para a determinação de hidrocarbonetos totais (THC) e não metano (NMHC), monóxido de carbono (CO), óxido de nitrogênio (NOx), dióxido de carbono (CO₂) e material particulado, emitidos pelo motor através do tubo de descarga, bem como a composição dos combustíveis em termos de teores de gasolina e etanol anidro, medido em megajoule por quilômetro percorrido (MJ/km).

Os fatores médios de emissão de CO₂ para os veículos equipados com motores do ciclo Otto, utilizados nesta pesquisa, foram obtidos em ensaios de emissão e consumo padronizados, conforme o ciclo brasileiro de condução definido pela norma NBR6601 (ABNT, 2012). Este método é similar ao método norte-americano definido pela Federal Test Procedure (FTP-75) (EPA, 1978), mediante o uso de gasolina aditivada com 22% de etanol anidro (combustível padrão para ensaios de emissão para fins de certificação do atendimento da legislação ambiental brasileira). Esse ciclo simula a viagem média em deslocamentos urbanos, combinados com estrada ou vias expressas. Segundo Bales *et al.* (2015), os fatores de emissão de CO₂ de origem fóssil dos veículos flexíveis no Brasil são mais baixos, quando comparados àqueles dos veículos movidos exclusivamente a gasolina, uma vez que o etanol anidro (aditivo com função antidetonante) misturado à gasolina tem sua origem em fonte de energia renovável e não deve ser computado para fins de inventário de emissões de GEE.

Segundo o IPCC (1996), o CO₂ é responsável por mais de 97% das emissões totais de GEE de fontes móveis. As emissões veiculares de metano contidas nos hidrocarbonetos não queimados (HC), de óxido nitroso (N₂O), bem como as de monóxido de carbono (CO) e óxidos de nitrogênio (NOx), que também contribuem direta ou indiretamente com o efeito estufa, são mais difíceis de estimar com precisão. Seus fatores de emissão típicos, além de serem extremamente reduzidos, como pode ser observado na Tabela 8, quando comparados aos de CO₂, dependem de detalhado conhecimento da tecnologia de motorização, das

condições de manutenção dos motores, da qualidade do combustível e das diversas características da operação.

Entretanto, o IPCC recomenda que a parcela de CO₂ de origem renovável ou não renovável sejam relatadas, da mesma forma, é recomendável que as emissões evitadas de CO₂ fóssil, que seriam originadas se os veículos operassem com gasolina pura, deve ser estimada para fins de verificação do benefício do uso das fontes alternativas de energia, em relação às mudanças climáticas (IPCC, 1996).

Assim, para fins desta pesquisa, serão utilizados os dados de emissões totais de CO_{2eq} em g/km para que se possa obter uma representação mais significativa do impacto ambiental das emissões veiculares no cálculo da Ecoeficiência.

4.5 Definição do escopo e sistema de produto a ser avaliado

Para a definição do escopo do sistema de produto, deve-se considerar que o objetivo de desenvolvimento desta pesquisa considera o estabelecimento de indicadores de Ecoeficiência apenas para aqueles veículos pertencentes às três categorias descritas a seguir, conforme classificação definida em Inmetro (2011):

a) Veículo comercial leve, que se caracteriza por ser um veículo com massa total máxima autorizada de até 3.856 kg e com massa em ordem de marcha de até 2.720 kg, projetado para o transporte de carga ou projetado para o transporte de mais de 12 passageiros, excetuando-se os veículos utilitários esportivos, os veículos fora-de-estrada e as picapes. São usualmente conhecidos pela denominação de vans ou furgões.

b) Picapes, que se caracterizam por veículos com massa total máxima autorizada de até 3.856 kg e com massa em ordem de marcha acima ou igual a 1.564 kg, projetado para o transporte de carga e de passageiros, dotados de caçamba para transporte de carga, excetuando-se os veículos fora-de-estrada.

c) Picapes compactas, que são veículos com massa total máxima autorizada de até 3.856 kg e com massa em ordem de marcha inferior 1.564 kg, projetado para o transporte de carga e de passageiros, dotados de caçamba para transporte de carga, excetuando-se os veículos fora-de-estrada.

Estas três categorias de veículos, acima descritas, irão compor o escopo do sistema de produto a ser avaliado na proposta apresentada nesta pesquisa.

4.5.1 Valor do sistema de produto

Para a definição de valor do sistema de produto, é usual se recorrer aos conceitos estabelecidos por Marx (1999), que definia a mercadoria (produto), antes de tudo, como um objeto externo, uma coisa que, por

suas propriedades, satisfaz necessidades humanas. Chamamos de trabalho útil aquele cuja utilidade se desvenda no “valor-de-uso” do produto, ou cujo produto contém valor para seu usuário final.

A partir deste ponto de vista, o valor do produto deve ser sempre considerado associado ao seu efeito útil. Assim, fica claro que o valor de uso de cada veículo destinado ao transporte de cargas, deve representar determinada atividade produtiva subordinada a um fim, isto é, um trabalho útil particular.

Portanto, nesta pesquisa, o valor do sistema de produto adotado é baseado no valor funcional da capacidade de transporte de carga em peso (kg) e volume (m³) para cada alternativa de veículo considerada, sendo o escopo delimitado à fase de uso no ciclo de vida de cada alternativa.

4.5.2 Escolha dos Indicadores de Ecoeficiência

Como já apresentado no Capítulo 2, os indicadores são aquelas variáveis que tornam um determinado fenômeno de interesse mais perceptível, por resumir ou simplificar as informações mais importantes relacionadas a este fenômeno. Deste modo, um indicador deve comunicar, quantificar, avaliar e monitorar detalhes das informações mais relevantes do tema de interesse específico.

Desde 1999, a EEA atribui maior prioridade ao desenvolvimento e publicação de relatórios ambientais baseados em indicadores que sejam relevantes e pertinentes para estabelecer políticas públicas, incluindo relatórios setoriais específicos sobre transporte e energia. Essas experiências sugerem que estes parâmetros definidos para os indicadores podem ser replicados para questões ambientais de outros setores (EEA, 2005), bem como para os indicadores propostos nesta pesquisa.

Após a definição do sistema de produto a ser avaliado, segundo a seleção das alternativas dentre as categorias de veículos destinados ao transporte de carga, foram selecionados os valores de serviço e as influências ambientais mais representativas para o caso em questão, considerando as variáveis mais impactantes, para o cálculo da Ecoeficiência em termos de geração de valor pela sua utilidade prestada e, em termos de impacto ambiental, a geração de GEE e o consumo de recursos energéticos.

4.5.3 Consumo Energético Combinado

Para fins de aplicação neste estudo, foi adotado o conceito de consumo energético combinado, conforme previsto na norma NBR 7024 (ABNT, 2017), que trata o consumo de energia em megajoule (MJ) por quilômetro percorrido, calculado em função da fonte energética usada para movimentar o veículo, seja ela qual for. Tal metodologia tem como vantagem a possibilidade de permitir a comparação do consumo energético de diferentes fontes energéticas, uma vez que o uso da unidade MJ para cálculo do consumo de

energia permite que sejam realizadas comparações na mesma base de referência para veículos movidos com qualquer tipo de combustível líquido ou gasoso, inclusive eletricidade.

Este consumo é obtido a partir dos valores de consumo energético nos ciclos urbano e rodoviário, percentualmente ponderados com 55% e 45% de participação, respectivamente, para a classificação do consumo energético combinado. A Equação 1, estabelecida por esta mesma norma, demonstra a fórmula para cálculo do consumo energético combinado.

$$CEC = (CEU \times 0,55) + (CEE \times 0,45) \quad (1)$$

Onde:

CEC: consumo energético combinado urbano e estrada

CEU: consumo energético urbano

CEE: consumo energético estrada

Na metodologia do PBEV, o consumo energético combinado, medido em (MJ/km) irá determinar a classificação no ranking A, B, C, D, E que o veículo obterá diante dos demais concorrentes dentro da sua categoria específica, bem como na categoria geral.

Para as categorias de veículos analisadas nesta pesquisa, os valores limite de corte para classificá-los nas faixas de eficiência são atualizados anualmente e apresentados pelo CONPET (2019), e reproduzidos na Tabela 9.

Tabela 9: Limites para classificação do consumo energético dos veículos participantes do PBEV de 2019.

| Categoria/Classificação | A | B | C | D | E |
|--------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Comercial | 2,58MJ | 3,13MJ | 3,51MJ | 3,72MJ | 9,99MJ |
| Picape Compacta | 1,78MJ | 1,86MJ | 2,00MJ | 2,20MJ | 9,99MJ |
| Picape | 2,40MJ | 2,64MJ | 2,87MJ | 3,09MJ | 9,99MJ |

Fonte: Adaptado de CONPET (2019)

4.5.4 Informação sobre emissões de CO₂

A quantificação do nível de emissões é obtida por meio de uma relação expressa através da massa do gás emitida por distância percorrida pelo veículo, mensurada em gramas por quilômetro (g/km), correspondente à emissão de dióxido de carbono (CO₂) pelo uso de combustível fóssil. Esta informação exclui a parcela da emissão relativa ao componente renovável do combustível (teor percentual de etanol

presente no combustível fóssil) ou de eletricidade de fonte externa, quando houver, nas condições previstas na norma NBR 7024 (ABNT, 2017).

4.6 Cálculo do indicador de valor do sistema de produto

A quantificação do valor do sistema de produto deve ser conduzida com a utilização de indicadores relevantes ao valor funcional do sistema de produto, como definido no objetivo e escopo do estudo de Ecoeficiência (ABNT, 2014). Assim, para expressar o valor do desempenho funcional de cada alternativa de veículo, foi elencada a sua capacidade de transportar cargas e quantificada pela comparação desta qualidade entre as diversas alternativas. Uma quantidade maior de “valor de uso”, conforme definido por Marx (1999), cria por si, maior riqueza material, a ser tratada aqui nesta pesquisa como valor do sistema de produto. O trabalho útil torna-se, por isso, uma fonte mais ou menos relevante na criação de valor, na razão direta da elevação ou da queda de sua produtividade. Qualquer mudança na produtividade, com o mesmo trabalho, no mesmo espaço de tempo, fornece sempre a mesma magnitude de valor. Mas, no mesmo espaço de tempo, gera quantidades diferentes de “valor de uso”: quantidade maior quando a produtividade aumenta, e menor quando ela decai (MARX, 1999).

Aplicando este tradicional conceito, analogamente, aos parâmetros desta pesquisa, o transporte de carga é a materialização do valor do sistema de produto, e a Ecoeficiência aumenta, na medida em que o veículo comercial aumenta a sua capacidade de transporte de carga, reduzindo seus impactos ambientais, em termos de consumo de energia, ou de emissões. Desta forma, foram selecionados os atributos para o cálculo da Ecoeficiência apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Seleção dos atributos para cálculo dos indicadores de Ecoeficiência

| Aspecto | Atributo | Parâmetro | Unidade |
|---------------------|----------------------|------------------------------|----------------|
| Valor Funcional | Capacidade de carga | Peso transportado | kg |
| | Volume útil de carga | Volume transportado | m ³ |
| Impactos ambientais | Consumo de energia | Consumo energético combinado | MJ/km |
| | Emissão de GEE | CO ₂ eq total | g/km |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

A partir da definição dos atributos e parâmetros, pela combinação destes, é possível obter-se um modelo composto por quatro propostas de indicadores parciais de Ecoeficiência, que estão apresentados na Tabela 11 calculados, a partir da fórmula padrão para cálculo da Ecoeficiência, estabelecendo uma relação entre o valor funcional e o impacto ambiental gerado, conforme demonstrado na Equação 2, a fórmula padrão para cálculo da Ecoeficiência, segundo WBCSD (2000), e que irá compor a proposta para o modelo de indicadores adotados nesta pesquisa.

$$\text{Ecoeficiência} = \frac{\text{Valor funcional do produto ou serviço}}{\text{Impacto ambiental}} \quad (2)$$

Tabela 11: Indicadores parciais de Ecoeficiência propostos

| Indicador (Unidade) | Descrição |
|-----------------------------------|--|
| I1 (kg/(MJ/km)) | Peso transportado/Consumo energético combinado |
| I2 (kg/(g/km)) | Peso transportado/Emissão de GEE em CO ₂ eq total |
| I3 (m³/(MJ/km)) | Volume transportado/Consumo energético combinado |
| I4 (m³/(g/km)) | Volume transportado/Emissão de GEE em CO ₂ eq total |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Para fins de determinação dos melhores índices de Ecoeficiência, o objetivo desta proposta é maximizar os valores dos quatro indicadores parciais. Após o cálculo de cada um deles, individualmente, os quatro indicadores devem ser ponderados, normalizados e integrados para a obtenção de um indicador único de Ecoeficiência. Em uma primeira proposta, foi atribuída idêntica ponderação aos quatro indicadores, e o valor do indicador de Ecoeficiência obtido a partir do somatório da multiplicação de cada um dos quatro indicadores por seu respectivo peso, para cada uma das alternativas de veículos em avaliação.

Em adição, foram aplicados questionários a 54 (cinquenta e quatro) profissionais especialistas nos temas relativos à eficiência energética veicular, emissões automotivas e gestão de operações no setor de transportes. Foram selecionados especialistas ligados à indústria automobilística, operadores logísticos que são usuários de veículos de carga, pesquisadores acadêmicos com publicações nesta linha de pesquisa, consultores e servidores de órgãos governamentais que lidam com o tema, através do Proconve, do Rota 2030 e do PBEV, com o intuito de se avaliar uma ponderação adequada entre os indicadores, atribuindo a estes notas em relevância, importância e pertinência. O perfil dos respondentes foi detalhado na seção 4.9.

4.6.1 Coleta de Dados

Na Tabela 12 estão apresentados os dados relativos a consumo energético, emissões e capacidade de carga volumétrica e em massa de cada uma das alternativas de veículos das categorias Comercial leve, Picapes e Picapes compactas, disponíveis no mercado brasileiro, no ano de 2019, a partir dos dados publicados no portal CONPET (2019). No total, 123 (cento e vinte e três) diferentes alternativas de marcas e modelos de veículos com motores e transmissões distintos estão presentes nestas três categorias na tabela de dados do PBEV 2019.

No entanto, para evitar a sobreposição de modelos que apresentam apenas variações de acabamento e/ou acessórios, mas com dados idênticos de motorização, combustível, tipo de transmissão, consumo, emissões e capacidades de carga idênticas, foram descartadas deste estudo 30 (trinta) versões de veículos que contêm todos os dados idênticos às suas outras versões análogas, tendo sido selecionadas, portanto, 93 (noventa e três) alternativas de veículos, que foram utilizadas neste estudo.

Importante destacar que estão sendo considerados nesta proposta tanto os veículos com transmissão manual ou automática, movidos com motores a Diesel, ou com motores ciclo Otto a gasolina ou bicomcombustível do tipo flexível. No ano de 2019, para as categorias de veículos objeto deste estudo, não havia disponível ainda, no mercado brasileiro, nenhuma opção de veículo destinado ao transporte de cargas equipada com motor elétrico ou híbrido, apesar destas fontes energéticas já estarem disponíveis em veículos de outras categorias no momento da realização deste estudo.

Outro ponto de destaque importante a se considerar é que foram identificados alguns modelos de picapes com variações no tamanho da cabine, no tipo de combustível e também no tipo de tração, que pode ser apenas em um, ou em dois dos seus eixos, e que tais variantes apresentam capacidades de carga e índices de consumo e de emissões distintos entre si. Nestes casos, tais diferenças foram julgadas como pertinentes e portando incluídas neste estudo todas as possibilidades de combinações possíveis entre estas versões, que impliquem em variações nos seus índices, e naturalmente, no resultado da avaliação da Ecoeficiência das mesmas.

Portanto, é esperado que em uma mesma marca/modelo de veículo, sejam encontrados resultados de Ecoeficiência bastante distintos, a partir das suas variações de combustível, transmissão, tamanho da cabine, carroceria e tipo de tração. Ainda é digno de nota que dentre as 93 (noventa e três) alternativas consideradas neste estudo, foram identificados 6 (seis) modelos de veículos destinados ao transporte de carga que são comercializados apenas com cabine e chassi aparente, projetados para a instalação de qualquer tipo de

carroceria de carga após sua revenda, e que não dispõem assim de informação do fabricante sobre o volume máximo útil de carga. Nestes casos, para estes veículos foram considerados apenas os indicadores I1 e I2, que consideram como valor funcional do produto a capacidade de carga em peso (kg) para fins de cálculo para avaliação da Ecoeficiência.

Estas seis alternativas, identificadas através da codificação B1, C13, H5, J2, K1 e L7, foram analisadas separadamente das demais, e os dados das mesmas estarão identificados na cor vermelha, em contraste com os dados em preto das demais alternativas analisadas, nas Tabelas 12 a 17 a seguir.

Na Tabela 12 estão elencadas todas as alternativas e critérios a serem analisados. Ou seja, os modelos de veículos que comporão as alternativas de transporte de carga objeto deste estudo, bem como seus respectivos dados de tipo de combustível, emissões medidas no escapamento, consumo energético e capacidades de carga em massa e volume. Os nomes, as marcas dos fabricantes e os modelos dos veículos foram suprimidos e substituídos por uma sequência alfanumérica, a fim de se manter a confidencialidade e a isenção deste estudo com relação aos produtos em questão e aos seus respectivos fabricantes e importadores.

Tabela 12: Dados completos de consumo energético, emissões e capacidade de carga dos veículos comerciais, picapes e picapes compactas.

| Dados de entrada PBE Veicular 2019 - Veículos comerciais e picapes | | | | | | | | | |
|--|--------|--------------|-------------------------|-----------|------------|-----------------------------|----------------------------|--------------------------|---------------------------|
| Marca | Modelo | Combustível | Emissões no Escapamento | | | | Consumo Energético (MJ/km) | Capacidade de carga (kg) | Volume útil de carga (m³) |
| | | Flex (F) | Poluentes | | | Gás Efeito Estufa | | | |
| | | Gasolina (G) | NMHC (g/km) | CO (g/km) | NOx (g/km) | Gasolina/Etanol ou Diesel | | | |
| | | Diesel (D) | | | | CO ₂ total(g/km) | | | |
| A | 1 | F | 0,015 | 0,874 | 0,022 | 167 | 2,23 | 800 | 3,0 |
| A | 2 | D | 0,011 | 0,055 | 0,181 | 168 | 2,27 | 1500 | 6,1 |
| B | 1 | D | 0,015 | 0,030 | 0,283 | 220 | 2,96 | 1590 | ~ |
| B | 2 | D | 0,013 | 0,030 | 0,296 | 217 | 2,92 | 1378 | 8,0 |
| B | 3 | D | 0,013 | 0,030 | 0,296 | 217 | 2,92 | 1329 | 10,0 |
| B | 4 | D | 0,013 | 0,030 | 0,296 | 217 | 2,92 | 1204 | 13,0 |
| B | 5 | F | 0,016 | 0,394 | 0,019 | 137 | 1,85 | 650 | 3,1 |
| B | 6 | F | 0,016 | 0,394 | 0,019 | 143 | 1,94 | 650 | 3,1 |
| B | 7 | F | 0,007 | 0,382 | 0,019 | 137 | 1,83 | 705 | 1,22 |
| B | 8 | F | 0,011 | 0,408 | 0,013 | 143 | 1,91 | 705 | 1,22 |
| B | 9 | F | 0,009 | 0,457 | 0,019 | 161 | 2,16 | 650 | 0,68 |
| B | 10 | F | 0,013 | 0,371 | 0,013 | 161 | 2,16 | 650 | 0,82 |
| B | 11 | F | 0,018 | 0,612 | 0,017 | 174 | 2,31 | 650 | 8,2 |
| B | 12 | D | 0,002 | 0,019 | 0,274 | 180 | 2,44 | 1000 | 8,2 |
| C | 1 | F | 0,014 | 0,318 | 0,019 | 134 | 1,80 | 756 | 1,152 |
| C | 2 | F | 0,011 | 0,340 | 0,023 | 139 | 1,86 | 756 | 1,152 |
| C | 3 | F | 0,028 | 0,401 | 0,013 | 137 | 1,87 | 717 | 1,152 |
| C | 4 | D | 0,009 | 0,057 | 0,241 | 209 | 2,83 | 1134 | 1,061 |
| C | 5 | D | 0,009 | 0,057 | 0,241 | 209 | 2,83 | 1108 | 1,061 |

| | | | | | | | | | |
|---|----|---|-------|-------|-------|-----|------|------|-------|
| C | 6 | D | 0,026 | 0,130 | 0,271 | 203 | 2,75 | 1122 | 1,061 |
| C | 7 | D | 0,006 | 0,039 | 0,258 | 212 | 2,86 | 1134 | 1,061 |
| C | 8 | F | 0,019 | 0,230 | 0,040 | 195 | 2,64 | 1220 | 1,57 |
| C | 9 | F | 0,014 | 0,277 | 0,047 | 185 | 2,53 | 937 | 1,57 |
| C | 10 | F | 0,018 | 0,311 | 0,053 | 197 | 2,68 | 1049 | 1,061 |
| C | 11 | F | 0,019 | 0,215 | 0,027 | 195 | 2,64 | 940 | 1,061 |
| C | 12 | F | 0,019 | 0,243 | 0,026 | 207 | 2,79 | 839 | 1,061 |
| C | 13 | D | 0,020 | 0,124 | 0,289 | 211 | 2,86 | 1378 | - |
| C | 14 | D | 0,020 | 0,124 | 0,289 | 211 | 2,86 | 1220 | 1,57 |
| C | 15 | D | 0,026 | 0,130 | 0,271 | 203 | 2,75 | 1132 | 1,061 |
| C | 16 | D | 0,006 | 0,039 | 0,258 | 212 | 2,86 | 1108 | 1,061 |
| C | 17 | D | 0,006 | 0,039 | 0,258 | 212 | 2,86 | 1049 | 1,061 |
| C | 18 | F | 0,014 | 0,277 | 0,047 | 185 | 2,53 | 937 | 1,57 |
| C | 19 | F | 0,014 | 0,277 | 0,047 | 185 | 2,53 | 915 | 1,57 |
| C | 20 | F | 0,013 | 0,343 | 0,061 | 194 | 2,66 | 817 | 1,57 |
| C | 21 | F | 0,019 | 0,215 | 0,027 | 195 | 2,64 | 915 | 1,061 |
| C | 22 | F | 0,019 | 0,243 | 0,026 | 207 | 2,79 | 816 | 1,061 |
| D | 1 | D | 0,018 | 0,011 | 0,116 | 246 | 3,33 | 1230 | 10,5 |
| D | 2 | D | 0,026 | 0,070 | 0,239 | 171 | 2,32 | 1225 | 6,0 |
| E | 1 | F | 0,020 | 0,357 | 0,024 | 142 | 1,89 | 623 | 0,58 |
| E | 2 | F | 0,020 | 0,357 | 0,024 | 142 | 1,89 | 607 | 0,58 |
| E | 3 | F | 0,027 | 0,281 | 0,022 | 146 | 1,94 | 607 | 0,58 |
| E | 4 | F | 0,025 | 0,402 | 0,023 | 139 | 1,87 | 620 | 0,734 |
| E | 5 | F | 0,021 | 0,426 | 0,024 | 142 | 1,89 | 712 | 0,924 |
| E | 6 | F | 0,021 | 0,426 | 0,024 | 142 | 1,89 | 715 | 0,924 |
| E | 7 | D | 0,018 | 0,088 | 0,287 | 228 | 3,08 | 1143 | 1,28 |
| E | 8 | D | 0,002 | 0,020 | 0,289 | 242 | 3,27 | 1143 | 1,28 |
| E | 9 | D | 0,002 | 0,020 | 0,289 | 242 | 3,27 | 1134 | 1,28 |
| E | 10 | D | 0,002 | 0,020 | 0,289 | 242 | 3,27 | 1017 | 1,28 |
| E | 11 | D | 0,007 | 0,031 | 0,335 | 245 | 3,31 | 1215 | 1,28 |
| E | 12 | D | 0,007 | 0,098 | 0,241 | 246 | 3,33 | 1105 | 1,28 |
| F | 1 | F | 0,035 | 0,553 | 0,113 | 225 | 3,01 | 1298 | 1,18 |
| F | 2 | F | 0,030 | 0,552 | 0,119 | 224 | 3,02 | 1298 | 1,18 |
| F | 3 | F | 0,030 | 0,514 | 0,079 | 220 | 2,97 | 1234 | 1,42 |
| F | 4 | D | 0,014 | 0,024 | 0,286 | 193 | 2,62 | 1176 | 1,18 |
| F | 5 | D | 0,004 | 0,032 | 0,286 | 218 | 2,95 | 1084 | 1,18 |
| F | 6 | D | 0,047 | 0,173 | 0,336 | 206 | 2,79 | 1131 | 1,18 |
| F | 7 | D | 0,047 | 0,173 | 0,336 | 206 | 2,79 | 1104 | 1,18 |
| F | 8 | D | 0,032 | 0,120 | 0,298 | 219 | 2,96 | 1009 | 1,18 |
| F | 9 | D | 0,039 | 0,139 | 0,303 | 208 | 2,81 | 1049 | 1,18 |
| F | 10 | D | 0,014 | 0,079 | 0,280 | 200 | 2,70 | 1234 | 1,42 |
| F | 11 | D | 0,016 | 0,086 | 0,304 | 229 | 3,10 | 1017 | 1,18 |
| G | 1 | F | 0,015 | 0,874 | 0,022 | 167 | 2,23 | 800 | 3,0 |
| G | 2 | D | 0,011 | 0,055 | 0,181 | 168 | 2,27 | 1500 | 6,1 |
| H | 1 | F | 0,032 | 0,461 | 0,017 | 153 | 2,04 | 800 | 2,8 |
| H | 2 | D | 0,014 | 0,116 | 0,307 | 267 | 3,62 | 1433 | 13,0 |
| H | 3 | D | 0,014 | 0,116 | 0,307 | 267 | 3,62 | 1539 | 11,0 |
| H | 4 | D | 0,014 | 0,123 | 0,323 | 252 | 3,41 | 1593 | 8,0 |
| H | 5 | D | 0,017 | 0,158 | 0,332 | 252 | 3,41 | 1759 | - |
| H | 6 | F | 0,029 | 0,619 | 0,024 | 158 | 2,11 | 650 | 0,683 |
| H | 7 | F | 0,025 | 0,312 | 0,042 | 178 | 2,40 | 650 | 0,683 |

