CEFET/RJ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

EMISSÕES DIRETAS DE CO_2 EQUIVALENTE E DE GASES POLUENTES NO CICLO DE VIDA DO BIOMETANO E BIODIESEL EM ÔNIBUS URBANOS

Jéssica Manso Machado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção e Sistemas.

Orientador (a): Ronney Arismel Mancedo Boloy

Rio de Janeiro
Agosto de 2020

EMISSÕES DIRETAS DE CO_2 EQUIVALENTE E DE GASES POLUENTES NO CICLO DE VIDA DO BIOMETANO E BIODIESEL EM ÔNIBUS URBANOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção e Sistemas.

Jéssica Manso Machado

Banca Examinadora:

_____

Presidente, Professor Dr. Ronney Arismel Mancebo Boloy (CEFET/RJ, Brasil) (orientador)

_____

Professor Dr. Daduí Cordeiro Guerrieri (CEFET/RJ, Brasil)

_____

Professor Dr. Gilmar Clemente Silva (UFF, Brasil)

_____

Professor Dr. Marcelo Borges Rocha (CEFET, Brasil)

Rio de Janeiro

Agosto de 2020

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

AGRADECIMENTOS

À Deus, por ter me guiado em todos os momentos e permitido que eu chegasse até aqui, com saúde e disposição, apesar dos percalços no caminho.

Aos meus pais, Ubirajara e Fátima, pelo carinho, amor e apoio durante toda a minha vida, principalmente durante a elaboração dessa dissertação.

Ao meu irmão, Ubirajara, pelo apoio e pelas aulas de Matemática e Física no ensino médio, que contribuíram para a minha formação de engenheira e de mestre.

Ao meu namorado, pelo amor, apoio, paciência e carinho.

Ao meu orientador, professor Ronney Arismel Mancebo Boloy, por ter aceitado me orientar e por ter contribuído para minha formação de mestre.

Ao Departamento do Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, principalmente ao professor Augusto da Cunha Reis, pela atenção e pelo comprometimento em me ajudar.

Ao financiamento da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior).

RESUMO

Emissões Diretas de CO_2 equivalente e de Gases Poluentes no ciclo de vida do biometano e biodiesel em Ônibus Urbanos

O uso dos combustíveis fosséis embora tenha auxiliado a evolução dos processos industriais, trouxe danos ao meio ambiente, como a emissão exacerbada de gases do efeito estufa, que são poluentes e contribuem diretamente para o aquecimento global. Dessa forma, os combustíveis renováveis como biometano e biodiesel surgem como uma alternativa promissora na tentativa de diminuir esses impactos ambientais. Ainda, o setor de transporte, em especial o rodoviário, é um dos maiores responsáveis pela emissão desses gases poluentes, uma vez que a mobilidade desempenha um papel importante economica e socialmente. Assim, um dos objetivos desse trabalho é analisar, para o ano de 2018, as emissões de CO_2 equivalente do biodiesel produzido a partir do óleo residual, coletado na cidade de Volta Redonda (RJ) e do biometano oriundo dos resíduos sólidos urbanos destinados para o Centro de Tratamento de Resíduos da cidade de Barra Mansa (RJ), bem como avaliar o consumo desses em uma frota de ônibus e suas respectivas emissões.

Como metodologia para o cálculo das emissões de CO_{2eq} e dos gases poluentes emitidos pelos ônibus, utilizou-se os princípios fundamentais da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), com unidade funcional de tonelada de CO_{2eq}/ tonelada de combustível produzido, focando nas etapas de transporte de matéria-prima, produção do combustível e transporte do combustível até o ponto de abastecimento dos ônibus e os resultados encontrados para essas etapas foram, respectivamente: 0,007 t CO_{2eq}/ t biometano e 0,0186 t CO_{2eq}/ t biodiesel; 2,14 t CO_{2eq}/t biometano e 0,0003t CO_{2eq}/ t biodiesel; 0,0032 t CO_{2eq}/ t biometano e 0,00023 t CO_{2eq}/ t biodiesel, demonstrando que, em comparação ao diesel, a produção do biometano emite mais CO_{2eq} e a do biodiesel, menos. Para o consumo dos biocombustíveis nos ônibus, calculou-se a vazão para os cenários analisados e observou-se que somente o cenário que considerava a mistura de diesel e biometano apresentou-se viável, com as vazões sendo de 63,54 l/h para o diesel e 254,16 l/h para o biometano. Contudo, ao se calcular as emissões dos