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|-------|-------|-------|-----|------|------|-------|
| H | 8 | F | 0,017 | 0,273 | 0,018 | 146 | 1,95 | 650 | 0,683 |
| H | 9 | F | 0,017 | 0,273 | 0,018 | 146 | 1,95 | 680 | 0,683 |
| I | 1 | D | 0,017 | 0,040 | 0,103 | 201 | 2,72 | 1000 | 0,7 |
| J | 1 | G | 0,041 | 0,506 | 0,050 | 294 | 3,93 | 700 | 4,8 |
| J | 2 | D | 0,034 | 0,076 | 0,257 | 230 | 3,11 | 1810 | - |
| K | 1 | D | 0,011 | 0,045 | 0,197 | 215 | 2,53 | 1812 | - |
| L | 1 | F | 0,011 | 0,226 | 0,020 | 226 | 3,01 | 815 | 1,036 |
| L | 2 | F | 0,011 | 0,226 | 0,020 | 226 | 3,01 | 835 | 1,036 |
| L | 3 | F | 0,011 | 0,226 | 0,020 | 226 | 3,01 | 830 | 1,036 |
| L | 4 | D | 0,002 | 0,037 | 0,279 | 208 | 2,81 | 1000 | 1 |
| L | 5 | D | 0,002 | 0,037 | 0,279 | 208 | 2,81 | 1025 | 1 |
| L | 6 | D | 0,022 | 0,100 | 0,294 | 199 | 2,69 | 1020 | 1,58 |
| L | 7 | D | 0,022 | 0,100 | 0,294 | 199 | 2,69 | 1195 | - |
| L | 8 | D | 0,022 | 0,100 | 0,294 | 199 | 2,69 | 1035 | 1 |
| L | 9 | F | 0,016 | 0,331 | 0,025 | 235 | 3,12 | 860 | 1,036 |
| M | 1 | D | 0,022 | 0,028 | 0,289 | 178 | 2,38 | 1050 | 1,036 |
| M | 2 | D | 0,003 | 0,028 | 0,288 | 189 | 2,53 | 1060 | 1,036 |
| N | 1 | D | 0,012 | 0,045 | 0,249 | 213 | 2,89 | 1000 | 1,054 |
| N | 2 | D | 0,012 | 0,045 | 0,249 | 213 | 2,89 | 1050 | 1,054 |
| N | 3 | D | 0,009 | 0,031 | 0,301 | 205 | 2,77 | 1040 | 1,054 |
| N | 4 | D | 0,009 | 0,031 | 0,301 | 205 | 2,77 | 1025 | 1,054 |
| N | 5 | D | 0,008 | 0,038 | 0,246 | 206 | 2,79 | 1005 | 1,054 |
| N | 6 | D | 0,009 | 0,028 | 0,244 | 198 | 2,68 | 1040 | 1,054 |

Fonte: Elaborado pelo autor, a partir de dados extraídos do Portal do CONPET (2019).

As alternativas representadas pelos modelos de veículos B1, C13, H5, J2, K1 e L7, indicadas em fonte vermelha na Tabela 12, são veículos do tipo chassi-cabine, que não trazem de fábrica a carroceria destinada ao transporte de carga, portanto, estes veículos não possuem seu volume máximo de carga definido pelos respectivos fabricantes. Assim, tais alternativas foram provisoriamente excluídas desta análise, a fim de não provocar distorções no cálculo do indicador que irá quantificar a Ecoeficiência.

4.7 Quantificação da Ecoeficiência

Na Tabela 13 são apresentados os resultados calculados dos indicadores de Ecoeficiência parciais I1, I2, I3 e I4 obtidos para cada alternativa apresentada na Tabela 11, a partir das fórmulas de cálculo definidas na Equação 2 e ajustadas conforme a razão entre as grandezas utilizadas nesta pesquisa, conforme exibido na Tabela 9.

Tabela 13:Resultado do cálculo dos indicadores de Ecoeficiência parciais

| Veículos | | Indicador I1 | Indicador I2 | Indicador I3 | Indicador I4 |
|----------|--------|--|---|--|---|
| Marca | Modelo | Peso transportado/Consumo energético combinado | Peso transportado/Emissão GEE CO ₂ Total | Volume transportado/Consumo energético combinado | Volume transportado/Emissão GEE CO ₂ Total |
| A | 1 | 358,87 | 4,80 | 1,35 | 0,018 |
| A | 2 | 661,39 | 8,91 | 2,69 | 0,036 |
| B | 2 | 471,29 | 6,36 | 2,74 | 0,037 |
| B | 3 | 454,53 | 6,13 | 3,42 | 0,046 |
| B | 4 | 411,78 | 5,56 | 4,45 | 0,060 |
| B | 5 | 352,16 | 4,75 | 1,68 | 0,023 |
| B | 6 | 335,81 | 4,55 | 1,60 | 0,022 |
| B | 7 | 385,40 | 5,14 | 0,67 | 0,009 |
| B | 8 | 369,45 | 4,94 | 0,64 | 0,009 |
| B | 9 | 301,31 | 4,03 | 0,32 | 0,004 |
| B | 10 | 300,77 | 4,05 | 0,38 | 0,005 |
| B | 11 | 281,51 | 3,74 | 3,55 | 0,047 |
| B | 12 | 409,65 | 5,55 | 3,36 | 0,046 |
| C | 1 | 420,14 | 5,66 | 0,64 | 0,009 |
| C | 2 | 406,21 | 5,45 | 0,62 | 0,008 |
| C | 3 | 384,29 | 5,23 | 0,62 | 0,008 |
| C | 4 | 400,62 | 5,42 | 0,37 | 0,005 |
| C | 5 | 391,43 | 5,30 | 0,37 | 0,005 |
| C | 6 | 408,66 | 5,53 | 0,39 | 0,005 |
| C | 7 | 395,83 | 5,35 | 0,37 | 0,005 |
| C | 8 | 462,22 | 6,24 | 0,59 | 0,008 |
| C | 9 | 370,50 | 5,05 | 0,62 | 0,008 |
| C | 10 | 391,25 | 5,33 | 0,40 | 0,005 |
| C | 11 | 356,09 | 4,81 | 0,40 | 0,005 |
| C | 12 | 300,64 | 4,06 | 0,38 | 0,005 |
| C | 14 | 426,54 | 5,78 | 0,55 | 0,007 |
| C | 15 | 412,30 | 5,58 | 0,39 | 0,005 |
| C | 16 | 386,76 | 5,23 | 0,37 | 0,005 |
| C | 17 | 366,16 | 4,95 | 0,37 | 0,005 |
| C | 18 | 370,50 | 5,05 | 0,62 | 0,008 |
| C | 19 | 361,80 | 4,93 | 0,62 | 0,008 |
| C | 20 | 306,57 | 4,20 | 0,59 | 0,008 |
| C | 21 | 346,62 | 4,68 | 0,40 | 0,005 |
| C | 22 | 292,40 | 3,95 | 0,38 | 0,005 |
| D | 1 | 369,11 | 5,00 | 3,15 | 0,043 |
| D | 2 | 528,10 | 7,15 | 2,59 | 0,035 |
| E | 1 | 329,02 | 4,38 | 0,31 | 0,004 |
| E | 2 | 320,57 | 4,27 | 0,31 | 0,004 |
| E | 3 | 312,50 | 4,17 | 0,30 | 0,004 |
| E | 4 | 331,92 | 4,46 | 0,39 | 0,005 |
| E | 5 | 376,68 | 5,01 | 0,49 | 0,006 |
| E | 6 | 378,26 | 5,03 | 0,49 | 0,006 |
| E | 7 | 371,14 | 5,02 | 0,42 | 0,006 |

| | | | | | |
|---|----|--------|------|------|-------|
| E | 8 | 349,28 | 4,72 | 0,39 | 0,005 |
| E | 9 | 346,53 | 4,69 | 0,39 | 0,005 |
| E | 10 | 310,77 | 4,20 | 0,39 | 0,005 |
| E | 11 | 367,21 | 4,97 | 0,39 | 0,005 |
| E | 12 | 331,89 | 4,49 | 0,38 | 0,005 |
| F | 1 | 430,97 | 5,77 | 0,39 | 0,005 |
| F | 2 | 429,44 | 5,80 | 0,39 | 0,005 |
| F | 3 | 415,65 | 5,61 | 0,48 | 0,006 |
| F | 4 | 449,70 | 6,09 | 0,45 | 0,006 |
| F | 5 | 367,19 | 4,97 | 0,40 | 0,005 |
| F | 6 | 405,43 | 5,49 | 0,42 | 0,006 |
| F | 7 | 395,75 | 5,36 | 0,42 | 0,006 |
| F | 8 | 340,90 | 4,62 | 0,40 | 0,005 |
| F | 9 | 373,18 | 5,05 | 0,42 | 0,006 |
| F | 10 | 456,22 | 6,18 | 0,52 | 0,007 |
| F | 11 | 328,36 | 4,45 | 0,38 | 0,005 |
| G | 1 | 358,87 | 4,80 | 1,35 | 0,018 |
| G | 2 | 661,41 | 8,91 | 2,69 | 0,036 |
| H | 1 | 392,91 | 5,23 | 1,38 | 0,018 |
| H | 2 | 395,97 | 5,36 | 3,59 | 0,049 |
| H | 3 | 425,26 | 5,76 | 3,04 | 0,041 |
| H | 4 | 467,48 | 6,33 | 2,35 | 0,032 |
| H | 6 | 308,15 | 4,13 | 0,32 | 0,004 |
| H | 7 | 270,75 | 3,64 | 0,28 | 0,004 |
| H | 8 | 332,53 | 4,46 | 0,35 | 0,005 |
| H | 9 | 347,88 | 4,66 | 0,35 | 0,005 |
| I | 1 | 367,04 | 4,97 | 0,26 | 0,003 |
| J | 1 | 178,21 | 2,38 | 1,22 | 0,016 |
| L | 1 | 270,37 | 3,60 | 0,34 | 0,005 |
| L | 2 | 277,00 | 3,69 | 0,34 | 0,005 |
| L | 3 | 275,34 | 3,67 | 0,34 | 0,005 |
| L | 4 | 356,38 | 4,82 | 0,36 | 0,005 |
| L | 5 | 365,29 | 4,94 | 0,36 | 0,005 |
| L | 6 | 379,39 | 5,13 | 0,59 | 0,008 |
| L | 8 | 384,97 | 5,21 | 0,37 | 0,005 |
| L | 9 | 275,82 | 3,67 | 0,33 | 0,004 |
| M | 1 | 441,00 | 5,91 | 0,44 | 0,006 |
| M | 2 | 418,33 | 5,60 | 0,41 | 0,005 |
| N | 1 | 346,46 | 4,69 | 0,37 | 0,005 |
| N | 2 | 363,78 | 4,92 | 0,37 | 0,005 |
| N | 3 | 374,86 | 5,08 | 0,38 | 0,005 |
| N | 4 | 369,45 | 5,00 | 0,38 | 0,005 |
| N | 5 | 359,81 | 4,87 | 0,38 | 0,005 |
| N | 6 | 387,93 | 5,26 | 0,39 | 0,005 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

4.8 Normalização, ponderação e integração dos indicadores

Uma análise da Tabela 13 permite observar que os resultados dos quatro indicadores parciais calculados apresentam uma significativa variação na ordem de grandeza dos seus valores (sendo 0,004 o menor valor de I4 e 661,39 o maior valor de I1). Como em muitos problemas multicritério, as escalas utilizadas na avaliação das alternativas são bastante heterogêneas e faz-se necessário normalizar estes valores, a fim de permitir uma base de comparação com distorções reduzidas, pois os parâmetros obtidos têm intervalos muito amplos. A normalização de valores consiste em uma técnica para deixar os valores dos atributos em uma mesma escala, para que possam ser comparados (GOMES e GOMES, 2014).

A normalização faz parte de um tratamento chamado transformação de valores cujo propósito é minimizar os problemas oriundos do uso de unidades e dispersões distintas entre as variáveis. Neste caso, o objetivo da normalização é ajustar os valores das colunas de dados obtidos para cada indicador, para uma escala comum, sem distorcer as diferenças existentes nos intervalos de valores. Segundo Saaty (2006) as variáveis podem ser normalizadas segundo a amplitude ou segundo a distribuição ou segundo o modo da idealização. Entretanto, Gomes e Gomes (2014) ressaltam que a escolha do procedimento de normalização deve ser cautelosa, pois este não deve influenciar os resultados obtidos, causando reversão de ordem, ou alterando a proporcionalidade.

De acordo com Saaty (2006), é possível tratar os valores dos indicadores, quando são comparados, como se fossem independentes, atribuindo à melhor das alternativas o valor 1 (um), em relação a cada critério, e às outras alternativas, proporcionalmente menos, usando o autovetor principal e idealizando os resultados, dividindo-os pelo maior valor. Caso sejam inseridos novos valores, ele deve ser comparado apenas com a alternativa ideal, sob cada critério, e posicionado acima ou abaixo desse ideal, podendo seu valor ser maior do que 1 (um) quando necessário.

De acordo com este procedimento descrito por Saaty (2006), para se normalizar os valores das alternativas, obtidos na Tabela 13, por via da idealização do vetor de desempenho, deve-se dividir cada um dos seus componentes pelo seu valor máximo. Cada elemento do vetor foi obtido normalizando-se os valores de cada linha da matriz em comparação com o maior valor de cada uma das colunas. Em outras palavras, o vetor de peso é o autovetor correspondente ao valor próprio máximo de cada coluna da Tabela 13.

Assim, segundo o procedimento de Saaty (2006) para a normalização dos indicadores, foi feita a sua divisão pelo valor máximo de cada coluna e, posteriormente, para cada alternativa, foram somados os quatro indicadores, conforme apresentado na Tabela 14. Desta forma, a normalização da matriz permite estimar o vetor de prioridades ou pesos dos critérios em relação a um atributo comum.

Tabela 14: Indicadores parciais normalizados e integrados

| Indicadores | | I1 | I2 | I3 | I4 |
|-------------|--------|---|--|---|--|
| Veículos | | | | | |
| Marca | Modelo | Peso transportado/ Consumo energético combinado | Peso transportado/ Emissão GEE CO ₂ Total | Volume transportado/ Consumo energético combinado | Volume transportado/ Emissão GEE CO ₂ Total |
| A | 1 | 0,501997308 | 0,538308849 | 0,302681652 | 0,29988644 |
| A | 2 | 0,925175824 | 0,999922759 | 0,604945556 | 0,604086418 |
| B | 2 | 0,659253472 | 0,713529319 | 0,615384615 | 0,615384615 |
| B | 3 | 0,635811223 | 0,688157087 | 0,769230769 | 0,769230769 |
| B | 4 | 0,576009565 | 0,623432003 | 1 | 1 |
| B | 5 | 0,492616047 | 0,533398869 | 0,377755096 | 0,377915295 |
| B | 6 | 0,469737273 | 0,510068408 | 0,360210857 | 0,361385568 |
| B | 7 | 0,539105858 | 0,576220495 | 0,150002399 | 0,148133559 |
| B | 8 | 0,516806719 | 0,554391021 | 0,143797821 | 0,142521683 |
| B | 9 | 0,421489927 | 0,451941772 | 0,070898361 | 0,070237991 |
| B | 10 | 0,420726654 | 0,45392958 | 0,08534026 | 0,085071291 |
| B | 11 | 0,393788188 | 0,419896264 | 0,798760573 | 0,786930808 |
| B | 12 | 0,573032777 | 0,622818251 | 0,755521374 | 0,7586985 |
| C | 1 | 0,587702344 | 0,634482684 | 0,143993055 | 0,143629782 |
| C | 2 | 0,568220039 | 0,610951775 | 0,139219692 | 0,138303018 |
| C | 3 | 0,537554513 | 0,586817445 | 0,138870268 | 0,140065244 |
| C | 4 | 0,560398579 | 0,608095361 | 0,084304895 | 0,084521669 |
| C | 5 | 0,547549934 | 0,59415314 | 0,084304895 | 0,084521669 |
| C | 6 | 0,571646747 | 0,620553676 | 0,086916795 | 0,087175796 |
| C | 7 | 0,553707822 | 0,600688142 | 0,083298355 | 0,083492109 |
| C | 8 | 0,646563467 | 0,700395729 | 0,133784076 | 0,133899006 |
| C | 9 | 0,518262745 | 0,566941955 | 0,139625098 | 0,141121343 |
| C | 10 | 0,547299293 | 0,598230581 | 0,089005782 | 0,089888172 |
| C | 11 | 0,498116915 | 0,539583856 | 0,090400797 | 0,090477485 |
| C | 12 | 0,420551932 | 0,455492264 | 0,085511888 | 0,085571367 |
| C | 14 | 0,596655 | 0,648438675 | 0,123457235 | 0,123966053 |
| C | 15 | 0,576741638 | 0,626084458 | 0,086916795 | 0,087175796 |
| C | 16 | 0,54101258 | 0,586915751 | 0,083298355 | 0,083492109 |
| C | 17 | 0,512204149 | 0,555663017 | 0,083298355 | 0,083492109 |
| C | 18 | 0,518262745 | 0,566941955 | 0,139625098 | 0,141121343 |
| C | 19 | 0,506094356 | 0,553630618 | 0,139625098 | 0,141121343 |
| C | 20 | 0,428846238 | 0,471493577 | 0,132505114 | 0,134600731 |
| C | 21 | 0,484869124 | 0,525233222 | 0,090400797 | 0,090477485 |
| C | 22 | 0,409023095 | 0,443005587 | 0,085511888 | 0,085571367 |
| D | 1 | 0,516321776 | 0,560638318 | 0,708692878 | 0,710985931 |
| D | 2 | 0,738727148 | 0,802256352 | 0,581771792 | 0,583743917 |
| E | 1 | 0,460252178 | 0,491212314 | 0,068895243 | 0,06793651 |
| E | 2 | 0,448431897 | 0,47859691 | 0,068895243 | 0,06793651 |
| E | 3 | 0,437141124 | 0,467679964 | 0,067160575 | 0,066386857 |
| E | 4 | 0,464305257 | 0,500844074 | 0,088381509 | 0,088084796 |
| E | 5 | 0,526909006 | 0,561934245 | 0,109946406 | 0,108335681 |

| | | | | | |
|---|----|-------------|-------------|-------------|-------------|
| E | 6 | 0,529129128 | 0,564301945 | 0,109946406 | 0,108335681 |
| E | 7 | 0,519159849 | 0,563215354 | 0,093479908 | 0,09369842 |
| E | 8 | 0,488581386 | 0,530065101 | 0,087973951 | 0,088183431 |
| E | 9 | 0,484734289 | 0,52589136 | 0,087973951 | 0,088183431 |
| E | 10 | 0,434722021 | 0,471632727 | 0,087973951 | 0,088183431 |
| E | 11 | 0,513665162 | 0,557397365 | 0,087009614 | 0,087235378 |
| E | 12 | 0,464255769 | 0,504189432 | 0,086468602 | 0,086763182 |
| F | 1 | 0,602856948 | 0,647008518 | 0,088120109 | 0,087379862 |
| F | 2 | 0,600714494 | 0,650215106 | 0,087806945 | 0,087812919 |
| F | 3 | 0,581419637 | 0,629567635 | 0,10757623 | 0,107624122 |
| F | 4 | 0,629053285 | 0,682910803 | 0,101488202 | 0,101796468 |
| F | 5 | 0,51364484 | 0,557501805 | 0,089901946 | 0,09015567 |
| F | 6 | 0,567128091 | 0,6159216 | 0,095137996 | 0,095463835 |
| F | 7 | 0,553589225 | 0,601217901 | 0,095137996 | 0,095463835 |
| F | 8 | 0,476862182 | 0,51783733 | 0,089667934 | 0,089965964 |
| F | 9 | 0,52201809 | 0,567081078 | 0,094415981 | 0,094764509 |
| F | 10 | 0,638173751 | 0,692986053 | 0,118077068 | 0,118465453 |
| F | 11 | 0,459317822 | 0,498904598 | 0,085689536 | 0,085994882 |
| G | 1 | 0,501997308 | 0,538308849 | 0,302681652 | 0,29988644 |
| G | 2 | 0,925208729 | 1 | 0,604967072 | 0,604133082 |
| H | 1 | 0,549615783 | 0,587195272 | 0,30930054 | 0,305312536 |
| H | 2 | 0,55389359 | 0,601410082 | 0,807935964 | 0,81051659 |
| H | 3 | 0,594865482 | 0,645896802 | 0,683638123 | 0,68582173 |
| H | 4 | 0,653926676 | 0,709991276 | 0,528027698 | 0,52968938 |
| H | 6 | 0,431047502 | 0,462908045 | 0,07282591 | 0,072259694 |
| H | 7 | 0,378741586 | 0,40893001 | 0,063988773 | 0,063833752 |
| H | 8 | 0,46515347 | 0,500113382 | 0,078588147 | 0,078067427 |
| H | 9 | 0,486622092 | 0,523195538 | 0,078588147 | 0,078067427 |
| I | 1 | 0,513425785 | 0,557418051 | 0,057786868 | 0,05796597 |
| J | 1 | 0,249293203 | 0,266978694 | 0,274857172 | 0,271965517 |
| L | 1 | 0,37819721 | 0,404327452 | 0,077299006 | 0,076353582 |
| L | 2 | 0,387478123 | 0,414249598 | 0,077299006 | 0,076353582 |
| L | 3 | 0,385157895 | 0,411769062 | 0,077299006 | 0,076353582 |
| L | 4 | 0,498515636 | 0,540501827 | 0,080155296 | 0,0802955 |
| L | 5 | 0,510978527 | 0,554014372 | 0,080155296 | 0,0802955 |
| L | 6 | 0,530704638 | 0,575675638 | 0,132179236 | 0,132473438 |
| L | 8 | 0,538509118 | 0,584141456 | 0,083657744 | 0,083843948 |
| L | 9 | 0,385820964 | 0,411416324 | 0,074730961 | 0,073626959 |
| M | 1 | 0,616882124 | 0,663274363 | 0,097864703 | 0,097220468 |
| M | 2 | 0,585179574 | 0,628599149 | 0,091959476 | 0,09126867 |
| N | 1 | 0,484634363 | 0,526064668 | 0,082131216 | 0,082370896 |
| N | 2 | 0,508866081 | 0,552367902 | 0,082131216 | 0,082370896 |
| N | 3 | 0,5243629 | 0,569721572 | 0,085446183 | 0,085775642 |
| N | 4 | 0,516799974 | 0,561504434 | 0,085446183 | 0,085775642 |
| N | 5 | 0,503311121 | 0,546879355 | 0,084872015 | 0,085204027 |
| N | 6 | 0,542646086 | 0,58961159 | 0,088425472 | 0,088770226 |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

4.9 Ponderação dos indicadores pelos especialistas

Nesta etapa, segundo a metodologia da norma ISO 14045 (ABNT, 2014), é importante realizar o procedimento de ponderação dos critérios, por meio da atribuição de coeficientes aos indicadores e verificar se as escolhas metodológicas podem afetar os resultados dos indicadores de Ecoeficiência obtidos na etapa anterior. Para conferir pesos a critérios, deve-se efetuar uma comparação de importância, atribuindo o maior peso ao critério que for entendido como o mais importante, sendo a análise comparativa feita aos pares (GOMES e GOMES, 2014).

Para que uma análise de incerteza seja conduzida de modo a determinar de que forma as incertezas nos dados e os pressupostos afetam a confiabilidade dos resultados da avaliação da Ecoeficiência, bem como para definir a importância relativa entre os indicadores, foram aplicados 54 (cinquenta e quatro) questionários a 54 (cinquenta e quatro) especialistas.

Os especialistas selecionados são profissionais que atuam na área de eficiência energética e emissões automotivas, pertencentes à indústria automobilística e ao setor de serviços, entre tomadores de decisão em operadores logísticos, consultores, pesquisadores e docentes na área de transportes em universidades federais, bem como instituições de governo que atuam diretamente no tema da eficiência energética.

O método do vetor próprio permite verificar a consistência dos julgamentos expressos pelos tomadores de decisão. Isso por estimativa um índice de coerência (CI), em função do vetor de peso e do número de critérios comparados.

Foram obtidas 33 (trinta e três) respostas para os questionários enviados. A partir da análise dos especialistas, será possível atribuir pesos numéricos para ponderar a importância relativa entre os indicadores, para a aplicação do Método de Borda para Decisão em Grupo.

O modelo do questionário elaborado para esta pesquisa encontra-se no apêndice I, e os questionários foram aplicados aos especialistas utilizando-se ferramenta “*Google Forms*”.

O questionário aplicado está dividido em dois blocos. O primeiro bloco contém três questões e o segundo bloco contém dez questões. As três primeiras questões, do Bloco 1, sendo duas de respostas fechadas e uma resposta aberta, foram aplicadas para identificar o perfil profissional do entrevistado. As questões deste primeiro bloco solicitaram aos entrevistados a definição do seu setor de atuação, seu cargo ou ocupação neste setor e o tempo de atuação no mesmo.

O segundo bloco do questionário foi elaborado no sentido de procurar identificar e capturar a opinião do entrevistado sobre a pertinência, a relevância e a importância relativa de cada um dos quatro indicadores

propostos, a partir das oito primeiras questões, com respostas do tipo fechadas. Foram consideradas as seguintes definições:

“Pertinência”, ou seja, a qualidade do que é pertinente, que se refere ao assunto em questão. Característica do que é concernente, apropriado. Relação de pertinência refere-se aos elementos que pertencem ou não a um conjunto (HOUAISS, 2001).

“Relevância”, particularidade do que é relevante ou tem a qualidade de relevante, isto é, de grande valor, conveniência ou interesse. A parte que se sobressai, ou possui saliência numa superfície (HOUAISS, 2001).

“Pertinência” e “Relevância” estão relacionadas à capacidade de proporcionar informação adequada e útil para nortear as políticas e os programas bem como a tomada de decisão e foram classificadas através da seguinte escala:

| Relevância: | Pertinência: |
|-------------------------|--------------------------|
| 1 - Nenhuma relevância | 1 - Nenhuma pertinência |
| 2 - Baixa relevância | 2 - Baixa pertinência |
| 3 - Relevante | 3 - Pertinente |
| 4 – Bastante relevância | 4 – Bastante pertinência |
| 5 – Total relevância | 5 – Total pertinência |

O atributo “Importância” aqui foi aplicado no sentido de valor mérito, crédito ou interesse. Aquele que possui influência relativa de um indicador entre os demais (HOUAISS, 2001) e foi ranqueada em uma escala de 1 a 4, onde a nota 1 foi atribuída ao indicador mais importante e 4 ao menos importante.

Ao final do questionário, foi inserida uma última questão, aberta, que solicitava aos entrevistados que deixassem a sua opinião, contendo sugestões pessoais sobre outras possibilidades de indicadores para avaliar a Ecoeficiência de veículos de carga.

Os resultados obtidos a partir dos questionários aplicados estão apresentados nos Gráficos 3 a 13.

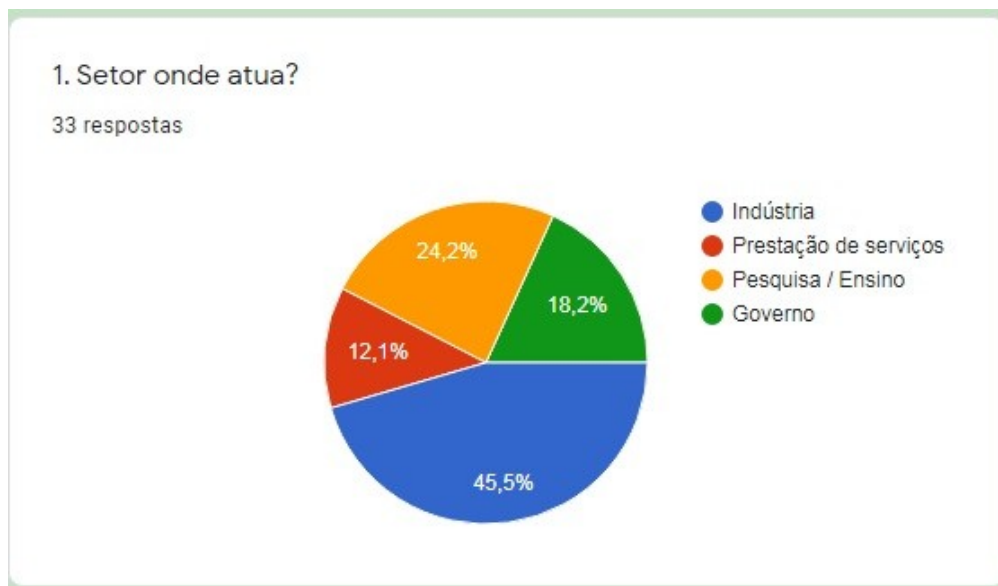


Gráfico 3 – Respostas dos especialistas entrevistados em relação ao seu setor de atuação profissional.

Fonte: Formulário aplicado na pesquisa *survey* elaborado através do Google Forms (2019)

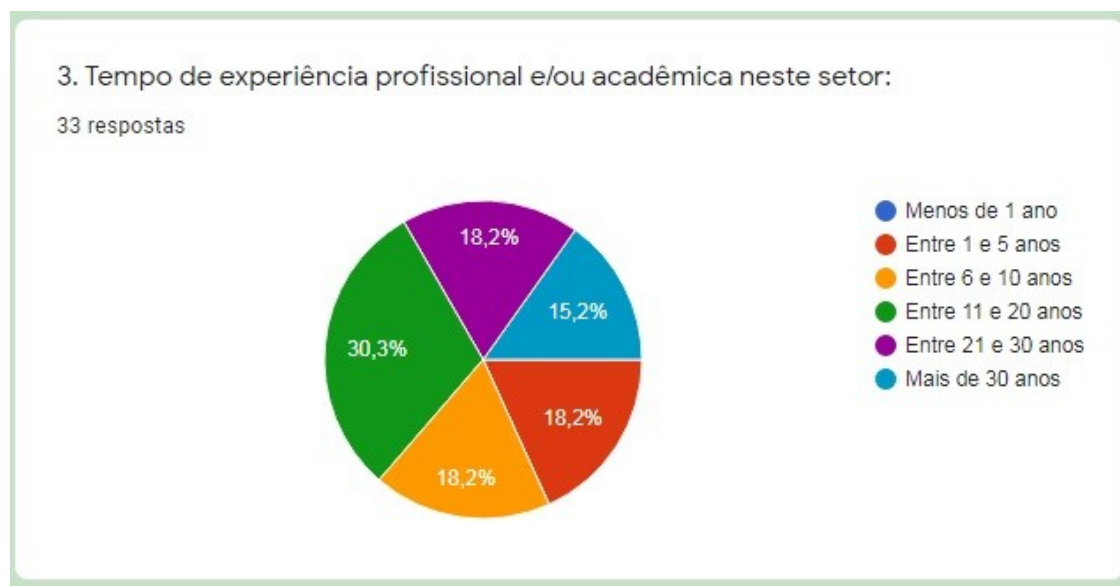


Gráfico 4 – Respostas dos entrevistados em relação ao seu tempo de experiência profissional no setor onde atua.

Fonte: Formulário aplicado na pesquisa *survey* elaborado através do Google Forms (2019)

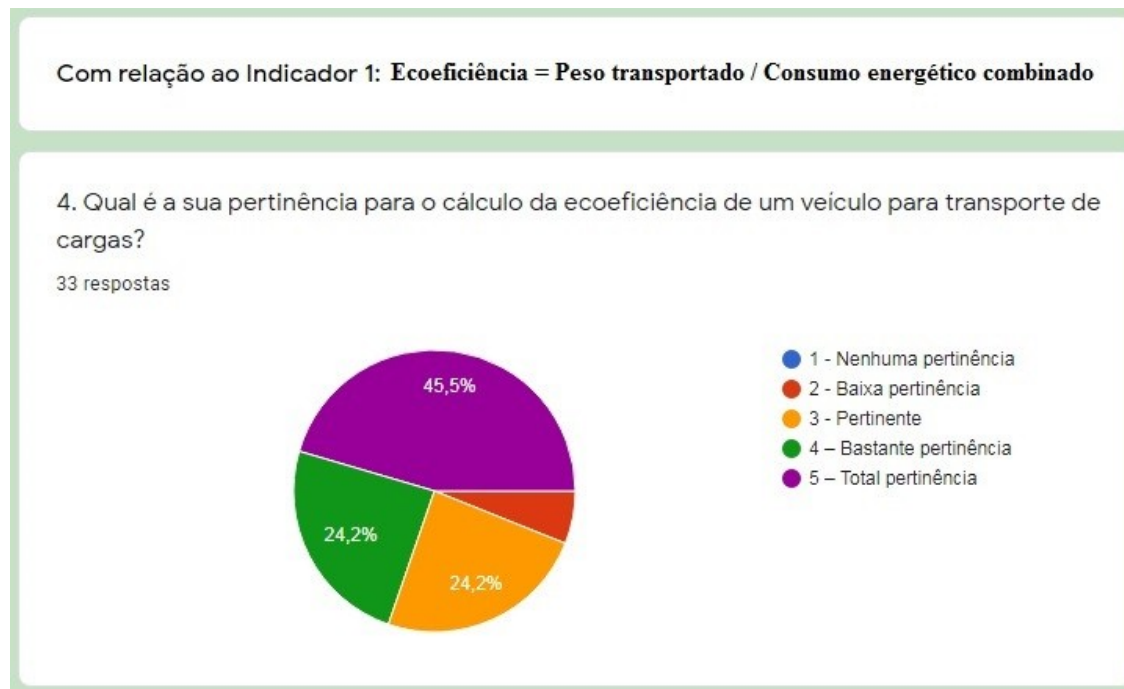


Gráfico 5 – Respostas dos entrevistados em relação à pertinência do primeiro indicador
 Fonte: Formulário aplicado na pesquisa *survey* elaborado através do Google Forms (2019)

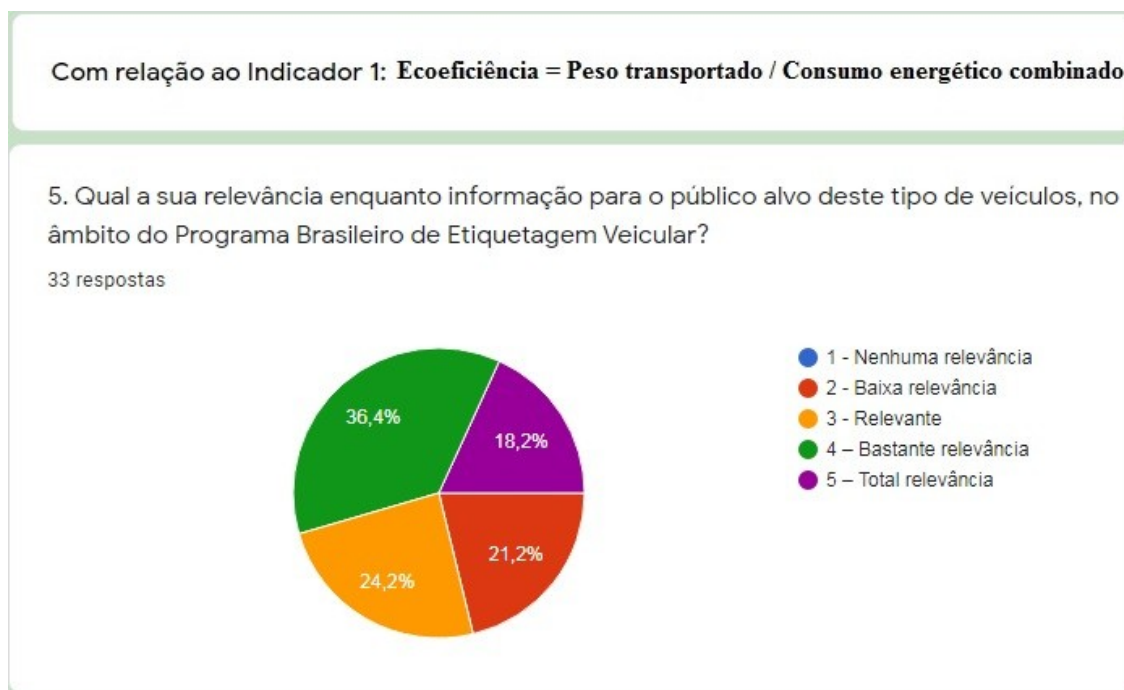


Gráfico 6 – Respostas dos entrevistados em relação à relevância do primeiro indicador.
 Fonte: Formulário aplicado na pesquisa *survey* elaborado através do Google Forms (2019)

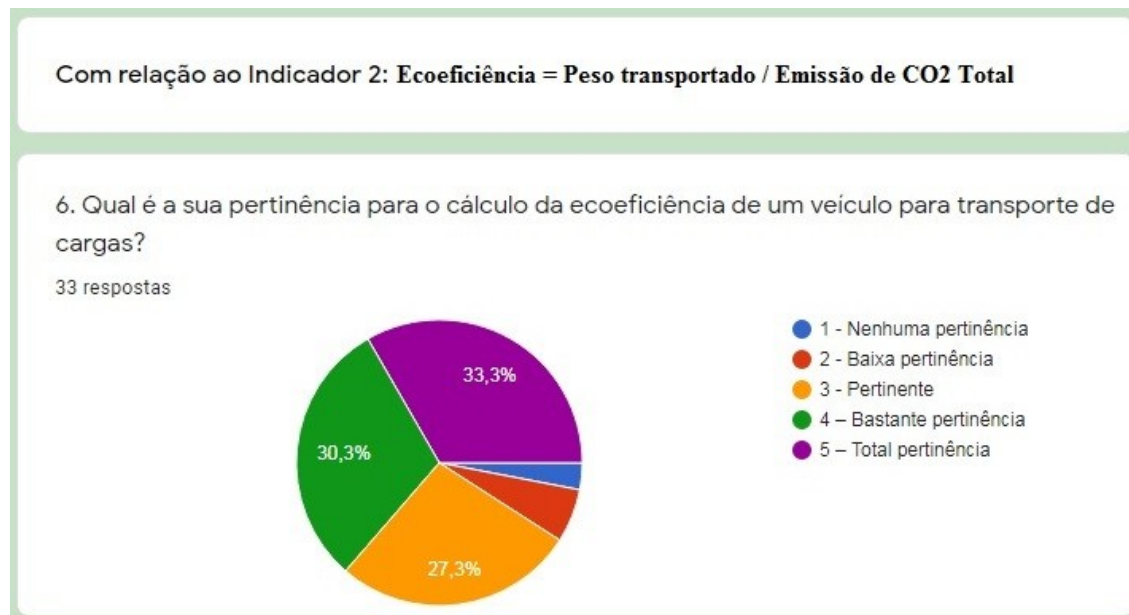


Gráfico 7 – Respostas dos entrevistados em relação à pertinência do segundo indicador
 Fonte: Formulário aplicado na pesquisa *survey* elaborado através do Google Forms (2019)

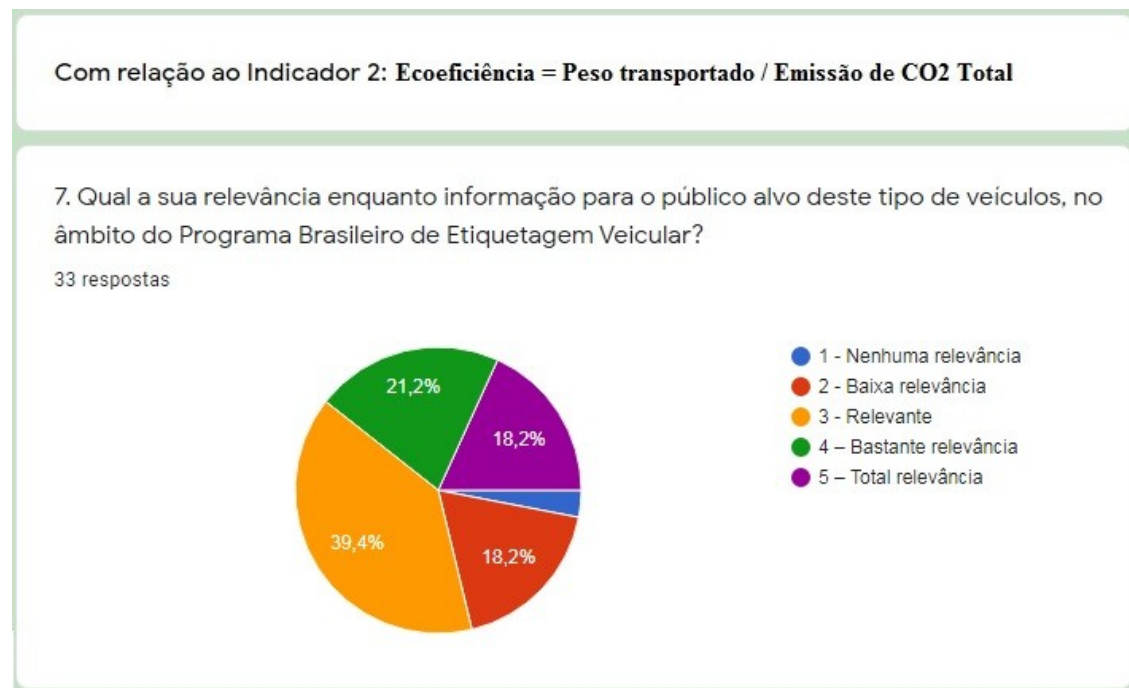


Gráfico 8 – Respostas dos entrevistados em relação à relevância do segundo indicador.
 Fonte: Formulário aplicado na pesquisa *survey* elaborado através do Google Forms (2019)

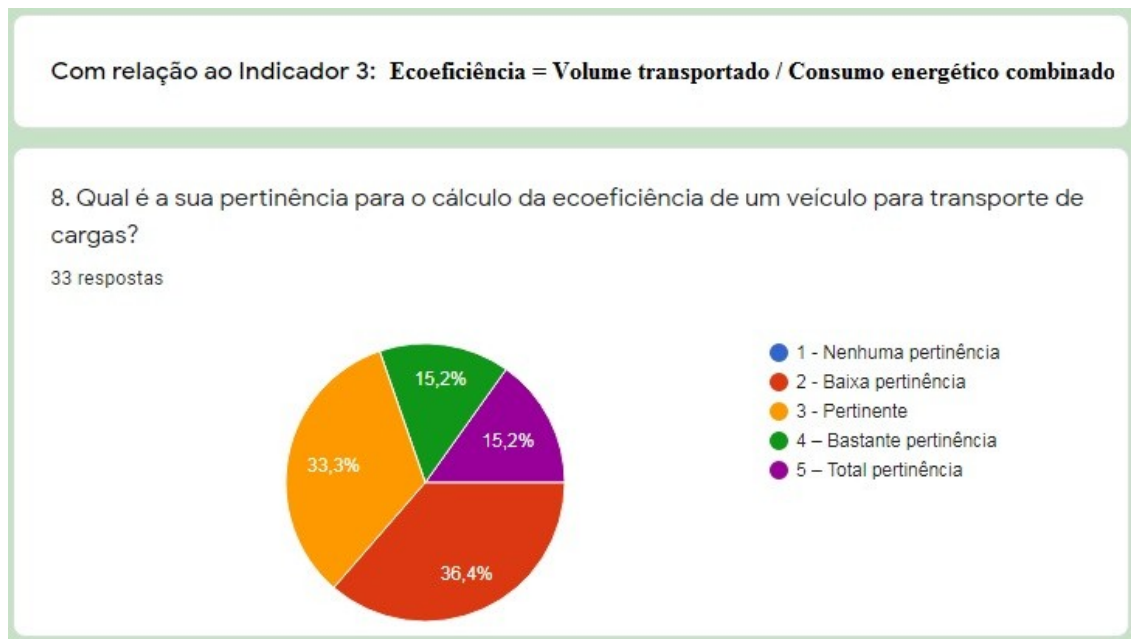


Gráfico 9 – Respostas dos entrevistados em relação à pertinência do terceiro indicador
 Fonte: Formulário aplicado na pesquisa *survey* elaborado através do Google Forms (2019)

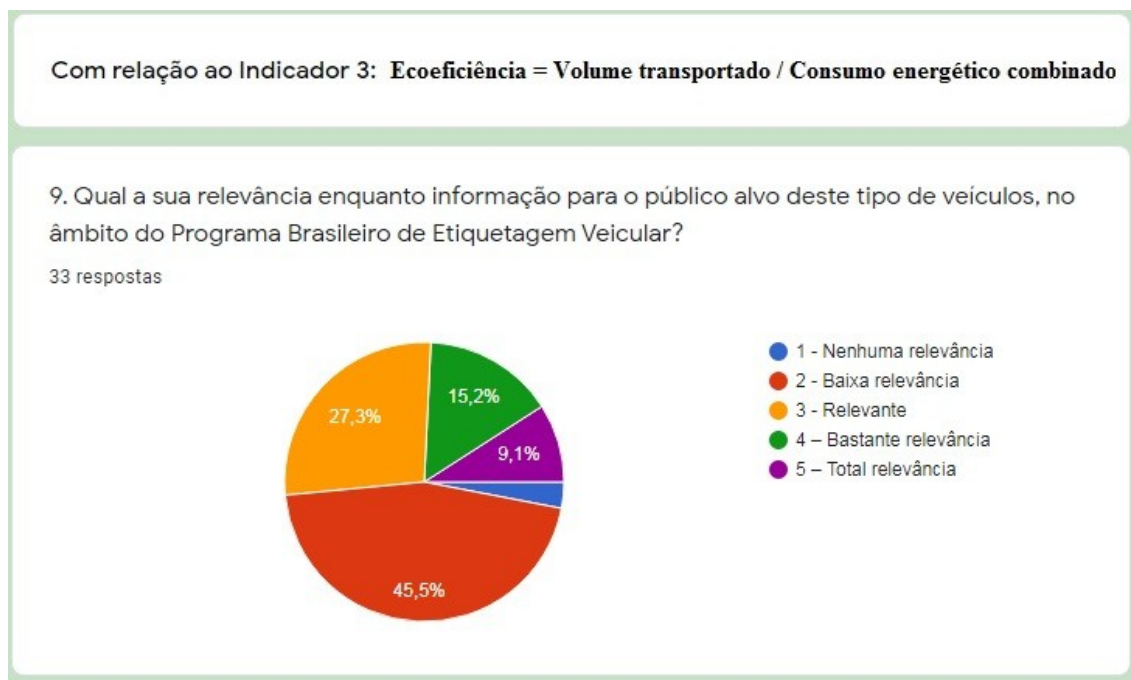


Gráfico 10 – Respostas dos entrevistados em relação à relevância do terceiro indicador.
 Fonte: Formulário aplicado na pesquisa *survey* elaborado através do Google Forms (2019)

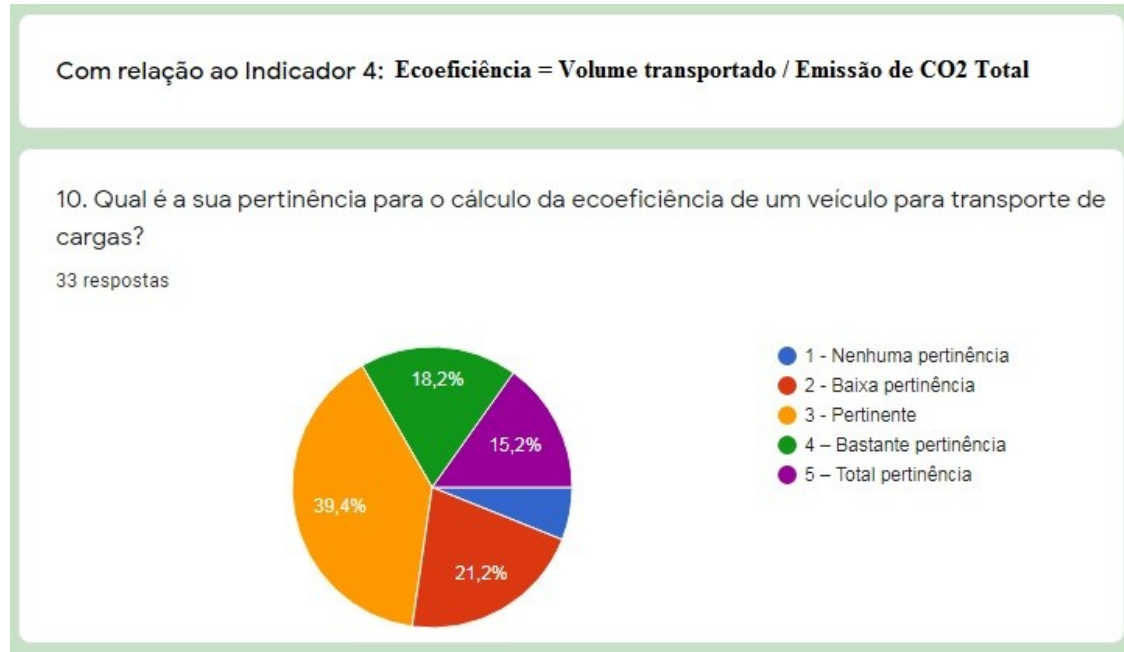


Gráfico 11 – Respostas dos entrevistados em relação à pertinência do quarto indicador
 Fonte: Formulário aplicado na pesquisa *survey* elaborado através do Google Forms (2019)

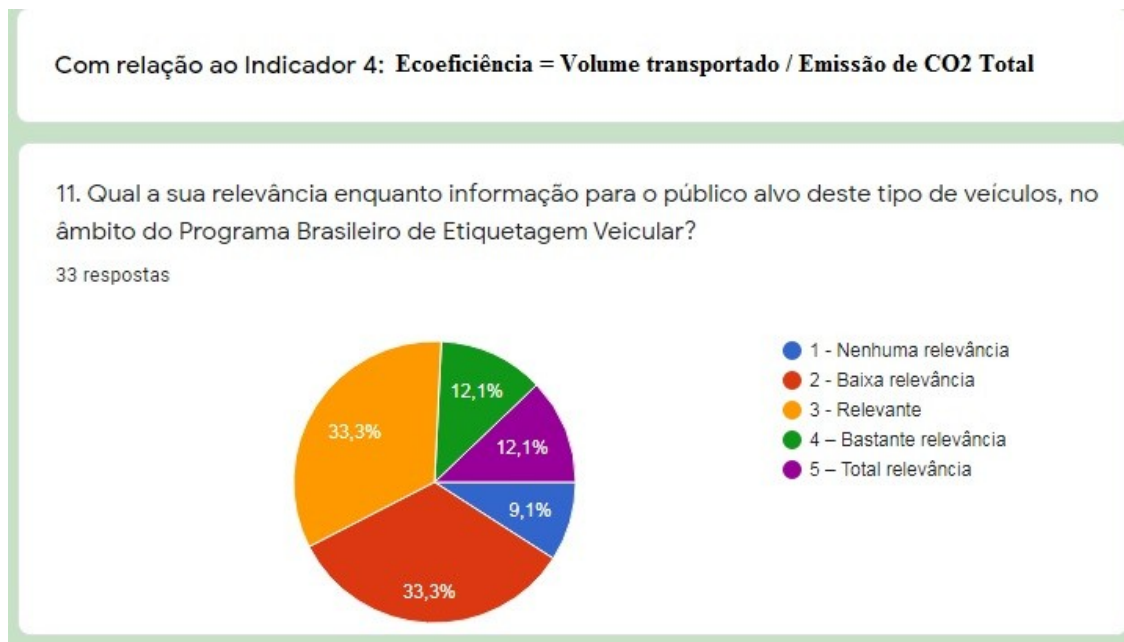


Gráfico 12 – Respostas dos entrevistados em relação à relevância do quarto indicador.
 Fonte: Formulário aplicado na pesquisa *survey* elaborado através do Google Forms (2019)

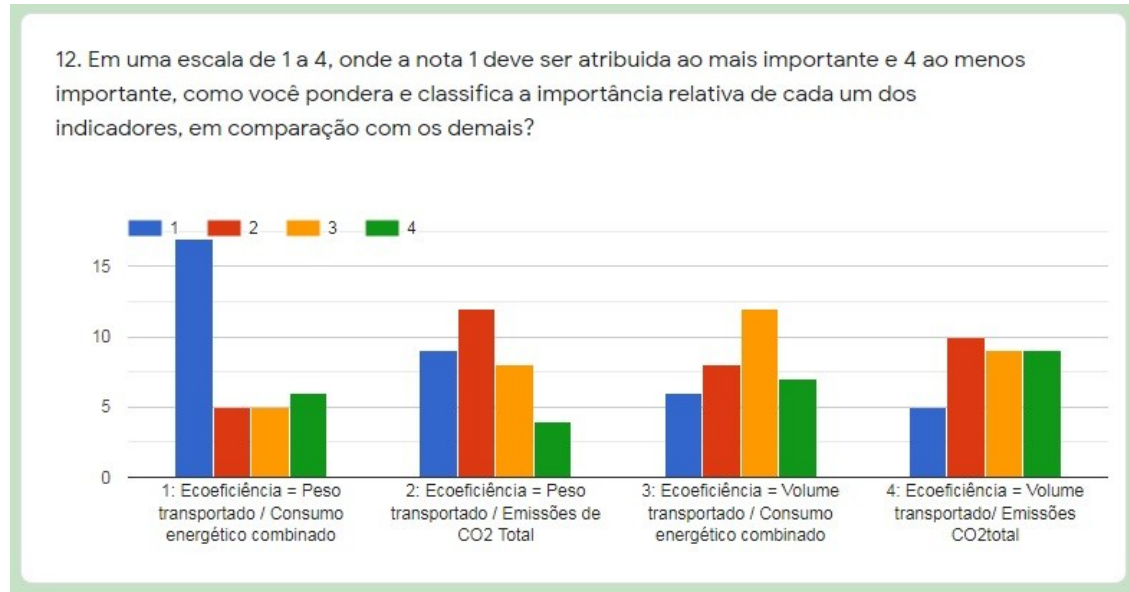


Gráfico 13 – Respostas dos entrevistados em relação à importância relativa entre os quatro indicadores propostos.

Fonte: Formulário aplicado na pesquisa *survey* elaborado através do Google Forms (2019)

Na última pergunta do questionário aplicado na *survey*, foi requisitado ao respondente se o mesmo gostaria de deixar registrada alguma outra proposta ou sugestão de indicadores que permitam avaliar, de forma consistente, a Ecoeficiência de um veículo. Esta foi uma pergunta do tipo aberta, na qual o entrevistado tinha a liberdade para descrever com suas palavras quaisquer sugestões, propostas, comentários ou críticas com relação à proposta dos indicadores apresentados.

Ao final da aplicação dos questionários, foram obtidas 33 respostas, transcritas no Apêndice 2, e que forneceram importantes insumos para uma análise crítica desta proposta, bem como para a projeção de novas propostas para pesquisas futuras, que serão apresentadas ao final da conclusão deste. Dentre os 33 respondentes, foram estratificados os seguintes perfis profissionais que participaram da pesquisa:

- 1 gestor de operações logísticas, do setor de serviços, com até 5 anos de experiência no setor,
- 1 diretor de operações logísticas, do setor de serviços, com 6 a 10 anos de experiência no setor,
- 1 diretor de operações logísticas, do setor de serviços, com 21 a 30 anos de experiência no setor,
- 1 técnico de laboratório de emissões e eficiência energética, da indústria, com 11 a 20 anos de experiência no tema,
- 1 engenheiro mecânico, que presta serviços de homologação de veículos, com 21 a 30 anos de experiência no setor,
- 1 engenheiro de produto, da indústria automotiva, com até 5 anos de experiência no setor,
- 2 engenheiros de produto, da indústria automotiva, com 6 a 10 anos de experiência no setor,

- 2 engenheiros de produto, da indústria automotiva, com 11 a 20 anos de experiência no setor,
- 1 consultor de produto, da indústria automotiva, com 11 a 20 anos de experiência no setor,
- 1 supervisor de homologação de veículos e assuntos regulatórios, da indústria automotiva, com 11 a 20 anos de experiência no setor,
- 1 engenheiro da indústria automotiva, com 6 a 10 anos de experiência no setor,
- 1 engenheiro da indústria automotiva, com 11 a 20 anos de experiência no setor,
- 1 engenheiro de assuntos regulatórios, da indústria automotiva, com até 5 anos de experiência,
- 1 engenheiro de homologação, da indústria automotiva, com 6 a 10 anos de experiência no setor,
- 1 engenheiro de homologação, da indústria automotiva, com 21 a 30 anos de experiência no setor,
- 1 coordenador de engenharia de produto, da indústria automotiva, com 21 a 30 anos de experiência,
- 1 coordenador da indústria automotiva, com até 5 anos de experiência no setor,
- 2 consultores de órgão do governo com mais de 30 anos de experiência no tema,
- 1 servidor analista ambiental, de órgão do governo, com 11 a 20 anos de experiência no tema,
- 1 servidor analista ambiental, de órgão do governo, com mais de 30 anos de experiência no tema,
- 1 gerente de órgão do governo, com 21 a 30 anos de experiência no tema,
- 1 gerente de órgão do governo, com mais de 30 anos de experiência no tema,
- 1 docente de ensino superior, com 1 a 5 anos de experiência na pesquisa/ensino em engenharia,
- 2 docentes de ensino superior, com 11 a 20 anos de experiência na pesquisa/ensino em engenharia,
- 1 docente de ensino superior, com 21 a 30 anos de experiência na pesquisa/ensino em engenharia,
- 1 docente de ensino superior e consultor, com mais de 30 anos de experiência na pesquisa/ensino em engenharia de transportes,
- 1 pesquisador do setor de transporte, energia e meio ambiente, com 6 a 10 anos de experiência no tema,
- 1 pesquisador, aluno de doutorado, com 1 a 5 anos de experiência em pesquisas no tema,
- 1 pesquisador, aluno de pós doutorado, com 6 a 10 anos de experiência em pesquisas no tema.

Os resultados obtidos a partir da *survey* foram fundamentais para se definir a ponderação dos indicadores pelos especialistas, no sentido de se conhecer a importância relativa dos mesmos para os decisores. Eles, porém, não interferiram nos valores dos pesos. As sugestões dos decisores foram utilizadas para iniciar o estudo do peso correto a ser atribuído a cada um dos critérios, conforme recomenda Gomes e Gomes (2014).

A Tabela 15 apresenta uma tabulação final dos percentuais de votos computados para os atributos de relevância, pertinência e importância para cada um dos indicadores, a partir das respostas dos especialistas aos questionários aplicados.

Tabela 15 – Tabulação final das respostas obtidas nos questionários, em percentual

| | Pertinência | | | | |
|-------------|-------------|----------|--------|-------|---------|
| | Total | Bastante | Neutro | Baixo | Nenhuma |
| Indicador 1 | 45,5% | 24,2% | 24,2% | 6,1% | 0,0% |
| Indicador 2 | 33,3% | 30,3% | 27,3% | 6,1% | 3,0% |
| Indicador 3 | 15,2% | 15,2% | 33,3% | 36,4% | 0,0% |
| Indicador 4 | 15,2% | 18,2% | 39,4% | 21,2% | 6,1% |
| | Relevância | | | | |
| | Total | Bastante | Neutro | Baixo | Nenhuma |
| Indicador 1 | 18,2% | 36,4% | 24,2% | 21,2% | 0,0% |
| Indicador 2 | 18,2% | 21,2% | 39,4% | 18,2% | 3,0% |
| Indicador 3 | 9,1% | 15,2% | 27,3% | 45,5% | 3,0% |
| Indicador 4 | 12,1% | 12,1% | 33,3% | 33,3% | 9,1% |
| | Importância | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | |
| Indicador 1 | 51,5% | 27,3% | 18,2% | 15,2% | |
| Indicador 2 | 15,2% | 36,4% | 24,2% | 30,3% | |
| Indicador 3 | 15,2% | 24,2% | 36,4% | 27,3% | |
| Indicador 4 | 18,2% | 12,1% | 21,2% | 27,3% | |

Fonte: elaborado pelo autor (2019)

Para os atributos “Pertinência” e “Relevância”, que foram avaliados segundo uma escala Likert de 1 a 5, calculando a soma das pontuações absolutas atribuídas pelos decisores para a cada indicador (I1, I2, I3 e I4), têm seu resultado apresentando na tabela 16, que explicita um panorama geral das preferências dos especialistas para os 4 indicadores segundo estes dois atributos.

Tabela 16 – Somatório das pontuações obtidas para os atributos Pertinência e Relevância

| Indicadores | Pertinencia | Relevancia |
|-------------|-------------|------------|
| I1 | 135 | 116 |
| I2 | 127 | 110 |
| I3 | 102 | 93 |
| I4 | 104 | 94 |

Fonte: elaborado pelo autor (2020)

A interpretação das respostas, a partir da Tabela 16, denotam que a pontuação atribuída ao indicador I1, para os atributos Pertinência e Relevância prevalece sobre o indicador I2, que prevalece sobre o indicador I4, que prevalece sobre o indicador I3, sendo este o menos pontuado: $I1 > I2 > I4 > I3$.

Para o atributo Importância, que foi avaliado segundo uma lógica de preferência de um indicador prevalecendo sobre cada um dos demais, comparativamente, gerando coeficientes invertidos, onde a nota 1 foi atribuída ao mais importante e 4 ao menos importante, foram contabilizadas o quantitativo de notas 1 a 4 atribuídas para cada indicador por cada um dos decisores, gerando o resultado apresentado na Tabela 17.

Tabela 17 – Tabulação das respostas obtidas para o atributo Importância

| Importancia | Nota 1 | Nota 2 | Nota 3 | Nota 4 |
|--------------------|--------|--------|--------|--------|
| I1 | 17 | 5 | 5 | 6 |
| I2 | 9 | 12 | 8 | 4 |
| I3 | 6 | 8 | 12 | 7 |
| I4 | 5 | 10 | 9 | 9 |

Fonte: elaborado pelo autor (2020)

A partir das respostas obtidas, e de acordo com os procedimentos descritos por Almeida (2013), para a aplicação do Método de Borda, há a possibilidade de se utilizar a parametrização, atribuindo pesos e ponderações a cada um dos indicadores, que entrarão na fórmula de cálculo do índice de Ecoeficiência. É possível, de forma direta, adotar uma variação do Método de Borda com a ponderação de critérios. Para isso basta que uma vez de posse do peso de cada um dos critérios, multiplicá-los pelo desempenho das alternativas (ALMEIDA, 2013).

Segundo um procedimento de Borda, para ordenação das alternativas pela adição de uma escala decrescente, as notas atribuídas pelos decisores aos indicadores foram transformadas em número de ordem para o ranqueamento ou ordenação final dos mesmos. A agregação consiste na soma dos pontos que cada alternativa obtém, sendo a primeira alternativa do *ranking*, chamada de “vencedor de Borda”, aquela com maior número de pontos, e assim por diante até a última alternativa com menor número de pontos (ALMEIDA *et al.*, 2012).

Foi adotado método de escala ordinal para a ponderação dos indicadores (*Ranking Methods*), conforme apresentado por Gomes e Gomes (2014), em alinhamento e similaridade ao método ordinal de Borda, aplicado para apoio à decisão.

Os resultados obtidos apontam que o indicador I1 foi pontuado pelos respondentes como melhor opção, seguido pelo indicador I2, seguido pelo indicador I4 e o indicador I3 foi considerado como opção de menor preferência, para apresentar os dados relativos à Ecoeficiência, conforme demonstrado na Tabela 18.

Tabela 18 – Ordenação das alternativas segundo a percepção de cada avaliador e agregação final pelo método de Borda

| Indicadores | Pertinência | Relevância | Importância | Nº de ordem global |
|-------------|-------------|------------|-------------|--------------------|
| I1 | 4 | 4 | 4 | 12 |
| I2 | 3 | 3 | 3 | 9 |
| I3 | 1 | 1 | 2 | 4 |
| I4 | 2 | 2 | 1 | 5 |

Fonte: elaborado pelo autor (2020)

Neste caso, o candidato vencedor pelo Método de Borda é aquele que tem mais pontos. Verifica-se na última coluna à direita da Tabela 18o número de ordem global obtido para cada um dos indicadores: I1 em primeiro (12 pontos), I2 em segundo (9 pontos), I4 em terceiro (5 pontos) e indicador I3 em último com 4 pontos.

Neste ponto, as quatro alternativas foram avaliadas em escala ordinal, segundo o procedimento *Ranking Methods*, para a atribuição ordinal de coeficientes, apresentado por Gomes e Gomes (2014) e descrito na Equação 3.

$$k_j = [n - r_j + 1] / [\sum (n - r_n + 1)], \text{ onde } j \text{ varia de } 1 \text{ até } 4. \quad (3)$$

onde:

k_j – coeficiente de Borda do critério j

n – número de critérios

r_j – classificação do critério dentro dos n critérios, representada pelo número j

r_n - indica o critério de menor importância

Assim, empregando os coeficientes do método de Borda invertido, foram obtidos os seguintes valores de ponderação:

- 0,4 para o primeiro
- 0,3 para o segundo
- 0,2 para o terceiro
- 0,1 para o quarto.

Assim, os coeficientes de Borda empregados foram $k_1 = 0,4$, $k_2 = 0,3$, $k_3 = 0,2$, $k_4 = 0,1$

Dessa maneira, a partir do critério de ponderação adotado, descrito na Equação 3, foram definidos os pesos para cada indicador distribuídos segundo a forma apresentada na Tabela 19.

Tabela 19 – Ponderação atribuída a cada indicador parcial de Ecoeficiência.

| Indicador (Unidade) | Descrição | Ponderação atribuída (k_n) |
|---------------------------------|---|---|
| I1 (kg/MJ/km) | Peso transportado/Consumo energético combinado | 0,4 |
| I2 (kg/g/km) | Peso transportado/Emissão de GEE em CO ₂ total | 0,3 |
| I4 (m³/g/km) | Volume transportado/Emissão de GEE em CO ₂ total | 0,2 |
| I3 (m³/MJ/km) | Volume transportado/Consumo energético combinado | 0,1 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Na Tabela 20 estão apresentados os cálculos realizados para obtenção dos valores absolutos para os quatro indicadores e a agregação por meio de uma soma ponderada destes, obtida utilizando-se da Equação 4 e gerando um indicador final de Ecoeficiência para cada uma das alternativas sob análise.

$$\Sigma_{in} = I1 \times K_1 + I2 \times K_2 + I4 \times K_3 + I3 \times K_4 \quad (4)$$

A partir da ponderação aplicada, as alternativas que obtiverem os maiores valores, na soma ponderada dos seus indicadores, são as consideradas com os melhores índices de Ecoeficiência dentro do universo de veículos avaliados nesta pesquisa.

Tabela 20 – Ponderação da soma dos indicadores parciais de Ecoeficiência.

| Alternativas de Veículos | | Indicador 1 Normalizado | Indicador 2 Normalizado | Indicador 3 Normalizado | Indicador 4 Normalizado | Soma Ponderada |
|---------------------------------|---------------|--|--|--|---|--|
| Marca | Modelo | Peso transportado / Consumo energético combinado | Peso transportado/ Emissão GEE CO ₂ Total | Volume transportado / Consumo energético combinado | Volume transportado / Emissão GEE CO ₂ Total | I1 = 40% I2 = 30% I4 = 20% I3 = 10% |
| A | 1 | 0,542577358 | 0,538308849 | 0,302681652 | 0,29988644 | 0,468769051 |
| A | 2 | 1 | 0,999922759 | 0,604945556 | 0,604086418 | 0,881274441 |
| B | 2 | 0,712545669 | 0,713529319 | 0,615384615 | 0,615384615 | 0,683692448 |
| B | 3 | 0,687208414 | 0,688157087 | 0,769230769 | 0,769230769 | 0,712099722 |
| B | 4 | 0,622572558 | 0,623432003 | 1 | 1 | 0,736058624 |
| B | 5 | 0,532437743 | 0,533398869 | 0,377755096 | 0,377915295 | 0,486353326 |
| B | 6 | 0,507709513 | 0,510068408 | 0,360210857 | 0,361385568 | 0,464402527 |
| B | 7 | 0,58268566 | 0,576220495 | 0,150002399 | 0,148133559 | 0,450567364 |
| B | 8 | 0,558583921 | 0,554391021 | 0,143797821 | 0,142521683 | 0,432634994 |
| B | 9 | 0,455561987 | 0,451941772 | 0,070898361 | 0,070237991 | 0,338944761 |

| | | | | | | |
|---|----|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| B | 10 | 0,454737014 | 0,45392958 | 0,08534026 | 0,085071291 | 0,343621964 |
| B | 11 | 0,425620917 | 0,419896264 | 0,798760573 | 0,786930808 | 0,533479465 |
| B | 12 | 0,619355135 | 0,622818251 | 0,755521374 | 0,7586985 | 0,661879367 |
| C | 1 | 0,635210548 | 0,634482684 | 0,143993055 | 0,143629782 | 0,487554286 |
| C | 2 | 0,614153349 | 0,610951775 | 0,139219692 | 0,138303018 | 0,470529445 |
| C | 3 | 0,581008907 | 0,586817445 | 0,138870268 | 0,140065244 | 0,450348872 |
| C | 4 | 0,605699624 | 0,608095361 | 0,084304895 | 0,084521669 | 0,450043281 |
| C | 5 | 0,591812331 | 0,59415314 | 0,084304895 | 0,084521669 | 0,440305698 |
| C | 6 | 0,617857063 | 0,620553676 | 0,086916795 | 0,087175796 | 0,459435767 |
| C | 7 | 0,598468004 | 0,600688142 | 0,083298355 | 0,083492109 | 0,444621902 |
| C | 8 | 0,698829839 | 0,700395729 | 0,133784076 | 0,133899006 | 0,529808863 |
| C | 9 | 0,560157648 | 0,566941955 | 0,139625098 | 0,141121343 | 0,436332424 |
| C | 10 | 0,591541429 | 0,598230581 | 0,089005782 | 0,089888172 | 0,442963958 |
| C | 11 | 0,538383285 | 0,539583856 | 0,090400797 | 0,090477485 | 0,404364048 |
| C | 12 | 0,454548167 | 0,455492264 | 0,085511888 | 0,085571367 | 0,344132408 |
| C | 14 | 0,644886912 | 0,648438675 | 0,123457235 | 0,123966053 | 0,489625301 |
| C | 15 | 0,62336381 | 0,626084458 | 0,086916795 | 0,087175796 | 0,4632977 |
| C | 16 | 0,584746516 | 0,586915751 | 0,083298355 | 0,083492109 | 0,435001589 |
| C | 17 | 0,553609292 | 0,555663017 | 0,083298355 | 0,083492109 | 0,413170879 |
| C | 18 | 0,560157648 | 0,566941955 | 0,139625098 | 0,141121343 | 0,436332424 |
| C | 19 | 0,5470056 | 0,553630618 | 0,139625098 | 0,141121343 | 0,427078204 |
| C | 20 | 0,463512962 | 0,471493577 | 0,132505114 | 0,134600731 | 0,367023915 |
| C | 21 | 0,524064581 | 0,525233222 | 0,090400797 | 0,090477485 | 0,394331375 |
| C | 22 | 0,442087371 | 0,443005587 | 0,085511888 | 0,085571367 | 0,335402087 |
| D | 1 | 0,558059776 | 0,560638318 | 0,708692878 | 0,710985931 | 0,60448188 |
| D | 2 | 0,798443772 | 0,802256352 | 0,581771792 | 0,583743917 | 0,734980377 |
| E | 1 | 0,497457669 | 0,491212314 | 0,068895243 | 0,06793651 | 0,366823588 |
| E | 2 | 0,48468187 | 0,47859691 | 0,068895243 | 0,06793651 | 0,357928647 |
| E | 3 | 0,472478383 | 0,467679964 | 0,067160575 | 0,066386857 | 0,349288771 |
| E | 4 | 0,501838388 | 0,500844074 | 0,088381509 | 0,088084796 | 0,377443688 |
| E | 5 | 0,569502848 | 0,561934245 | 0,109946406 | 0,108335681 | 0,42904319 |
| E | 6 | 0,571902439 | 0,564301945 | 0,109946406 | 0,108335681 | 0,430713336 |
| E | 7 | 0,561127271 | 0,563215354 | 0,093479908 | 0,09369842 | 0,421503189 |
| E | 8 | 0,528076931 | 0,530065101 | 0,087973951 | 0,088183431 | 0,396684384 |
| E | 9 | 0,523918845 | 0,52589136 | 0,087973951 | 0,088183431 | 0,393769027 |
| E | 10 | 0,469863726 | 0,471632727 | 0,087973951 | 0,088183431 | 0,35586939 |
| E | 11 | 0,555188409 | 0,557397365 | 0,087009614 | 0,087235378 | 0,41544261 |
| E | 12 | 0,501784899 | 0,504189432 | 0,086468602 | 0,086763182 | 0,377970286 |
| F | 1 | 0,651590208 | 0,647008518 | 0,088120109 | 0,087379862 | 0,481026622 |
| F | 2 | 0,649274564 | 0,650215106 | 0,087806945 | 0,087812919 | 0,481117636 |
| F | 3 | 0,628419965 | 0,629567635 | 0,10757623 | 0,107624122 | 0,472520724 |
| F | 4 | 0,679904183 | 0,682910803 | 0,101488202 | 0,101796468 | 0,507343028 |
| F | 5 | 0,555166444 | 0,557501805 | 0,089901946 | 0,09015567 | 0,416338448 |
| F | 6 | 0,612973131 | 0,6159216 | 0,095137996 | 0,095463835 | 0,458572299 |

| | | | | | | |
|---|----|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| F | 7 | 0,59833982 | 0,601217901 | 0,095137996 | 0,095463835 | 0,448307865 |
| F | 8 | 0,51541038 | 0,51783733 | 0,089667934 | 0,089965964 | 0,388475337 |
| F | 9 | 0,564216564 | 0,567081078 | 0,094415981 | 0,094764509 | 0,424205449 |
| F | 10 | 0,689761922 | 0,692986053 | 0,118077068 | 0,118465453 | 0,519301382 |
| F | 11 | 0,496447783 | 0,498904598 | 0,085689536 | 0,085994882 | 0,374018422 |
| G | 1 | 0,542577358 | 0,538308849 | 0,302681652 | 0,29988644 | 0,468769051 |
| G | 2 | 1 | 1 | 0,604967072 | 0,604133082 | 0,881323324 |
| H | 1 | 0,594045177 | 0,587195272 | 0,30930054 | 0,305312536 | 0,505769214 |
| H | 2 | 0,59866879 | 0,601410082 | 0,807935964 | 0,81051659 | 0,662787455 |
| H | 3 | 0,642952734 | 0,645896802 | 0,683638123 | 0,68582173 | 0,656478292 |
| H | 4 | 0,706788269 | 0,709991276 | 0,528027698 | 0,52968938 | 0,654453336 |
| H | 6 | 0,465892169 | 0,462908045 | 0,07282591 | 0,072259694 | 0,346963811 |
| H | 7 | 0,40935799 | 0,40893001 | 0,063988773 | 0,063833752 | 0,305587827 |
| H | 8 | 0,502755168 | 0,500113382 | 0,078588147 | 0,078067427 | 0,374608382 |
| H | 9 | 0,525959253 | 0,523195538 | 0,078588147 | 0,078067427 | 0,390814663 |
| I | 1 | 0,554929682 | 0,557418051 | 0,057786868 | 0,05796597 | 0,406569169 |
| J | 1 | 0,269445364 | 0,266978694 | 0,274857172 | 0,271965517 | 0,269750575 |
| L | 1 | 0,408769609 | 0,404327452 | 0,077299006 | 0,076353582 | 0,307806696 |
| L | 2 | 0,418800765 | 0,414249598 | 0,077299006 | 0,076353582 | 0,314795802 |
| L | 3 | 0,416292976 | 0,411769062 | 0,077299006 | 0,076353582 | 0,313048526 |
| L | 4 | 0,538814238 | 0,540501827 | 0,080155296 | 0,0802955 | 0,401750873 |
| L | 5 | 0,552284594 | 0,554014372 | 0,080155296 | 0,0802955 | 0,411192779 |
| L | 6 | 0,573605308 | 0,575675638 | 0,132179236 | 0,132473438 | 0,441857426 |
| L | 8 | 0,582040681 | 0,584141456 | 0,083657744 | 0,083843948 | 0,433193273 |
| L | 9 | 0,417009646 | 0,411416324 | 0,074730961 | 0,073626959 | 0,312427243 |
| M | 1 | 0,66674914 | 0,663274363 | 0,097864703 | 0,097220468 | 0,494912529 |
| M | 2 | 0,632483845 | 0,628599149 | 0,091959476 | 0,09126867 | 0,469022964 |
| N | 1 | 0,523810841 | 0,526064668 | 0,082131216 | 0,082370896 | 0,392031038 |
| N | 2 | 0,550001384 | 0,552367902 | 0,082131216 | 0,082370896 | 0,410398225 |
| N | 3 | 0,566750922 | 0,569721572 | 0,085446183 | 0,085775642 | 0,423316587 |
| N | 4 | 0,55857663 | 0,561504434 | 0,085446183 | 0,085775642 | 0,417581729 |
| N | 5 | 0,543997377 | 0,546879355 | 0,084872015 | 0,085204027 | 0,407190764 |
| N | 6 | 0,586512069 | 0,58961159 | 0,088425472 | 0,088770226 | 0,438084897 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

4.10 Interpretação

A fase de interpretação da avaliação de Ecoeficiência compreende a identificação de questões significativas baseadas nos resultados das fases de avaliação ambiental e do valor do sistema de produto, considerando aspectos de completude, sensibilidade e consistência para a formulação de conclusões, declaração de limitações da avaliação e recomendações.

A Tabela 21 traz o resultado do cálculo dos indicadores ponderados, para cada alternativa de veículo de carga, apresentados sob forma ordenada, estando no topo da tabela a alternativa que obteve o melhor resultado no campo do indicador de Ecoeficiência, sendo seus valores obtidos destacados na cor verde mais escura.

A Tabela 21 segue em escala dégradé, em tons de verde decrescendo para o cinza, rosado, até o menor resultado de Ecoeficiência obtido neste estudo, destacado em vermelho escuro na linha inferior da mesma.

Tabela 21 – Ordenação decrescente das alternativas de veículos leves para transporte de cargas, segundo seus índices de Ecoeficiência, calculados por soma ponderada.

| Ordem | Alternativas de Veículos | | Soma Ponderada |
|-------|--------------------------|--------|--|
| | Marca | Modelo | I1 = 40% I2 = 30% I4 = 20% I3 = 10% |
| 1º | G | 2 | 0,881323324 |
| 2º | A | 2 | 0,881274441 |
| 3º | B | 4 | 0,736058624 |
| 4º | D | 2 | 0,734980377 |
| 5º | B | 3 | 0,712099722 |
| 6º | B | 2 | 0,683692448 |
| 7º | H | 2 | 0,662787455 |
| 8º | B | 12 | 0,661879367 |
| 9º | H | 3 | 0,656478292 |
| 10º | H | 4 | 0,654453336 |
| 11º | D | 1 | 0,60448188 |
| 12º | B | 11 | 0,533479465 |
| 13º | C | 8 | 0,529808863 |
| 14º | F | 10 | 0,519301382 |
| 15º | F | 4 | 0,507343028 |
| 16º | H | 1 | 0,505769214 |
| 17º | M | 1 | 0,494912529 |
| 18º | C | 14 | 0,489625301 |
| 19º | C | 1 | 0,487554286 |
| 20º | B | 5 | 0,486353326 |
| 21º | F | 2 | 0,481117636 |
| 22º | F | 1 | 0,481026622 |
| 23º | F | 3 | 0,472520724 |
| 24º | C | 2 | 0,470529445 |
| 25º | M | 2 | 0,469022964 |
| 26º | A | 1 | 0,468769051 |
| 27º | G | 1 | 0,468769051 |
| 28º | B | 6 | 0,464402527 |
| 29º | C | 15 | 0,4632977 |
| 30º | C | 6 | 0,459435767 |
| 31º | F | 6 | 0,458572299 |
| 32º | B | 7 | 0,450567364 |
| 33º | C | 3 | 0,450348872 |
| 34º | C | 4 | 0,450043281 |
| 35º | F | 7 | 0,448307865 |
| 36º | C | 7 | 0,444621902 |
| 37º | C | 10 | 0,442963958 |
| 38º | L | 6 | 0,441857426 |
| 39º | C | 5 | 0,440305698 |
| 40º | N | 6 | 0,438084897 |
| 41º | C | 9 | 0,436332424 |
| 42º | C | 18 | 0,436332424 |
| 43º | C | 16 | 0,435001589 |
| 44º | L | 8 | 0,433193273 |
| 45º | B | 8 | 0,432634994 |
| 46º | E | 6 | 0,430713336 |
| 47º | E | 5 | 0,42904319 |
| 48º | C | 19 | 0,427078204 |
| 49º | F | 9 | 0,424205449 |
| 50º | N | 3 | 0,423316587 |
| 51º | E | 7 | 0,421503189 |
| 52º | N | 4 | 0,417581729 |
| 53º | F | 5 | 0,416338448 |
| 54º | E | 11 | 0,41544261 |
| 55º | C | 17 | 0,413170879 |
| 56º | L | 5 | 0,411192779 |

| | | | |
|---------------------------------|---|----|--------------------|
| 57º | N | 2 | 0,410398225 |
| 58º | N | 5 | 0,407190764 |
| 59º | I | 1 | 0,406569169 |
| 60º | C | 11 | 0,404364048 |
| 61º | L | 4 | 0,401750873 |
| 62º | E | 8 | 0,396684384 |
| 63º | C | 21 | 0,394331375 |
| 64º | E | 9 | 0,393769027 |
| 65º | N | 1 | 0,392031038 |
| 66º | H | 9 | 0,390814663 |
| 67º | F | 8 | 0,388475337 |
| 68º | E | 12 | 0,377970286 |
| 69º | E | 4 | 0,377443688 |
| 70º | H | 8 | 0,374608382 |
| 71º | F | 11 | 0,374018422 |
| 72º | C | 20 | 0,367023915 |
| 73º | E | 1 | 0,366823588 |
| 74º | E | 2 | 0,357928647 |
| 75º | E | 10 | 0,35586939 |
| 76º | E | 3 | 0,349288771 |
| 77º | H | 6 | 0,346963811 |
| 78º | C | 12 | 0,344132408 |
| 79º | B | 10 | 0,343621964 |
| 80º | B | 9 | 0,338944761 |
| 81º | C | 22 | 0,335402087 |
| 82º | L | 2 | 0,314795802 |
| 83º | L | 3 | 0,313048526 |
| 84º | L | 9 | 0,312427243 |
| 85º | L | 1 | 0,307806696 |
| 86º | H | 7 | 0,305587827 |
| 87º | J | 1 | 0,269750575 |
| Média (μ) | | | 0,455300443 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

4.11 Análise de Sensibilidade

Antes de se concluir esta etapa, é importante a realização de um procedimento de análise de sensibilidade e incerteza, segundo previsto na metodologia da norma ISO 14045 (ABNT, 2014). Uma vez obtida a solução ótima, devem ser feitas variações em alguns parâmetros a fim de se analisar o comportamento e a estabilidade do modelo proposto. Além de colaborar na verificação de possíveis divergências nos resultados encontrados, a análise de sensibilidade ajuda a determinar como as mudanças nos pesos, por via de outros distintos procedimentos possíveis para a ponderação dos indicadores de Ecoeficiência podem afetar os resultados obtidos até então.

Uma análise de sensibilidade tem por objetivo verificar a velocidade com que uma solução se degrada, avaliando se a mesma apresenta estabilidade forte, ou seja, se o conjunto de soluções não dominadas não se altera após a realização da análise de sensibilidade (GOMES E GOMES, 2014).

Crick *et al.* (1987) consideram como importante os parâmetros cuja incerteza contribui substancialmente para a incerteza dos resultados e denomina de sensíveis aqueles que influenciam significativamente nos resultados obtidos. Foram adotadas duas métricas para a análise de sensibilidade dos resultados apresentados na Tabela 21, segundo os procedimentos descritos por Gomes e Gomes (2014).

O primeiro procedimento consistiu em dois testes através de uma variação positiva de 10% e, logo após, negativa de 10% para a ponderação do indicador de maior peso (I1), por ser o indicador que denota maior sensibilidade e influência nos resultados. Os demais indicadores foram normalizados proporcionalmente, para atingirem soma 1.

Assim, os indicadores parciais receberam os seguintes coeficientes de ponderação para a variação positiva de 10% do indicador I1: $k_1 = 0,423$, $k_2 = 0,288$, $k_3 = 0,192$, $k_4 = 0,096$; e os seguintes coeficientes para a variação negativa de 10% no indicador I1: $k_1 = 0,375$, $k_2 = 0,3125$, $k_3 = 0,208$, $k_4 = 0,104$.

No segundo procedimento foi empregada uma variação de 15%, tanto positiva, quanto negativamente para o indicador de maior peso (I1), e os demais indicadores normalizados para atingirem soma 1.

Nesta simulação, os indicadores parciais receberam os seguintes coeficientes de ponderação para a variação positiva de 15% do indicador I1: $k_1 = 0,433$, $k_2 = 0,283$, $k_3 =$

0,189, $k_4 = 0,094$; e os seguintes coeficientes para a variação negativa de 15% de I1: $k_1 = 0,362$, $k_2 = 0,319$, $k_3 = 0,212$, $k_4 = 0,106$.

A análise de sensibilidade demonstrou que as ponderações atribuídas aos indicadores, por meio do método *Ranking Methods*, têm estabilidade, são coerentes e assertivas, pois trouxeram resultados bastante semelhantes em ambas as métricas, com poucas trocas de posições entre alternativas consecutivas no *ranking* do indicador final.

Deve-se destacar que a análise de sensibilidade da ponderação dos indicadores não é fator determinante para a validação do modelo aqui apresentado, mas se faz fundamental para balizar os aperfeiçoamentos futuros a serem feitos neste modelo proposto ou nas pesquisas sobre o tema.

4.12 Análise e Discussão dos Resultados

Nesta etapa, será feita uma análise crítica dos resultados encontrados a partir da sistemática desenvolvida nesta pesquisa e do modelo de AEE nela aplicado. Considerando que esta pesquisa avaliou segundo os mesmos parâmetros os veículos para transporte de carga dos tipos comercial, picapes grandes e picapes compactas, que utilizam motores movidos a Diesel, ou bicompostíveis do ciclo Otto, é crucial que para as conclusões deste estudo, seja procedida a análise e a correta interpretação dos resultados encontrados.

A avaliação da Ecoeficiência através dos indicadores propostos se mostrou viável e o cálculo dos mesmos através do modelo desenvolvido nesta Tese se mostrou factível, gerando resultados coerentes e bastante significativos para esta etapa de análise.

Além dos parâmetros utilizados para os cálculos na etapa anterior desta pesquisa, é fundamental que sejam analisadas outras características técnicas qualitativas de cada veículo, como a capacidade cúbica e potência do seu motor, o tipo de combustível e o tipo transmissão que utilizam, as dimensões da carroceria que comportam suas cargas, bem como o grau de atualização tecnológica de seus motores. Esta análise qualitativa permite embasar e justificar os dados quantitativos encontrados por meio dos cálculos aplicados segundo a metodologia proposta, considerando os preceitos da teoria de sistemas e da complexidade dinâmica já vistos no segundo capítulo desta pesquisa.

Nos parágrafos a seguir será decorrida uma breve análise e uma interpretação qualitativa dos resultados obtidos para os 20 modelos melhor posicionados no ranking final da Ecoeficiência, a fim de se verificar a coerência destes resultados diante das demais qualidades técnicas peculiares de cada alternativa, em relação aos concorrentes.

Os veículos A2 e G2 que ocupam as duas primeiras melhor posições no ranking, são ambos veículos comerciais do tipo furgão, equipados com motores Diesel, de concepção moderna, reduzida capacidade cúbica (1,6 litro), turbo alimentados com baixo nível de emissões (A) e alta eficiência energética para sua categoria (2,27MJ), identificados pela letra A no ranking atualmente vigente no PBEV. Ganham destaque no campo desta pesquisa em virtude principalmente do seu alto desempenho energético e reduzidos impactos ocasionados pelas emissões de seus motores, além da ampla capacidade de carga em peso (1500 kg e 6,1m³). Assim, ambos puderam ser classificados na classe superior (verde escuro) na escala de Ecoeficiência proposta na Tabela 21.

Os veículos da marca B, modelos B4, B3 e B2 que ocupam as terceira, quarta e sexta posições, são também comerciais, do tipo furgão de carga fechado, equipados com motor a Diesel (2,3 litro), que apresentam índices que os classificam como B tanto para emissões, como para consumo (2,92MJ) na atual metodologia do PBEV. Porém, eles se destacam no índice de Ecoeficiência, devido à sua ampla capacidade de carga em peso e volume acima da média do segmento, diferenciando-se entre si devido ao comprimento do chassi e à respectiva capacidade de carga de cada versão, sendo B2 o menor e B4 o maior dos três.

Tal resultado demonstra que uma capacidade de carga maior ganhará destaque na avaliação da Ecoeficiência, por otimizar o benefício econômico desta alternativa, em detrimento de um desempenho ambiental aquém dos níveis considerados como os ideais na atualidade, comprovando a importância da avaliação adicional do aspecto econômico neste comparativo.

O veículo D2, furgão comercial que ocupa a quarta posição do *ranking*, é produzido por outra empresa que também utiliza um motor Diesel turbo alimentado de 1,6 litro e concepção moderna, alcançando classificação de eficiência A (2,32MJ). Apesar do seu alto índice de emissões (E), o resultado obtido no indicador de Ecoeficiência vem a endossar o conjunto dos veículos movidos a Diesel que alcançam

os melhores índices de Ecoeficiência, justificando a tendência do *downsizing* na capacidade cúbica destes motores e reiterando a viabilidade econômica que ainda se encontra no uso deste combustível para o transporte de cargas. Nas análises de sensibilidade realizadas na etapa anterior, este veículo troca de posição com a alternativa B4, quando o indicador I1 é sofre ponderações de +10% e + 15%, ratificando a preponderância do fator consumo energética, quando seu peso é majorado.

Os veículos H2, H3 e H4, que ocupam as posições sétima, nona e décima na sequência obtida, representam a mesma marca/modelo de furgão comercial, com diferentes comprimentos de chassi e diferentes cubagens no seu compartimento de carga. Porém, todos utilizam o mesmo motor Diesel de 2.3 litros obtendo melhor posição no ranking devido à sua elevada capacidade de carga nominal, pois apresentam índices de emissões B, e um alto consumo energético que os classifica em D (3,41MJ e 3,62MJ) na tabela em vigor no momento da realização desta pesquisa. H3 e H4 alternam de posição entre si quando, na análise de sensibilidade, o indicador I1 ganha pesos 10 e 15% maiores.

Evidencia-se aqui, novamente, os pontos positivos que a Avaliação da Ecoeficiência proporciona, pois a metodologia desenvolvida neste trabalho destaca o esperado benefício econômico proporcionado pela ampla capacidade de carga das três alternativas da marca H, porém os colocando em posição inferior no *ranking* com os veículos concorrentes B2, B3 e B4, que apresentam capacidade de carga volumétrica similar, porém com melhor desempenho em consumo energético (2,92MJ).

O veículo B12, na oitava posição do *ranking*, é do tipo picape, com cabine dupla, que apesar da sua baixa capacidade volumétrica de carga, em relação às demais picapes do segmento, vem equipado com um motor Diesel, que ostenta índice B em eficiência energética (2,44MJ) e índice B em emissões. Porém há de se notar a importante contribuição feita no consumo energético deste modelo por ser equipado com uma transmissão de 9 marchas, que confere ampla vantagem em relação às demais picapes do segmento.

Na décima primeira posição, o veículo da marca/modelo D1, equipado com um motor Diesel maior e menos eficiente em consumo (3,33MJ) do que o seu par D2. Porém, o modelo D1 apresenta um vantajoso volume útil disponível para cargas (10,5m³) maior do que o do quarto colocado (6,0m³), mas que apesar do esperado

benefício econômico, não é suficiente para superar o D2 nos critérios ambientais da Ecoeficiência.

O veículo B11, ocupante da décima segunda posição é uma picape da mesma linha do modelo B12, porém equipado com um motor bicomcombustível ciclo Otto, de 1,8 litro e transmissão de 6 marchas. Apesar da sua capacidade de carga em peso ser 350 kg menor que a do modelo similar a Diesel, sua capacidade volumétrica é idêntica (8,2m³) e esta versão traz um motor mais eficiente que lhe proporciona um destacado consumo energético de 2,16MJ, classificando seu consumo como A, superior, neste caso ao modelo B12 a Diesel. Porém, na análise de sensibilidade dos indicadores, B11 cai para 14^a posição quando a importância da razão entre o peso transportado e o consumo energético combinado é majorada em 15%, evidenciando que sua menor capacidade de carga pode reduzir a sua vantagem em ecoeficiência quando os decisores considerarem uma maior importância a ser atribuída a este parâmetro.

Importante salientar ainda que, dentre todos os veículos providos com motor bicomcombustível do ciclo Otto, o modelo B11 é o que obteve melhor posição no ranking de Ecoeficiência, apesar de ficar inferiormente aos 11 outros modelos movidos a Diesel. Seu destaque em Ecoeficiência, em relação aos demais modelos a gasolina e etanol, se dá pela sua alta eficiência energética no grupo e pelos baixos níveis de emissões de CO₂.

Na décima terceira posição do *ranking* ficou a alternativa C8, um veículo do tipo picape com cabine simples, motor bicomcombustível de 2,5 litros e transmissão manual de 6 marchas. Seu motor pode ser considerado referência nos parâmetros ambientais de consumo (2,64MJ), ostentando destacados índices B e A para emissões. Além disso, esta picape traz vantagem na sua capacidade de carga em peso, em relação às demais alternativas, conferindo-lhe certa proficiência no aspecto da utilidade econômica.

Nas posições décima quarta e décima quinta da tabela, localizam-se duas versões do mesmo modelo (F10 e F4), sendo ambas providas com motor Diesel e índices de emissões equivalentes, classificados em B. Porém, o modelo F4 possui sistema de tração integral, fato que lhe reduz a capacidade de carga em termos volumétricos e de massa, para acondicionamento do sistema de transmissão nas 4 rodas, deixando-a em pequena desvantagem de benefício econômico em relação ao seu par F10.

Na décima sexta posição, o veículo H1, um pequeno furgão comercial com motor bicomcombustível tem destaque pela sua capacidade carga (800 kg e 2,8m³) e pela alta eficiência energética (2,04MJ), tendo obtido classificação A em sua categoria, apesar dos índices B de emissões.

Em décimo sétimo lugar no ranking, a Picape M1 fornida de um motor Diesel de 2,4 litros turbo alimentado mostra realce na sua classificação A de eficiência energética (2,38MJ), mas que lhe proporciona uma colocação modesta em Ecoeficiência devido a sua capacidade de carga aquém de alguns concorrentes.

A décima oitava posição ficou ocupada pela picape C14, versão do modelo C8, mas fornecida com motor Diesel. Apesar de terem mesmas capacidades de carga em peso e volume, C14 mostra desvantagem pelo seu consumo energético de 2,86MJ, ostentando índices C para ambos os critérios ambientais, o que prejudica seu indicador de Ecoeficiência e, mais uma vez, evidencia a utilidade deste índice para uma equilibrada comparação entre os aspectos ambiental e econômico dos veículos para o transporte de cargas.

Na décima nona posição, a picape compacta C1, que obteve o melhor índice de Ecoeficiência na sua categoria, destaca-se das demais alternativas compactas, por apresentar a maior capacidade de carga em peso (756 kg) da categoria e o menor consumo energético de todas as alternativas avaliadas neste estudo (1,80MJ).

Na vigésima colocação ficou o modelo B5, um furgão comercial de dimensões compactas, derivado de veículo de passeio, concorrente direto do modelo H1. Apesar da sua reduzida capacidade de carga (650kg e 3,1m³), transportando portanto 150kg a menos que a alternativa H1, o que lhe custou 4 posições no *ranking*, a alternativa B5 ainda mereceu seu destaque em Ecoeficiência, devido ao segundo menor índice de consumo energético (1,85MJ) dentre todas alternativas avaliadas, mantendo ainda assim suas emissões na classe B.

Há de se dar destaque aqui que a alternativa B5 muda sua posição no ranking em duas situações distintas observadas na análise de sensibilidade. Quando o peso do indicador I1 é majorado em 15%, B5 cai para 22º lugar no *ranking*, e quando o peso deste indicador é reduzido em 15%, o veículo B5 galga para a 18ª posição no *ranking*, evidenciando que, apesar do reduzido consumo energético, a sua limitada capacidade de

carga (650kg) é um critério decisivo sob o aspecto econômico, quando este for priorizado de distintas maneiras por diferentes decisores.

Antes de concluir esta etapa de análise e discussão dos resultados, é crucial relembrar que o modelo empregado nesta pesquisa, para o cálculo dos indicadores de Ecoeficiência, priorizou o aspecto econômico do peso transportado e o aspecto ambiental do consumo energético como sendo mais importantes, relevantes e pertinentes do que o volume transportado e as emissões para a escolha dos veículos. Ou seja, as alternativas de veículos para o transporte de carga classificadas na Tabela 21 atendem ao resultado obtido na pesquisa *survey* entre os especialistas na área que, pelo método empregado para agregar o julgamento dos vários decisores, priorizaram o desempenho energético e a capacidade de carga em peso, em detrimento das emissões e do volume de carga a ser transportado.

Contudo, distintas possibilidades de cálculo dos indicadores de Ecoeficiência podem ser aplicadas utilizando-se o modelo construído para esta pesquisa, de modo a conferir outras prioridades para os demais aspectos ambientais e econômicos, que podem surgir diante de novos contextos de aplicação ou de cenários socioeconômicos distintos com outros fatores que venham a ser preponderantes.

Além disso, a introdução eminente de veículos elétricos e híbridos no leque de opções para transporte de carga também poderá conferir um novo contexto inédito, que ampliaria a escala de resultados de Ecoeficiência, posicionando estes modelos nas primeiras posições do *ranking*. Deste modo, evidencia-se que a metodologia aqui empregada é dinâmica e versátil, podendo ser modelada adequadamente para se alinhar com realidades distintas das existentes no momento no qual esta pesquisa foi elaborada.

4.13 Relato e Divulgação dos Resultados

Os resultados obtidos neste trabalho demonstram coerência e atendem aos propósitos esperados na etapa de planejamento inicial desta pesquisa. De posse dos resultados em mãos, é crucial definir, a partir desse momento, formas adequadas de divulgação dos mesmos para a propagação do conhecimento útil gerado e para a disseminação da metodologia desenvolvida, para que a mesma possa ser replicada futuramente.

Assim, em conformidade com o objetivo proposto inicialmente, os resultados da avaliação da Ecoeficiência aqui obtidos poderão ser relatados ao seu público-alvo de forma completa, precisa e imparcial, por intermédio da sua divulgação enquanto informação complementar na Etiqueta Nacional de Conservação de Energia, principal meio de comunicação das montadoras e órgãos de governo que coordenam e executam o PBEV para com os consumidores. Para este fim, foi elaborada uma nova proposta gráfica para a ENCE, incorporando os novos dados, apresentada na Figura 7.



Figura 7 – Proposta de nova etiqueta incorporando o indicador de Ecoeficiência e as capacidades de carga para veículos utilitários.

Fonte: elaborado pelo autor (2020)

A Figura 7 contém uma proposta de redesenho da Etiqueta, incluindo as informações referentes aos dados do indicador de Ecoeficiência, bem como as capacidades de realização de trabalho dos veículos voltados para o transporte de carga, contemplando os aspectos ambientais ao lado dos aspectos econômicos, conforme os objetivos propostos e as diretrizes desenvolvidas nesta pesquisa.

A aposição das novas informações na ENCE deve perpassar por uma classificação dos resultados da avaliação da Ecoeficiência de cada uma das alternativas de veículos para transporte de carga, de modo a lhes conferir classes elencadas por letras de A até E, indicando as respectivas faixas de classificação da Ecoeficiência para os 87 modelos avaliados e permitindo assim uma clara, evidente e inequívoca comparação entre eles.

Uma possível proposta para as faixas de classificação é apresentada na Tabela 22, contendo ainda a estimativa da distribuição dos modelos de veículos em cada uma das faixas de classificação, conforme cálculos efetuados considerando-se a equidistância entre os limites de cada faixa para os resultados encontrados na Tabela 21.

Tabela 22 - Proposta de faixas para a classificação dos veículos segundo critérios de Ecoeficiência a partir da ponderação dos quatro indicadores.

| Critério para classificação dos veículos | | | | |
|---|-----------------------------------|---------------|-----------------------|------------------|
| Classes | Indicador de Ecoeficiência | | | |
| | Mínimo | Máximo | Quant. Modelos | % Modelos |
| A | 0,759 | 0,881 | 2 | 2,30% |
| B | 0,636 | 0,758 | 8 | 9,20% |
| C | 0,515 | 0,635 | 4 | 4,60% |
| D | 0,393 | 0,514 | 50 | 57,47% |
| E | 0,269 | 0,392 | 23 | 26,44% |

Fonte: elaborado pelo autor (2020)

A proposta da Tabela 22, baseada na equidistância entre os limites de cada classe, evidencia mais um aspecto importante a ser devidamente tratado e analisado antes da conclusão deste estudo. Pode-se notar uma alta concentração de alternativas (83,9%) dos modelos que obtiveram indicadores de Ecoeficiência nas classes inferiores D e E, ao passo que é notória a dispersão de poucas alternativas (16,1%) dos modelos nas classes superiores A, B e C, com os melhores valores alcançados para os indicadores de Ecoeficiência.

Sendo adotado desta forma, este critério se por um lado evidencia o baixo desempenho da maior parte das alternativas segundo o indicador de Ecoeficiência, por outro lado, pode se converter em uma estratégia de importante incentivo para as

montadoras de automóveis buscarem a melhoria do desempenho de seus veículos nos atributos que compõem este índice.

Assim, a proposta apresentada ganha a devida importância enquanto fator motivador para uma busca pela maior sustentabilidade dos transportes de carga. Os resultados indicam que o cálculo do fator Ecoeficiência evidencia a existência de assimetria de informações na metodologia atual do PBEV, pois não apresenta para o consumidor dados importantes que comparem a utilidade econômica do veículo com o seu desempenho ambiental.

Esta metodologia se mostra aplicável para ser utilizada novamente com quaisquer dados novos a serem publicados posteriormente, nos veículos que estarão no mercado no futuro, bem como em outros contextos ou outras estratégias visando à sustentabilidade dos transportes, tal como uma avaliação de Ecoeficiência de veículos para carga pesada ou para transportes públicos.

Em adição, não há restrições para que a metodologia seja aplicada para a avaliação de uma determinada frota particular de transporte dedicada, com o propósito de auxiliar os gestores na escolha dos veículos mais adequados para diferentes usos ou prestação de serviços, conforme suas demandas distintas.

Importante salientar que tal proposta para a subdivisão das classes de Ecoeficiência pode ser redefinida de inúmeras formas, de acordo com os propósitos esperados pelos gestores do Programa. As 5 classes propostas podem ser subdivididas segundo outros critérios, que considerem, por exemplo, uma distribuição normal do indicador entre as alternativas avaliadas, ou por via de medianas de todo o intervalo amostral.

De acordo com a proposta vista na Tabela 22, os resultados obtidos e os métodos utilizados nesta Tese podem ser apresentados de forma transparente e com detalhes suficientes que permitem ao público a compreensão das complexidades e compromissos inerentes à avaliação da Ecoeficiência de cada veículo, ao mesmo tempo em que os indicadores propostos e calculados evidenciam com a devida transparência necessária os critérios de classificação que foram empregados neste estudo.

5. Conclusões da Pesquisa

A metodologia desenvolvida e aplicada nesta pesquisa mostrou-se capaz de atender ao objetivo geral proposto no primeiro capítulo, pois entrega como produto um modelo de avaliação da Ecoeficiência, aplicável de forma descomplicada, que permite ser replicado e oferece dados consistentes para classificar os veículos leves para o transporte de carga, de modo a facilitar o processo decisório de escolha dos mesmos.

Os indicadores apresentados e calculados são específicos para avaliar veículos de uso comercial, dos quais se espera algum retorno econômico advindo de seu uso. Ou seja, os indicadores foram concebidos para fornecer resultados claros que não permitem qualquer tipo de interpretação dúbia ou controversa, pois utilizam dados que permitem mensurar custos ambientais e os contrapontos econômicos das alternativas de veículos e, assim, facilitam uma base de informações consistente e estável para apoiar a tomada de decisão e a formulação de políticas pró sustentabilidade no transporte.

A ponderação adotada para os quatro indicadores foi baseada na percepção dos especialistas que participaram da pesquisa e ligadas ao uso pretendido de um veículo leve para transporte de cargas, que na maior parte das vezes será usado para entregas de carga em curtas e médias distâncias urbanas ou rurais. Para um eventual desdobramento do modelo desenvolvido nesta pesquisa, para sua aplicação em veículos pesados, entende-se que os indicadores que relacionam a capacidade de carga em peso devem ter a sua importância majorada, em função da sua melhor aplicabilidade para um transporte rodoviário de longas distâncias. Esta flexibilidade para ponderar os indicadores, que foi prevista no modelo proposto, será de crucial importância, para que os mesmos possam passar por uma dinâmica evolutiva ao longo dos anos, em distintas aplicações, em virtude de mudanças no cenário de fatores tecnológicos, econômicos, ambientais ou políticos, que exijam quaisquer ajustes ao método para cálculo e avaliação da Ecoeficiência.

Assim, o modelo proposto consegue conduzir a várias alternativas para que se tenha uma ferramenta prática para os benefícios supracitados, aliados com a sustentabilidade do transporte de cargas.

Com relação aos benefícios esperados após adoção das recomendações desta pesquisa são relevantes o estabelecimento de um ranking inédito para a classificação de alternativas de veículos para transporte de cargas, que traz informações de utilidade dos mesmos, jamais contempladas no programa atual.

Em adição, verifica-se a possibilidade de auxiliar o usuário a escolher veículos que apresentam desempenho esperado em relação aos critérios tanto econômicos quanto ambientais, além de auxiliar os gestores de frotas na decisão de escolher veículos de carga mais adequados às suas necessidades de transporte, atendendo a requisitos de capacidade de carga, em alinhamento com a eficiência energética e baixos níveis de emissões. É mister destacar o alinhamento dos resultados desta pesquisa para os objetivos de desenvolvimento sustentável.

Considerando a necessidade cada vez maior de adaptar as operações e o desempenho das organizações para o desenvolvimento sustentável, a Avaliação de Ecoeficiência demonstrou sua importância. Embora o foco desta pesquisa tenham sido os veículos leves participantes do PBEV, as propostas aqui apresentadas são replicáveis para outras categorias de veículos de carga, assim como para outras economias emergentes, especialmente aquelas com similaridade socioeconômica com o Brasil.

Os resultados obtidos para os indicadores recomendados se mostram coerentes, uma vez que as alternativas que obtiveram os índices de Ecoeficiência mais altos, são representadas por veículos de tecnologias mais atuais, equipados com motores mais eficientes, reduzidos em tamanho, e com capacidade de carga mais elevada. Os resultados permitem ainda que os veículos sejam agrupados segundo características comuns que alinhem as alternativas mais eficientes no topo do ranking, permitindo assim uma comparação fiel entre as alternativas para o transporte de cargas.

Na medida em que um baixo percentual de veículos consegue atingir as melhores classes de desempenho em Ecoeficiência, os resultados classificatórios aparecem como alerta aos fabricantes para desenvolverem melhorias nos seus veículos e alcançar este diferencial competitivo.

Fica evidente que o mesmo modelo estruturado no presente trabalho pode ser adotado para outros tipos de equipamentos destinados ao uso comercial no transporte de cargas ou passageiros, necessitando naturalmente das informações completas que

estando disponíveis em bancos de dados de acesso público, conferem a transparência necessária, como a que foi destacada ao longo de toda esta pesquisa.

A metodologia baseada nas etapas da norma ABNT NBR ISO 140405 mostra-se adequada, a partir do momento em que estiverem disponíveis dados com a completude, relevância e abrangência para o cálculo da Ecoeficiência.

O caráter interdisciplinar desta pesquisa foi respeitado pela reunião de conhecimentos em diferentes disciplinas e áreas da ciência abordadas ao longo da mesma, fazendo com que todas fossem devidamente alinhadas para as questões da sustentabilidade na busca por mecanismos mais eficientes no transporte de carga no país.

Seu ineditismo e pertinência estão no fato de que os resultados encontrados se apresentam como proposta para a melhoria das políticas públicas nacionais no tema da eficiência energética no transporte, contemplando não somente o Programa Brasileiro de Etiquetagem do Inmetro/Conpet, mas também programas de alcance mais amplo, como o RenovaBio do MMA e o Rota 2030 do Ministério da Economia, que reforçam o compromisso do Brasil em reduzir suas emissões de gases causadores de efeito estufa, bem como em incentivar a indústria no desenvolvimento e uso de tecnologias para transporte mais eficientes, permitindo a redução dos seus impactos ambientais associados.

Apesar dos resultados encontrados, este estudo apresenta limitações inerentes a quaisquer pesquisas desta natureza, sendo importante destacar algumas limitações identificadas. Embora o número de especialistas seja pequeno, a especificidade do assunto restringiu as possibilidades da amostra, como já era esperado. A análise curricular dos respondentes foi rigorosa para garantir que possuíam os conhecimentos necessários na área.

Quanto ao método de decisão aplicado, é sabido que o método de Borda apresenta uma dependência das alternativas irrelevantes, isto é, caso seja incluída ou retirada qualquer uma das alternativas no conjunto de veículos apresentados, pode surgir um problema de reversão de ordem entre as alternativas, o que exige uma nova rodada de aplicação do método a cada novo lançamento ou retirada de circulação de qualquer dos veículos que compõem o PBEV. Porém, esta necessidade de atualização constante é

parte integrante da filosofia de melhoria contínua do programa e será parte dos procedimentos operacionais necessários a cada atualização da lista de alternativas concorrentes.

No tocante à amostra escolhida, que no momento da realização desta pesquisa, incorporou os veículos participantes do PBEV, no ano de 2019, ocasião em que as alternativas analisadas eram compostas apenas por veículos movidos a Diesel e/ou bicomcombustível (etanol e gasolina). Tal amostra trouxe resultados que indicaram uma predominância dos veículos comerciais a Diesel como sendo os mais bem classificados dentro da amostra escolhida. No momento da realização dessa pesquisa não foram avaliados parâmetros que permitam analisar comparativamente a Ecoeficiência de veículos híbridos e elétricos, que já circulam em diversos países, porém ainda estavam indisponíveis no mercado brasileiro até o ano de 2019.

Os resultados encontrados para a amostra analisada permitem concluir que os motores a Diesel ainda são uma alternativa viável sob os aspectos econômico e ambiental para o transporte de carga, por já terem passado por evoluções técnicas que permitem a realização de trabalho com baixo consumo energético e reduzidas emissões, atendendo aos parâmetros para a Ecoeficiência. Nesse sentido, a etiqueta atual que considera apenas os parâmetros consumo energético e CO₂ específico das emissões, pode ser eficaz sob o ponto de vista ambiental, mas não considera parâmetros de utilidade econômica adicionais.

Nota-se que a aplicação de parâmetros de utilidade pode fornecer incentivos que favorecem alguns carros grandes e com menores índices de eficiência nas emissões de CO₂ específicas. Porém, comparativamente aos carros menores, estes são, de fato, mais vantajosos no aspecto da Ecoeficiência que observa a utilidade econômica dos mesmos. Resulta então na importância da apresentação de ambos os índices (Emissões de CO₂ e Ecoeficiência), que não são excludentes, em conjunto com a eficiência energética e a capacidade de carga, na rotulagem veicular de forma a contemplar a necessidade por transparência e completeza nas informações relativas ao desempenho ambiental e econômico de cada alternativa.

Porém, a principal dificuldade encontrada nessa pesquisa está na escassez de dados sobre as etapas do ciclo de vida não observadas, tanto das fontes energéticas, quanto dos veículos, cujos impactos anteriores e posteriores da sua fase de uso, podem

trazer informações adicionais que pesam na ponderação dos impactos utilizados para o cálculo da Ecoeficiência, principalmente naquilo que tange às novas tecnologias de mobilidade baseadas em energia elétrica e no hidrogênio. Os indicadores são uma ferramenta para auxiliar ao longo do caminho e não a solução total. Por exemplo, são necessárias informações sobre o inventário do ciclo de vida de combustíveis distintos nos países e sobre as políticas e medidas tomadas para atingir os objetivos estabelecidos na legislação ambiental. Este tipo de análise de eficácia é necessária para estabelecer causalidade, mas é muito mais amplo do que indicadores em termos de necessidades de informação e ferramentas / metodologias a serem implementadas.

Para finalizar, é crucial deixar o registro que qualquer medida que favoreça um transporte mais sustentável deve incluir também outros impactos não contemplados aqui, como infraestruturas, segurança, poluição acústica e atmosférica e seus custos sociais associados. Para um futuro mais sustentável do transporte rodoviário entende-se ainda a necessidade de inclusão de políticas que promovam a diminuição da quantidade de mercadorias transportadas e das distâncias percorridas pelo transporte sobre pneus, aliado à expansão dos transportes ferroviário e aquaviário para longas distâncias, gestão de frotas e otimização da logística, com aproveitamento máximo da capacidade de retorno, bem como sensibilização dos consumidores sobre os custos associados ao transporte. É digno de nota ainda que reduções no consumo de energia e nas emissões de GEE podem ser alcançados com mudanças na estrutura política para transportes. A tributação apropriada de combustíveis e de veículos pode estabilizar a demanda por transporte motorizado individual. Políticas públicas podem promover a difusão de tecnologias de propulsão mais eficientes e combustíveis com baixo teor de carbono e levar a uma melhoria na Ecoeficiência dos veículos.

A promoção do consumo de produtos produzidos localmente também é um fator que reduzirá o transporte rodoviário de longa distância em distribuição, favorecendo com meios de transporte mais leves e flexíveis. Para alcançar a sustentabilidade no setor de transporte, devem ser tomadas medidas que ajudem a prolongar a vida útil dos veículos, que podem ser mais resistentes e modulares para se adaptarem à demanda do mercado, com equipamentos de conforto, que reduzam a necessidade de substituir todo o veículo em curto prazo. Estender a vida útil dos veículos, permitindo a atualização dos seus motores ajudaria consideravelmente no atendimento aos requisitos de sustentabilidade no transporte.

5.1 Propostas para pesquisas futuras

Com base nos resultados encontrados após a revisão da literatura realizada, deve-se considerar que análises futuras sobre sustentabilidade automotiva podem abordar as lacunas identificadas na literatura de referência, estendendo os estudos a todo o ciclo de vida da cadeia automotiva e investigando modelos de negócios sustentáveis e viáveis para esse setor. A abordagem completa do ciclo de vida permitirá, inclusive, realizar comparações mais avançadas sobre o desempenho de diferentes tipos de combustíveis nos aspectos ambientais e econômicos da Ecoeficiência, destacando-se a diferença entre os tipos de gases e quantidade emitida por cada alternativa.

A importância deste estudo abre precedentes para a realização de quaisquer outras análises, envolvendo parâmetros de Ecoeficiência, segundo a sua aplicação prevista em norma. De posse dos dados corretos e completos, há possibilidades de replicar este estudo para outros tipos de veículos comerciais, como caminhões e carretas com implementos, para transporte de carga pesada, cuja aplicação e uso pretendido já difere daquele dos veículos investigados.

Neste caso, fica evidente que os indicadores que considerem o peso transportado têm maior relevância quando aplicados ao transporte de cargas de longa distância, sendo a principal demanda para setores como o agronegócio e a mineração, basilares para a economia nacional. Nestes casos, o peso da carga tende a ser o fator mais importante, e seria possível a elaboração de uma curva gráfica entre os parâmetros peso transportado em função da eficiência energética do veículo, demonstrando o seu desempenho ambiental para o transporte de carga, independente da distância percorrida.

Importante considerar que os conjuntos de indicadores para o setor de transportes e outros setores, cuja avaliação de riscos e impactos ambientais esteja em maior desenvolvimento, não são estáticos e que, nos próximos anos, pode haver a necessidade qualquer refinamento para melhoria contínua desses indicadores.

Uma vez que a aplicação do conjunto de indicadores entre em uso e operação, existirá a oportunidade de melhor desenvolvê-los e ajustar o foco de aplicações de cada um deles, conforme necessidades de novas aplicações ou mudanças de cenário.

O conjunto de indicadores de Ecoeficiência caracterizado pelos quatro subindicadores propostos pode perdurar de médio a longo prazo, refletindo um momento em que esses conjuntos de indicadores estejam em uma fase de teste e desenvolvimento. Condição semelhante está relacionada à tecnologia de motores e combustíveis, que pode evoluir no sentido de veículos com emissões próximas de zero, o que proporciona uma oportunidade para uma revisão da ponderação aplicada a cada indicador.

Pesquisas adicionais são necessárias sobre conhecimento e percepção do consumidor, interpretação e classificação das informações apresentadas pela etiqueta de eficiência energética veicular, bem como até que ponto as informações são percebidas como sendo ou não confiáveis. Os resultados de estudos já realizados sobre a rotulagem de outros produtos de consumo podem fornecer uma visão nem sempre transferível para a rotulagem de automóveis, que difere em aspectos cruciais como comportamento do consumidor, decisão de fabricação e padrão de uso, que podem diferir entre carros e, por exemplo, eletrodomésticos.

Outra possibilidade de desdobramento é realizar a análise da Ecoeficiência de veículos para carga movidos por motores elétricos ou híbridos, comparando-os com os de motor a combustão. Há de se frisar, neste caso, que a mera comparação da Ecoeficiência na fase de uso dos veículos, não seria relevante, pois os impactos ambientais oriundos do ciclo de vida dos motores e baterias dos veículos elétricos são radicalmente distintos daqueles oriundos dos motores a combustão, o que exigiria a aplicação da ACV completa de cada uma das fontes energéticas, antes de determinar o cálculo da Ecoeficiência.

Pesquisas comparativas entre a Ecoeficiência de veículos de carga, utilizando-se parâmetros monetários, tais como o custo de aquisição e manutenção do veículo podem ser conduzidos com foco no estágio de uso, no ciclo de vida dos automóveis, para entender como as pessoas consomem componentes e acessórios automotivos, e de que maneira são descartados ao final da vida útil.

Novos estudos de caso considerando o valor da carga a ser transportada também poderão gerar novos resultados para públicos distintos daquele público focal inicialmente pensado para este trabalho. Em adição, investigar expectativas em

relação às novas soluções de transporte rodoviário por meio de aplicativos para compartilhamento e de veículos autônomos mostra ser de interesse atual.

Propostas de desdobramentos da tese, contemplando produção de material técnico, didático e informativo sobre os resultados da pesquisa também farão parte das ações necessárias para atingir a todos os objetivos pretendidos com esta pesquisa, que não se mostra exaustiva, possibilitando a abertura de novas frentes de pesquisas no ramo da eficiência energética e da Ecoeficiência veicular, a partir dos resultados encontrados.

Referências

- ABREU, R. S. Rota 2030 e a importância do bioetanol. In: SIMEA 2018 – XXVI Simpósio Internacional de Engenharia Automotiva. A Rota para o Futuro da Mobilidade no Brasil, AEA São Paulo, 2018.
- ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN - AENOR. UNE 150041 EX: Análisis de Ciclo de Vida Simplificado. Madrid, España, 1998.
- AHMADI, Z.; DEHAGHI, M. R.; MEYBODI, M. E.; GOODARZI, M.; AGHAJANI, M. Pollution Levels in Iranian Economy Sectors using input-output Analysis and TOPSIS Technique: An Approach to Sustainable Development. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 141 p.1363 – 1368, 2014. doi: 10.1016/j.sbspro.2014.05.235.
- ALMEIDA, A.T.; MORAIS, D.C.; COSTA, A.P.C.S.; ALENCAR, L.H.; DAHER, S.F.D. *Decisão em grupo e negociação: métodos e aplicações*. São Paulo: Atlas, 2012.
- ALMEIDA, A.T. *Processo de Decisão nas Organizações: construindo modelos de decisão multicritério*. São Paulo: Atlas, 2013.
- ARESE, M.; FRANÇA, S. L. B.; BONINA, N.; DENIZOT, A.; DOMINGOS, C.M. L. *Gestão de ativos, modelo de maturidade e sustentabilidade: Uma análise bibliométrica*. *Revista Espacios*. Vol. 38 (Nº 06), P.20, 2017.
- ARNOLD, T; BART, J. Environmental impacts of products: a detailed review of studies. *Journal of Industrial Ecology*, V.10, 2006.
- ARROW, K.J.; AMARTYA, S.; KOTARO, S. *Handbook of social choice and welfare*. Vol.2, Elsevier, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR ISO 14020 - Rótulos e declarações ambientais - Princípios Gerais. Rio de Janeiro, 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR ISO 14021 - Rótulos e declarações ambientais — Autodeclarações ambientais - Rotulagem do Tipo II. Rio de Janeiro, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR ISO 14024 - Rótulos e declarações ambientais - Rotulagem ambiental do tipo 1 - Princípios e procedimentos. Rio de Janeiro, 2004.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR ISO 14025 - Rótulos e declarações ambientais - Declarações ambientais de Tipo III - Princípios e procedimentos. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR ISO 14040 - Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR ISO 14044 - Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 2009b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT ISO 14045 – Gestão ambiental - Avaliação da Ecoeficiência de sistemas de produto – Princípios, requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6601 - Veículos Rodoviários Automotores Leves - Determinação de hidrocarbonetos, monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio, dióxido de carbono e material particulado no gás de escapamento, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7024 - Veículos Rodoviários Automotores Leves - Medição do consumo de combustível - Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 10312 – Veículos rodoviários automotores leves - Determinação da resistência ao deslocamento por desaceleração livre em pista de rolamento e simulação no dinamômetro. Rio de Janeiro, 2014b.
- BALES, M. P.; SILVA, S. R. da; DIAS, C.; SANTOS, W. de O. S. A avaliação do programa brasileiro de etiquetagem veicular demonstra a necessidade da melhoria contínua. Blucher Engineering Proceedings. Setembro de 2015, Número 1, Volume 2, 2015.
- BARAN, R. Introdução de veículos elétricos no Brasil: avaliação do impacto no consumo de gasolina e eletricidade.p.124. Tese (Doutorado do Programa de Planejamento Energético/COOPE) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2012

- BARAN, R.; LEGEY, L. F. L. Veículos elétricos: história e perspectivas no Brasil. BNDES Setorial 2010, n. 33, p. 207- 224, 2010.
- BARBA-ROMERO, S.; POMEROL, J.C. Decisiones Multicriterio: Fundamentos Teóricos e Utilización Práctica. Madrid, Spain: Universidad de Alcalá, 1997.
- BARBIERI, J. C. Gestão ambiental empresarial: conceitos, modelos e instrumentos.4.ed. - São Paulo:Saraiva, 2016.
- BARBOSA, H. M. J. Vapor de água na atmosfera: do efeito estufa às mudanças climáticas. REVISTA USP. n.103, p. 67-80, São Paulo, 2014.
- BARBOZA, E. M. F. Rotulagem Ambiental Rótulos ambientais e Análise do Ciclo de Vida (ACV). IBICT, novembro de 2001.
- BARROS, R. L. P. e LEMOS, H. M. Gestão do Ciclo de Vida dos Produtos e Rotulagem Ambiental nas micro e pequenas empresas. Rio de Janeiro: Comitê Brasileiro do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, 2008.
- BARROS, C.P.; WANKEP. An analysis of African airlines efficiency with two-stage TOPSIS and neural networks. Journal of Air Transport Management 44-45 90e102, 2015.
- BAZERMAN, M.H. Processo Decisório. Rio de Janeiro, Elsevier, 2004.
- BENÍTEZ, M. G.; FERRÉ, R.G.; IGLESIAS, R.C.; VILLAR, S.G. El análisis de ciclo de vida como herramienta de sostenibilidad en los proyectos de tratamiento de águas. AFINIDAD LXXI, 565p, Enero–Marzo, 2014.
- BERMOND, V.;CALIMAN, R. R.;ROSA, R. A.;PEREIRA, E. P.; CARVALHAES, B. B. A method to assess the eco-efficiency of a public bus transportation service, International Journal of Sustainable Transportation, 13:8, 567-581, 2019.
- BERTALANFFY, L. V. Teoria geral dos sistemas. Petrópolis, Vozes, 1973. 351p.
- BLOTTNITZ, H. von; CURRAN, M. A. A review of assessments conducted on bio-ethanol as a transportation fuel from a net energy, greenhouse gas, and environmental life-cycle perspective. Journal of Cleaner Production, March 2006.

- BORSATTO, M.A.; AMORIM, V.L. Inovar-Auto: A Condenação do Brasil Perante A Organização Mundial do Comércio. XVI Seminário Internacional. Demandas Sociais e Políticas Públicas na Sociedade Contemporânea, 2019.
- BORTOLOTI, M. A. Veículos híbridos uma solução ecológica ou não? Estudo comparativo do ciclo de vida de dois produtos substitutos com tecnologias diferentes: veículos com motor flex e híbridos. Anais do XXIV Encontro Nacional da Associação nacional dos cursos de graduação em administração, Florianópolis, 2013.
- BORTOLOTI, M. A.; SANTOS, N. C. dos; PIACENTE, F. J.; SILVA, R. G. Análise das vantagens ecológicas de veículos automotivos com motores: flex e híbrido. Bioenergia em revista: diálogos, ano 3, n.1, p. 100-127, jan./jun. 2014.
- BRAGA, A.; PEREIRA, L.; BÖHM, G.; SALDIVA, P. Poluição atmosférica e saúde humana. Revista USP, n. 51, p. 58-71, 30 nov. 2001.
- BRASIL. Presidência da República. Secretaria-Geral. Subchefia para Assuntos Jurídicos. Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017. Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e dá outras providências.
- BRASIL. Presidência da República. Secretaria-Geral. Subchefia para Assuntos Jurídicos. Lei nº 13.755, de 10 de dezembro de 2018. Estabelece requisitos obrigatórios para a comercialização de veículos no Brasil; institui o Programa Rota 2030 - Mobilidade e Logística.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 18/1986, de 6 de maio de 1986. Publicado no D.O.U de 17 de junho de 1986.
- BRASIL, H.G. Processo decisório e a questão orçamentária: uma analogia. Revista de Administração Pública, Rio de Janeiro, v.27, n.3, jul/set, 1993.
- CAIADO, A. R. Contribuição ao estudo da rotulagem ambiental dos materiais de construção civil. Dissertação apresentada ao Mestrado em Tecnologia da Arquitetura. Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da FAUUSP, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2014. 130p.
- CAIADO, R.; DIAS, R.; MATTOS, L.; QUELHAS, O.; FILHO, W.. Towards Sustainable Development through the Perspective of Eco-Efficiency - A Systematic

Literature Review .Journal of Cleaner Production.165, 2017.doi: 10.1016/j.jclepro.2017.07.166.

- CAMARGO, A. M. de. Inventário do Ciclo de Vida do Metanol para as condições brasileiras. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2007. 132p.
- CAPES. Portal de Periódicos. <http://www.periodicos.capes.gov.br/index.php?>
- CARMO, L.F.R.R.S; COSTA, H.G.; RODRIGUEZ, D.S.S. Métodos de auxílio multicritério à decisão aplicados a problemas de PCP: Mapeamento da produção em periódicos publicados no Brasil. Gestão e Produção, São Carlos, V.20, n.1, p.134-146, 2013.
- CARVALHO, C. H. R. de. Emissões relativas de poluentes do transporte motorizado de passageiros nos grandes centros urbanos brasileiros. Abril, 2009.
- CASALS, LC; GARCÍA, B.A.; AGUESSE, F.; ITURRONDOBEITIA, A. Second life of electric vehicle batteries: relation between materials degradation and environmental impact. International Journal of Life Cycle Assessment, 2016.
- CODAGNONE, C.; BOGLIACINO, F.; VELTRI, G..Testing CO₂ car labelling options and consumer information. Final Report, EC DG Climate Action, 2013.
- COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO- CETESB. Emissões veiculares no estado de São Paulo 2019. Série Relatórios CETESB,São Paulo, 2020.
- CHEHEBE, J. R. B.. Análise do ciclo de vida dos produtos: ferramenta gerencial da ISO 14000. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2002.
- CLOSS, L. Q.; ARAMBURÚ, J. V.; ANTUNES, E.D. Scientific production regarding education in business administration : an evaluation under the complexity paradigm perspective. Gestão.org. Revista eletrônica de gestão organizacional. Recife, PE. Vol. 7. n. 2, (maio/ago. 2009), p. 150-169, 2009.
- Comunidade Europeia. Directive 1999/94/EC. Official Journal of the European Union.L 12, 16–23, 1999.
- Comunidade Europeia. Regulamento N° 443 de 23de Abril de 2009.Official Journal of the European Union, 2009.

- Comunidade Europeia. Directive 2003/30/EC. On the promotion of the use of biofuels or other renewable fuels for transport. Official Journal of the European Union, 34–35 2003.
- Comunidade Europeia. Directive 2009/28/EC. On the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC. Official Journal of the European Union, 2009.
- COSTA, H. G. AHP-De Borda: A Hybrid Multicriteria Ranking Method. Brazilian Journal of Operations & Production Management. V.14, N.3, pp. 281-287. 2017, DOI: 10.14488/BJOPM, v14.n3.a, 2017.
- CRICK, M.J.; HILL, M. D.; CHARLES, D. The Role of Sensitivity Analysis in Assessing Uncertainty. In: Proceedings of an NEA Workshop of Uncertainty Analysis for Performance Assessments for Radioactive Waste Disposal Systems. Paris, OECD, 1996.
- D'AGOSTO, M. A. Análise da Eficiência da Cadeia Energética para as Principais Fontes de Energia Utilizadas em Veículos Rodoviários no Brasil. Tese apresentada no Programa de Doutorado em Engenharia de Transporte, COPPE, UFRJ, 2004.
- D'AGOSTO, M. A.; RIBEIRO, S. K. Procedimento de Análise de Ciclo de Vida para Comparação de Fontes de Energia para o Transporte no Brasil. In: Transporte em Transformação XI, 2009.
- D'AGOSTO, M. A.; OLIVEIRA, C. M., ASSUMPTIÃO, F. C. Alternativas energéticas para o transporte público urbano no Rio de Janeiro: uma análise utilizando Inventário de Ciclo de Vida (ICV). TRANSPORTES v.22,n.1. DOI: <http://dx.doi.org/10.14295/transportes.v22i1.736>, 2014.
- D'AGOSTO, M. A. Transporte, uso de energia e impactos ambientais: uma abordagem introdutória. 1ªed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.
- DAVIS, S. C.; TEIXEIRA, K. J. A.; DELUCIA, E. H. Life-cycle analysis and the ecology of biofuels. Cell Press Review. Elsevier Ltd.. 2008. doi: 10.1016/j.tplants.2008.12.006.
- Departamento Nacional de Trânsito – DENATRAN. Ministério da Infraestrutura – Frota Nacional de Veículos – 2019. Publicado: Terça, 12 de Fevereiro de 2019.

Disponível em: <https://www.denatran.gov.br/component/content/article/115-portal-denatran/8559-frota-de-veiculos-2019.html>

- ELLINGSEN, L. A-Wet *al.* The size and range effect: lifecycle greenhousegas emissions of electric vehicles. *Environmental Research Letters*.11 054010, 2016.
- ELLINGSEN. L. A-W., Hung, R. H., &Strømman, A. H. Identifying key assumptions and differences in life cycle assessment studies of lithium-ion traction batteries. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2017.
- ELLINGSEN. L. A-W., Majeau-Bettez, M., &Strømman,A. H. Comment on “The significance of Li-ion batteries in electric vehicle life-cycle energy and emissions and recycling's role in its reduction” in *Energy & Environmental Science. The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2015.
- Empresa de Pesquisa Energética. EPE Brasil.Balanco Energético Nacional 2020: Ano base 2019 / Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro: EPE, 2020.
- Empresa de Pesquisa Energética. EPE Brasil.Balanco Energético Nacional 2019: Ano base 2018/ Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro: EPE, 2019.
- Empresa de Pesquisa Energética. EPE Brasil.O Compromisso do Brasil no Combate às Mudanças Climáticas: Produção e Uso de Energia. – Rio de Janeiro: EPE, 2016.
- ENSSLIN, L.; MONTIBELLER, NETO, G.; NORONHA, S.M.D. Apoio à Decisão: metodologias para estruturação de problemas e avaliação multicritério de alternativas. Florianópolis: Insular, 2001.
- EPELBAUM, Michel. A influência da gestão ambiental na competitividade na cadeia automobilística. *Engenharia de Produção*, USP, 2002.
- European Environmental Agency. EEA Core set of indicators: Technical Report, April, 2003.
- European Environmental Agency. EEA Core set of indicators: Guide. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, EEA Technical Report nº 1/ 2005, 2005.
- FERREIRA, A.C. Modelos de otimização na produção de óleo diesel: uma aplicação industrial. Tese de Doutorado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química. Campinas, SP: [s.n.], 2008.

- FIGUEIRA, J.; GRECO, S.; EHRGOTT, M. Multiple criteria decision analysis: state of art – surveys. International series in operations & research management science. New York. Springer International Editions – Verlag, 2005.
- FRANCISCHETTI, C. E.; SANTOS, Nilcéia C. dos; GOMES, R. S. Analysis of Electric Vehicles: A Brazilian Reality and Its Consequences for the Environment. Article International Conference on Renewable Energies and Power Quality, Cordoba (Spain), April 2014. DOI: 10.24084/repqj12.283.
- GABRIEL, R.; BRAUNE, A. Eco-efficiency analysis: application and user contacts. Journal of Industrial Ecology, v.9, n.4, 2005.
- GAL, T.; STEWART, T.; HANNE, T. Multicriteria decision making: advances in MCDM models, algorithms, theory, and applications. Vol. 21, Springer, 2013.
- GERRARD, J.; KANDLIKAR, M. Is European end-of-life legislation living up to expectations? Assessing the impact of the ELV Directive on green innovation and vehicle recovery. Journal of Cleaner Production, 15, 17-27, 2007. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2005.06.004>
- GLAVIC, P.; LUKMAN, R. Review of sustainability terms and their definitions. Journal of Cleaner Production 15, 2007.
- GOMES, L.F.A.M.; ARAYA, M.C.G.; CARIGNANO, C. Tomada de Decisões em Cenários Complexos: introdução aos métodos discretos do apoio multicritério à decisão, Thomson Learning, São Paulo, SP, 2004.
- GOMES, L.F.A.M.; GOMES, C.F.S. Tomada de decisão gerencial: enfoque multicritério. 5. ed. São Paulo. Atlas, 2014.
- GUERON, A. L. Rotulagem e Certificação Ambiental: uma Base para subsidiar a Análise da Certificação Florestal no Brasil. Dissertação de Mestrado em Planejamento Energético. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.
- HAQ, Gary; WEISS, Martin. CO₂ Labelling of passenger cars in Europe: Status, challenges, and future prospects. Energy policy, August 2016, Vol.95, pp.324-335, 2016.

- HAWKINS, T. R., Gausen, O. M., & Strømman, A. H. Environmental impacts of hybrid and electric vehicles - a review. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2012.
- HILGEMBERG, E.M.; GUILHOTO, J. M. Uso de combustíveis e emissões de CO₂ no Brasil: um modelo inter-regional de insumo-produto. *Nova Economia*, nº 16, 2006.
- HILL, M. P. Uso de Energia em Transporte: Análise comparativa da eficiência energética entre os ciclos de vida do gás natural veicular comprimido e da energia termelétrica a gás para uso final em automóveis leves. Rio de Janeiro, UFRJ, 2010.
- HOUAISS, Antonio. *Dicionário Houaiss da Língua Portuguesa*. Ed. Objetiva. Rio de Janeiro, 2001.
- HUNG, S.Y. Expert versus novice use of the executive support systems: an empirical study. *Information & Management*. Amsterdam, v.40, n.3, p.177, 2003.
- HUPPES, G; ISHIKAWA, M. A framework for quantified eco-efficiency analysis. *Journal of Industrial Ecology*, v.9, n.4, 2008.
- HWANG, C.L., K. YOON. *Multiple Attribute Decision Making Methods and Applications*. Springer-Verlag, Berlin, 1981.
- HWANG, C.L., Y.J. LAI, T.Y. LIU.. A new approach for multiple objective decision making. *Computers Ops Res*. Vol. 20, No. 8, pp. 889-899, 1993.
- Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - IBAMA. *Proconve. Resultados, 2005*. Disponível em: www.ibama.gov.br/proconve
- International Energy Agency - IEA. *Energy Efficiency Indicators for Public Electricity Production from Fossil Fuels 2008*. In: IEA, 2008.
- Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia - IBICT. UNB, Universidade de Brasília. *Inventário do Ciclo de Vida para a Competitividade Ambiental da Indústria Brasileira*, Junho 2005.
- Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia - INMETRO. *Portaria Inmetro n.º 377, de 29 de setembro de 2011 - Requisitos de Avaliação da Conformidade para Veículos Leves de Passageiros e Comerciais Leves*, 2011. Disponível em <http://inmetro.gov.br/legislacao/>

- Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia- INMETRO. Relatório Executivo de Acompanhamento e Controle da Produção do Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular, 2017.
- IQBAL, A.; ALLAN, A.; AFROZE, S.. Analysis of transport eco-efficiency scenarios to support sustainability assessment: a study on Dhaka City, Bangladesh. *Environmental Monitoring and Assessment*. Vol.189. Issue:8. AUG, 2017.
- Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC. Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Inventories. In: IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories – The Reference Manual – Volume 3 – Energy, Revised, 1996.
- JØRGENSEN, S.E. *Fundamentals of Ecological Modelling*. 2 ed. Elsevier - Amsterdam, 1994.
- KAHRAMAN, C. *Fuzzy multicriteria decision making: theory and applications with recent developments*. Turkey: Springer Science, 2008.
- KANGAS, A.; LAUKKANEN, S.; KANGAS, J. Social choice theory and its applications in sustainable forest management - a review. *Forest Policy and Economics journal*, v. 9, 2006.
- KAVLOV, B. *Biofuel Potentials in the EU*. Institute of Prospective Technology Studies, IPTS, 2004.
- KEMP, R.; ANDERSEN, M.M. *Strategies for eco-efficiency innovation. Eco-innovation-making both ends meet*. IMR Strategie lijnen project voor VROM, 2004.
- KIM, S. and B.E. Dale, *Global potential bioethanol production from wasted crops and crop residues*. *Biomass and Bioenergy*, 2004.
- KLOESS, M.; MULLER, A. *Simulating the impact of policy, energy prices and technological progress on the passenger car fleet in Austria — A model based analysis 2010–2050*. Vienna University of Technology, *Energy Policy*, Volume 39, Issue 9, Austria, September, 2011.
- KOHLRAUSCH, A. K. *A Rotulagem ambiental no auxílio à formação dos consumidores conscientes*. Dissertação apresentada ao Mestrado em Engenharia de Produção. Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis. 2003.

- LEAL JUNIOR, I. C. Método de escolha modal para transporte de produtos perigosos com base em medidas de ecoeficiência. Tese apresentada ao Doutorado em Engenharia de Transportes. Universidade Federal do Rio de Janeiro - URFJ, Rio de Janeiro, 2010.
- LEAL JUNIOR, I. C.; D'AGOSTO, M. A.. Ações de Ecoeficiência para melhoria do desempenho no transporte rodoviário de produtos perigosos. *Transportes* v.20, n.3, 2012. DOI: 10.4237/transportes.v20i3.563.
- LEITE, D. A. A Energia do Brasil. 2ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.
- LIMA JR., F. R.; CARPINETTI, L. C. R.. Uma comparação entre os métodos TOPSIS e Fuzzy-TOPSIS no apoio à tomada de decisão multicritério para seleção de fornecedores. *Gestão e Produção, São Carlos, v. 22, n. 1, p. 17-34, 2015.* <http://dx.doi.org/10.1590/0104-530X1190>.
- LINDA AGER –W. E.; STRØMMAN, A. H. Life cycle assessment of electric vehicles electric. 12º Concawe Symposium. NTNU – Norwegian University of Science and Technology, 2017.
- LIU, X.; HILDEBRANDT, D.; GLASSE, D. Environmental impacts of electric vehicles in South Africa. 2012.
- LÖBLER, M.L.; HOPPEN, N.; ESTIVALETE, V.F.B.. A Teoria da Imagem como explicação para a atribuição de pesos em critérios de decisão. *Revista Brasileira de Gestão de Negócios – RBGN, v.10, n.28, São Paulo, jul/set, 2008.*
- LOMBORG, Bjorn. Are Electric Cars Really Green? PragerU.com Free Courses for Free Minds, 2017.
- MAJEAU-BETTEZ, M., HAWKINGS, T.; STRØMMAN, A. H. Life Cycle Environmental Assessment of Lithium, 2011.
- MAIA, D. M.; CARVALHO, R. N. Ecoeficiência em Frotas de Carga. *Blucher Engineering Proceedings*. No 1, Volume 2, 2015.
- MARTINS, I. D. Avaliação do ciclo de vida do sistema *bus rapid system* (BRT): um estudo de caso da transcarioca. Projeto apresentado à Escola Politécnica/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Ambiental, Janeiro/2017.

- MARX, K. O Capital. Crítica de Economia Política. Livro Primeiro, o processo de produção do Capital. Vol.1. 17ª Edição. Civilização Brasileira, Rio de Janeiro, 1999.
- MELLO, J.C.C.B.S; GOMES, L.F.A.M.; GOMES, E.G.; MELLO, M.H.C.S. Use of ordinal multi-criteria methods in the analysis of the Formula 1 World Championship. Cad.EBAPE.BR. v.3, n.2, 2005.
- MEYER, I.; WESSELY, S. Fuel efficiency of the Austrian passenger vehicle fleet — analysis of trends in the technological profile and related impacts on CO₂ emissions. Energy Policy 37, 2009.
- MEZA, L.; MELLO, J.C.C.B.S; JUNIOR, S.F.G. Método de Condorcet com decisores fracamente racionais. In: XXXIV Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Curitiba, 2014.
- Ministério do Meio Ambiente - MMA. Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários. Ministério do Meio Ambiente. Cidades Sustentáveis - Urbanismo Sustentável, 2014.
- Ministério de Minas e Energia - MME. Empresa de Pesquisa Energética – EPE. Balanço Energético Nacional 2014. Relatório Síntese, ano base 2013. Rio de Janeiro, RJ. Maio de 2014.
- Ministério de Minas e Energia - MME. Empresa de Pesquisa Energética – EPE. O Compromisso do Brasil no Combate às Mudanças Climáticas: Produção e Uso de Energia. Junho, 2016.
- MIRANDA, P. E. V. International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy (IPHE). Country Update: Brazil, Abril 2017. Disponível em: <https://www.iphe.net/brazil>
- MONTEIRO, C. E. L.; COSTA, S. R.R. A Rotulagem Ambiental como meio de comunicação da avaliação do ciclo de vida: sugestões para um programa brasileiro. In: VII Congresso Nacional de Excelência em Gestão, 2011.
- MOREIRA, H. M.; GIOMETTI, A. B. R. O protocolo de Quioto e as possibilidades de inserção do Brasil no mecanismo de desenvolvimento limpo por meio de projetos de energia limpa. Contexto internacional. vol. 30, no 1, jan/abr 2008.

- MOTTA, W. H. Ciclo de vida do produto e a geração deecoinovações: desafios para o Brasil. Tese (Doutorado em Ciência da Informação) – Escola de Comunicação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, PPGCI/IBICT Informação em Ciência e Tecnologia, Rio de Janeiro, 2016.
- NESTICO, A.; MASELLI, G. Sustainability indicators for the economic evaluation of tourism investments on islands. *Journal of Cleaner Production*, 248, 2019.<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019>.
- NICOLAY S.; TELLER P.; RENZONI R. A simplified LCA for automotive sector – comparison of ICE (diesel and petrol), electric and hybrid vehicles.SETAC - Europe. Proceedings of the 8th LCA Case Studies Symposium, 2000.
- NOGUEIRA, L. A. H. Uso racional: a fonte energética oculta. *Estudos Avançados*, 2007.
- Organization for Economic Co-operation and Development - OECD. *Eco-efficiency*, Paris, 86p. 1998.
- OLSON, David Louis. *Decision Aids for Selection Problems*. Springer Series in Operations Research,1995.
- OLSON, David Louis. Comparison of Weights in TOPSIS Models. *Mathematical and Computer Modelling* 40 p.721-727, 2004.
- OMETTO, A. R.. *Avaliação do ciclo de vida do álcool etílico hidratado combustível pelos métodos EDIP, exergia e emergia* (p. 209). São Carlos, SP: Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, 2005.
- PALLARO, E.; SUBRAMANIAN, N.; ABDULRAHMAN, M. D.; LIU, C. Sustainable production and consumption in the automotivesector: Integrated review framework and research directions. *Sustainable Production and Consumption V.4*, 47-61, 2015.
- PAZDERNIK, K.; ANDER, M.; GÖTTLICHER, S.; KOTHER, D.; POUPER, S.; STRANNER, G.; ZECHMEISTER, A. *Emssionstrends 1990–2008 - Ein Überblick uber die Österreichischen Verursachervon Luftschadstoffen*. Datenstand, 2010.
- PEHLKEN, A.; YOUNG, S. B.; CHEN, M..*Assessing and Managing Life Cycles of Electric Vehicles*. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2017.

- PICAZO-TADEO, A.J., BELTRÁN-ESTEVE, M., GÓMEZ-LIMÓN, J.A. Assessing eco-efficiency with directional distance functions. *Eur. J. Oper. Res.* 220, p.798–809, 2012.
- PHILIPON, P. *O Futuro da Mobilidade: rumo a uma mobilidade rodoviária sustentável*. Éditions Textuel, 2010. 142p.
- POMEROL, S.C.; BARBA-ROMERO, S. *Multicriterion decision in management: principles and practice*. Vol.25. New York, Springer Science & Business Media, 2012.
- Programa Nacional da Racionalização do Uso dos Derivados do Petróleo e do Gás Natural - CONPET. Tabela de dados do Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular – PBEV, 2019. Disponível em: <http://pbeveicular.petrobras.com.br/TabelaConsumo.aspx>
- RANGEL, L. A. D. Determinação de funções de utilidade através das preferências dos decisores sobre o conjunto de critérios empregando o método UTA. Tese de Doutorado em Engenharia de Produção - Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, 2002.
- RANGEL, L. A. D.; GOMES, L. F. A. M. O apoio multicritério à decisão na avaliação de candidatos. *Produção online*, v. 20, n. 1, p. 92-101, 2010.
- RANGEL, L. A.D.; L.; RIBEIRO, L. G. M.; Avaliação de Fontes Renováveis de Energia Utilizando o Apoio Multicritério à Decisão. SEGET - Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia, Resende, 2017.
- RASHIDI, K., Farzipoor Saen, R. Measuring eco-efficiency based on green indicators and potentials in energy saving and undesirable output abatement. *Energy Econ.* 50, p.18–26, 2015.
- RIBEIRO, S. K.; REAL, M. V. *Novos Combustíveis*. Rio de Janeiro: E-papers, 2006.
- RIBEIRO, S. K.; ABREU, Adrianna. A. Brazilian Transport Initiatives with GHG Reductions as a co-benefit. *Climate Policy*. v.8, n.2, p. 220-240, 2008.
- RIBEIRO, S. K. *O álcool e o aquecimento global*. Rio de Janeiro: CNI/COINFRA, 1997. 112p
- RICHA, K.; BABBITT, C.W.; NENADIC, N.G.; GAUSTADT, G. Environmental trade-offs across cascading lithium-ion battery life cycles. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2016.

- RIEVAJ, V., SYNÁK, F. Does electric car produce emissions? Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport. 2017, 94, 187-197. ISSN: 0209-3324. DOI: <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2017.94.17>.
- ROY, Bernard. Decision-aid and decision-making. European Journal of Operational Research. Vol. 45, Elsevier, 1990.
- SAATY, Thomas L. Decision Makers for Leaders, New York, USA. McGraw-Hill, 1980.
- SAATY, Thomas L. Rank from comparisons and from ratings in the analytic hierarchy/network process. European Journal of Operational Research, 168, 2006.
- SANNA, Lucy. Driving the Solution. EPRI Journal, 2005. Disponível em: www.calcars.org/epri-driving-solution-1012885-PHEV.pdf.
- SANTOS, N. C. dos; FRANCISCHETTI, C. E.; SILVA, R. G. S. Analysis of electric vehicles: a brazilian reality and its consequences for the environment. International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'14) Cordoba (Spain), April, 2014. RE&PQJ, No.12, April 2014.
- SANTOS, A. A. dos; NETO VIEIRA, J., FARIAS FILHO, J. R. Three decades in development the eco-efficiency: a bibliometric study the activity in search in literature scientific indexed in scopus base. Espacios. Vol. 37, 2016.
- SENGE, P.M. The Fifth Discipline: The Art & Practice of Learning Organization. Random House, London, 1990.
- SILVA, E. R. Análise do crescimento da motorização no Brasil e seus impactos na mobilidade urbana. 2011. 142p. Dissertação (Mestrado do Programa de Planejamento Energético/COOPE) - Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 2011.
- SIMÃO, V.G. Fatores estruturantes para implantação do programa brasileiro de avaliação do ciclo de vida. Dissertação apresentada ao curso de Mestrado em Sistemas de Gestão da Universidade Federal Fluminense. Área de concentração: Gestão Ambiental, p.133, 2011.
- SINGH, B., ELLINGSEN. L. A-W., & STRØMMAN, A. H. Pathways for GHG emission reduction in Norwegian road transport sector: Perspective on consumption of

passenger car transport and electricity mix. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2015.

- SINGH, B., GUEST, G., BRIGHT, R. M., & STRØMMAN, A. H. Life Cycle Assessment of Electric and Fuel Cell Vehicle Transport Based on Forest Biomass. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2014.

- SINGH, B., & STRØMMAN, A. H. Environmental assessment of electrification of road transport in Norway: Scenarios and impacts. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2013.

- SOUZA, L.P.; LORA, E.E.S.; PALACIO, J.C.E.; ROCHA, M.H.; RENÓ, M.L.G. Análise do ciclo de vida de veículos convencional, elétrico e híbrido plug-in para condições brasileiras. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, v.7, n.3, p.144-159, 2016.

- STRANGUETO, K. M.; SILVA, Ennio P. Análise do suprimento de frota de veículos elétricos por usina solar fotovoltaica de 1 MWP. In: *Revista dos Transportes Públicos - ANTP - Ano 37 - 2015 - 2º quadrimestre*.

- SUBTIL, J. O. F. Análise de métodos de avaliação de eco eficiência. Dissertação apresentada à Escola Politécnica de Universidade de São Paulo como requisito obrigatório para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química. São Paulo, 2015.

- TEMIDO, J.; SOUSA, J. A entidade gestora de processos: o caso da Águas de Coimbra. *Proceedings of the 14º Encontro Nacional de Saneamento Básico, Porto, Portugal, Outubro, 2010*.

- TIAN, H. Eco-labelling scheme, environmental protection, and protectionism. *Canadian Journal of Economics/Revue Canadienne d'Economique*, 36, p. 608-633, 2003.

- TURRENTINE, T.S.; KURANI, T.S. Car Buyers and Fuel Economy. *Energy Policy*, V.35. 2007.

- ÜBERMASSER, S.; STIFTER, M.; CASTRO, D. BURNIER DE; HENEIN, S. Analysing different charging strategies for using electric vehicles in multi-story car

parks as distributed storage and generation systems: A multi-agent based approach. AIT Austrian Institute of Technology. Vienna, 2013.

- UHLMAN, B.W.; SALING, P. Measuring and Communicating Sustainability through Eco-efficiency analysis. *Chemical Engineering Process*, v.106, n.12, 2010.
- United Nations Environment Programme - UNEP, Division of Technology, Industry, and Economics. A Manual for the Preparers and Users of Eco-efficiency Indicators. Available from: <http://www.uneptie.org/>. United Nations, New York and Geneva, 2004.
- United Nations Environmental Programme - UNEP .Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products. Social and socio-economic LCA guidelines complementing environmental LCA and Life Cycle Costing, contributing to the full assessment of goods and services within the context of sustainable development. United Nations Environment Programme, França, 2009.
- United States Environmental Protection Agency – EPA. Federal Test Procedure, FTP-75 - Fuel economy and greenhouse gas exhaust emissions of motor vehicles, 1978.
- United States Environmental Protection Agency – EPA. An Organizational Guide to Pollution Prevention. EPA/625/R-01/003. Office of Research and Development, Ohio, August, 2001.
- USÓN, A. A.; CAPILLA, A.V.; BRIBIÁN, I. Z.; SCARPELLINI, S. Energy efficiency in transport and mobility from an eco-efficiency viewpoint. *Energy* 36, 2011. doi: 10.1016/j.energy.2010.05.002
- VISCARDI, T.B.; HAMMES, G.; SOUZA, E.D.; RODRIGUEZ, C.M.T; ROJAS, R.H.; MOJICA, J.C. Como melhorias simples impactam na Ecoeficiência do transporte rodoviário de cargas. 7th International Workshop Advances in Cleaner Production, Barranquilla – Colombia, 2018.
- VISCARDI, T. B. ; ALVES, A.L.K. ; BOUZON, M. ; SOUZA, E. D. . Modelo para avaliação da Ecoeficiência aplicado em uma empresa de transporte rodoviário de cargas. In: XXXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP), 2018, Maceio. Anais 2018, 2018.

- VERCALSTEREN, A.; SPRINCKX, GEERKEN, T. Life cycle assessment and ecoefficiency analysus of drinking cups used at public events. *International Journal of Life Cycle Assessment*.v.15, n.2. 2010.
- World Business Council for Sustainable Development - WBCSD. *Measuring Eco-efficiency. A Guide to Reporting Company Performace*. Geneva, Switzerland, 2000.
- World Business Council for Sustainable Development - WBCSD. *Biofuels Issue Brief*.Geneva, Switzerland, 2007.
- YOSHINO, D.; FUJIWARA, A.; ZHANG, J. *Environmental Efficiency Model Based on Data Envelopment Analysis and its Application to Environmentally Sustainable Transport Policies*. 89th Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington D.C., 2010.
- ZIOLKOWSKA J. R. ZIOLKOWSKI, B. Energy efficiency in the transport sector in the EU-27: A dynamic dematerialization analysis. *Energy Economics* 51, 2015. 21–30.

APÊNDICE I - Questionário para fins de pesquisa acadêmica

Disponível no link:

<https://docs.google.com/forms/d/1fn5YMXQEf8muZ0sZhfRzOwF9tkgrz6DqUP8/edit#responses>

TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO

Aceito contribuir de forma voluntária para o preenchimento deste questionário, que é parte da pesquisa intitulada **“Ecoeficiência no Transporte: Uma contribuição metodológica e interdisciplinar para o Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular”**, realizada pelo Engº Victor Gomes Simão (victorsimao@id.uff.br) em seu estudo de Doutorado, sob orientação do Prof. Dr. Osvaldo Luiz Gonçalves Quelhas e do Prof. Dr. Luis Alberto Duncan Rangel, na Escola de Engenharia da Universidade Federal Fluminense (UFF).

Sei que minha participação é livre, não obrigatória, podendo ser interrompida por minha decisão a qualquer momento, sem qualquer prejuízo.

Tempo estimado para resposta: 5 minutos.

As informações obtidas serão tratadas com confidencialidade e utilizadas exclusivamente para a realização desta pesquisa. Os dados consolidados desta pesquisa serão divulgados por meio da referida Tese de Doutorado.



Li e declaro meu consentimento.

Bloco1: Perfil do respondente

Antes de apresentarmos a proposta desta pesquisa, gostaríamos de conhecer um pouco mais sobre você, através de três perguntas simples:

1 - Setor onde atua?

- Indústria
- Governo
- Pesquisa / Ensino
- Prestação de serviços

2 - Cargo/posição que ocupa: _____

3 - Tempo de experiência profissional e/ou acadêmica neste setor:

- Menos de 1 ano
- Entre 2 e 5 anos
- Entre 6 e 10 anos
- Entre 11 e 20 anos
- Entre 21 e 30 anos
- Mais de 30 anos

A proposta desta pesquisa é desenvolver novos indicadores para o Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular (PBEV), que permitam levar ao consumidor informações relevantes que lhes auxiliem na decisão para a escolha de um veículo para transporte de cargas, de forma a maximizar os benefícios econômicos e ambientais do mesmo, através do uso da avaliação de Ecoeficiência.

Segundo a norma ISO 14045, a definição de Ecoeficiência é a combinação de dois aspectos da sustentabilidade: econômico e ambiental, relacionando o desempenho ambiental de um produto ao seu valor funcional.

A quantificação da Ecoeficiência deve ser conduzida com a utilização de indicadores que permitam comparar as alternativas disponíveis entre si.

Assim, para expressar o valor do desempenho funcional dos veículos, foram utilizados sua capacidade de transportar cargas, e para determinar os parâmetros ambientais, foram considerados os impactos ambientais oriundos das emissões e do consumo de energia, gerados pelos veículos destinados ao transporte de carga, participantes do PBEV.

Importante considerar que os veículos objeto desta pesquisa, para o estabelecimento de indicadores de Ecoeficiência, são somente aqueles pertencentes às categorias: veículos comerciais leves, picapes e picapes compactas.

Sendo a fórmula padrão para cálculo da Ecoeficiência definida na norma ISO 14045 por:

$$Ecoeficiência = \frac{\text{Valor funcional do sistema de produto}}{\text{Impacto ambiental}}$$

Os parâmetros e atributos selecionados para os indicadores de Ecoeficiência, nesta pesquisa, estão apresentados na tabela abaixo:

| Aspecto | Atributo | Parâmetro | Unidade |
|---------------------|--|--------------------------------------|----------------|
| Valor Funcional | Capacidade de carga | Peso transportado | kg |
| | Volume útil de carga | Volume transportado | m ³ |
| Impactos ambientais | Consumo de energia | Consumo energético combinado | MJ/km |
| | Emissão de Gases causadores de Efeito Estufa | Emissões em CO ₂ eq total | g/km |

Foram inicialmente propostos 4 Indicadores parciais de Ecoeficiência para a avaliação comparativa dos veículos de carga:

- Indicador 1 = Peso transportado/ Consumo energético combinado
- Indicador 2 = Peso transportado/ Emissões CO₂total
- Indicador 3 = Volume transportado/ Consumo energético combinado
- Indicador 4 = Volume transportado/ Emissões CO₂total

Bloco 2: Análise dos indicadores de Ecoeficiência

Considerando a proposta acima e a sua expertise no tema, pede-se que avalie cada um dos 4 indicadores propostos quanto aos seguintes atributos:

Com relação ao Indicador 1:

Ecoeficiência = Peso transportado/ Consumo energético combinado

1 - Qual é a sua pertinência para o cálculo da Ecoeficiência de um veículo para transporte de cargas?

- 1 - Nenhuma pertinência
- 2 - Baixa pertinência
- 3 - Pertinente
- 4 - Bastante pertinente
- 5 - Totalmente pertinente

2 - Qual a sua relevância enquanto informação para o consumidor, no âmbito do Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular?

- 1 - Nenhuma relevância para o consumidor
- 2 - Baixa relevância para o consumidor
- 3 - Relevante para o consumidor
- 4 - Bastante relevante para o consumidor
- 5 - Totalmente relevante para o consumidor

3 - Em uma escala de 1 a 5, como você pondera e classifica a importância relativa deste indicador, em comparação com os outros três indicadores propostos?

Obs.: Na escala, 1 se refere à menor importância e 5 à maior importância deste indicador.

- 2 3 4 5

Com relação ao Indicador 2:

Ecoeficiência = Peso transportado/ Emissão de CO₂Total

4 - Qual é a sua pertinência para o cálculo da Ecoeficiência de um veículo para transporte de cargas?

- 1 - Nenhuma pertinência
 2 - Baixa pertinência
 3 - Pertinente
 4 - Bastante pertinência
 5 - Totalmente pertinente

5 - Qual a sua relevância enquanto informação para o consumidor, no âmbito do Programa Brasileiro de Etiquetagem veicular?

- 1 - Nenhuma relevância para o consumidor
 2 - Baixa relevância para o consumidor
 3 - Relevante para o consumidor
 4 - Bastante relevante para o consumidor
 5 - Totalmente relevante para o consumidor

6 - Em uma escala de 1 a 5, como você pondera e classifica a importância relativa deste indicador, em comparação com os outros três indicadores propostos?

Obs.: Na escala, 1 se refere à menor importância e 5 à maior importância deste indicador.

- 2 3 4 5

Com relação ao Indicador 3:

Ecoeficiência = Volume transportado/ Consumo energético combinado

7 - Qual é a sua pertinência para o cálculo da Ecoeficiência de um veículo para transporte de cargas?

- 1 - Nenhuma pertinência

- 2 - Baixa pertinência
- 3 - Pertinente
- 4 – Bastante pertinência
- 5 – Totalmente pertinente

8 - Qual a sua relevância enquanto informação para o consumidor, no âmbito do Programa Brasileiro de Etiquetagem veicular?

- 1 - Nenhuma relevância para o consumidor
- 2 - Baixa relevância para o consumidor
- 3 – Relevante para o consumidor
- 4 – Bastante relevante para o consumidor
- 5 – Totalmente relevante para o consumidor

9 - Em uma escala de 1 a 5, como você pondera e classifica a importância relativa deste indicador, em comparação com os outros três indicadores propostos?

Obs.: Na escala, 1 se refere à menor importância e 5 à maior importância deste indicador.

- 1 2 3 4 5

Com relação ao Indicador 4:

$$\text{Ecoeficiência} = \text{Volume transportado} / \text{Emissão de CO}_2\text{Total}$$

10 - Qual é a sua pertinência para o cálculo da Ecoeficiência de um veículo para transporte de cargas?

- 1 - Nenhuma pertinência
- 2 - Baixa pertinência
- 3 - Pertinente
- 4 – Bastante pertinência
- 5 – Total pertinência

11 - Qual a sua relevância enquanto informação para o consumidor, no âmbito do Programa Brasileiro de Etiquetagem veicular?

- 1 - Nenhuma relevância para o consumidor
- 2 - Baixa relevância para o consumidor
- 3 – Relevante para o consumidor
- 4 – Bastante relevante para o consumidor
- 5 – Totalmente relevante para o consumidor

12 - Em uma escala de 1 a 5, como você pondera e classifica a importância relativa deste indicador, em comparação com os outros três indicadores propostos?

Obs.: Na escala, 1 se refere à menor importância e 5 à maior importância deste indicador.

- 1 2 3 4 5

13- Você teria alguma outra proposta ou sugestão de possíveis indicadores que permitam avaliar, de forma consistente, a Ecoeficiência de um veículo?

Agradecemos pela sua disponibilidade e colaboração!

Apêndice II – Respostas abertas obtidas para a 13ª questão do questionário

13. Você teria alguma outra proposta ou sugestão de indicadores que permitam avaliar, de forma consistente, a Ecoeficiência de um veículo?³³

respostas

1. Não
2. Não tenho outra sugestão. Acredito que o peso transportado x consumo energético seja o melhor parametro.
3. Nenhuma sugestão
4. Capacidade de carga / l/100km pode ser uma indicador mais fácil entendimento para frotistas na hora de comparar entre veículos. Com o valor R\$ do litro de combustível é possível calcular rapidamente o custo/km
5. Não, achei muito bom!
6. Não necessariamente nova proposta, mas a adequação dos indicadores ao tipo de carga e serviço, considerando aqui apenas transporte de carga. Por exemplo, indicadores que considerem peso teriam relevância maior no transporte de média/longa distância, enquanto que indicadores de volume para o setor de "delivery" ou entregas urbanas. A grosso modo, na realidade brasileira de grande demanda no agrobusiness e na mineração, a carga tende a ter o peso como fator mais importante. Já no delivery, os volumes são mais relevantes.
7. Uma outra variável que poderia ser utilizada é uma anterior ao valor funcional, os dados dos impactos durante o processo produtivo, mas estes seriam mais complexos Um ciclo de emissões/consumo(FTP75 + Highway) com o veículo carregado(PBT) não somente com massa em ordem de marcha +136, automaticamente novo coas-down com veículo carregado. O atual parâmetro com veículo carregado apenas com +136 para veículos comerciais leves não é fiel para indicar o consumo se tratando de um veículo de trabalho que vai operar na maioria do tempo carregado cheio. Porém encareceria a toda fabricamente o processo de homologação, talvez inicialmente como opcional na legislação.
8. Não. Bruno Braz Leal
9. Peso transportado[kg] / Consumo [km/l] Acredito que o consumidor desse tipo de veículo tenha interesse em saber o consumo em km/l do veículo vs capacidade de transportar cargas.
10. Os indicadores são interessantes. Não tenho muito a acrescentar.
11. Garantir a qualidade do combustível vendido nos postos. Isso influencia o resultado das emissões.
12. Não, entendo que os indicadores propostos são adequados à pesquisa.
13. Sem sugestões.
14. Indicador 2: peso/emissão: sugiro um indicador direto consumo/emissão. Consumo dependerá do peso, que influenciará emissão. Seria uma ligação entre os indicadores 1 e 2 (o mesmo se aplica para 3 e 4). É uma informação mais direta para o consumidor: de acordo com o peso da carga, qual seria o consumo e, conseqüentemente, a emissão, de acordo com o combustível utilizado (gasolina, GNV, biocombustível).

15. Unir consumo a emissões e salientar emissão, posto que é um indicador de Ecoeficiência, é bastante relevante.
16. Não
17. Acredito que os indicadores sugeridos alinhados com uma boa prática de divulgação e instrução atende com sucesso o objetivo requerido.
18. Não. Acredito que o consumo energético expressos em megajoules por quilômetro (MJ/Km) seja o indicador mais adequado.
19. SIM, a proposta acima é simples para veículos comerciais leves e pesados porém me preocupo com a futura entrada de assistência elétrica em implementos... seria aditivo do Energético combinado?
20. NA
21. keep good work
22. Pensando no público, peso carregado por litro de combustível seria um indicador interessante também!
23. intensidade de carbono: kg de CO₂e/t.km
24. Não para o momento
25. Em minha opinião, Eficiência pressupõe uma relação entre energia investida versus energia útil para a realização do processo, desta forma proponho a elaboração de uma curva gráfica: kg transportados em função da eficiência energética do veículo, isto mostraria ao consumidor o quão "bom" o veículo é para transporte de carga e eliminaria a necessidade de demonstrar o consumo de combustível/km uma vez que este já faz parte da eficiência energética do veículo.
26. Não neste momento, eventualmente poderei enviar por email alguma outra sugestão
27. Talvez, potência disponibilizada por consumo energético. Creio que deva ser afim das características percebidas pelo comprador deste tipo de veículo.
28. Nada a acrescentar
29. Como medida de eficiência no transporte de carga, seria relevante o consumo em km/l totalmente carregado ou com 80% do PBT.
30. Acredito que também deve ser levado em conta o custo de implementação de nova tecnologia para redução de consumo energético e emissões e sua diluição no custo do produto final. Visando evitar que o Consumidor, de menor poder aquisitivo, comece a não alcançar certos bens de consumo pelo aumento do processo do produto final, mais avançado tecnologicamente nos quesitos elencados.
31. Vida útil, Descartes em manutenções/período
32. Não