gases poluentes, percebeu-se que esse cenário emite uma quantidade superior em comparação à utilização do diesel nos ônibus, demonstrando que o biometano é inviável ambientalmente como combustível para ônibus. Já para o biodiesel, o cálculo da vazão, 56,68 l/h, demonstrou que a produção anual desse combustível não consegue abastecer a frota; entretanto, se fosse produzida quantidade suficiente de biodiesel, o uso desse biocombustível no motor dos ônibus emitiria menos gases poluentes. Assim, esse estudo buscou analisar as emissões de CO_{2eq} e de gases poluentes, demonstrando que, ao se avaliar o ciclo de vida e o consumo de biocombustíveis em uma frota de ônibus, o biodiesel se destaca como principal alternativa ao diesel, já que apresentou uma menor emissão desses gases.

Palavras-chave: Biometano; biodiesel; gases do Efeito Estufa; emissões; transporte urbano.

ABSTRACT

CO_2 equivalent and Polluting Gases direct emissions in the life cycle of biomethane and biodiesel and in combustion in urban buses in the cities of Volta Redonda and Barra Mansa

Although the use of fossil fuels has helped the evolution of industrial processes, it has caused damage to the environment, such as exacerbated greenhouse gases emissions, which are polluters and directly contributed to Global Warming. Thus, renewable fuels such as biomethane and biodiesel, appear as a promising alternative in an attempt to reduce these environmental impacts. Moreover, the transport sector (especially road) is one of the most responsible for emission of these polluting gases, since mobility plays an important economic and social role. Thereby, one of the objectives of this work is to analyze CO_2 equivalent emissions in the biodiesel produced from the residual oil, collected in Volta Redonda (RJ) and in the biomethane from the urban waste allocated in Waste Treatment Center in Barra Mansa (RJ), as well as evaluating the consuming of these in a fleet of buses and their respective emissions.

The methodology for calculating CO_{2eq} emissions and polluting gases emitted by buses was based on fundamental principles of Life Cycle Assessment (LCA), with ton CO_{2eq} / ton fuel produced as funtional unit, focusing on the stages of raw material transport, fuel production and fuel transportation to the buses supply point, and the results found for these stages were, respectively: 0.007 t CO_{2eq} / t biomethane and 0.0186 t CO_{2eq} /t biodiesel; 2.14 t CO_{2eq} / t biomethane and 0.0003t CO_{2eq} / t biodiesel; 0.0032 t CO_{2eq} / t biomethane and 0.00023 t CO_{2eq} / t biodiesel, proving that the biomethane's production emits more CO_{2eq} and biodiesel's less than diesel's production. For the consumption of biofuels in buses, the flow rate was calculated for the analyzed scenarios and the one that considered the mixture of diesel and biomethane was the only viable, with the flow rates 63.54 l / h for diesel and 254.16 l / h for biomethane. However, it was noticed that this scenario emits more polluter gases than diesel, showing that biomethane is environmentally unviable as a fuel for buses. The biodiesel flow calculation, 56.68 l/h, demonstrated that the annual production of this fuel

cannot supply the fleet. Nevertheless, if enough biodiesel were produced, the use of this biofuel in the bus engine would emit less polluting gases. Thus, this study analyzed CO_{2eq} and polluting gases emissions, showing that, when assessing the life cycle and consumption of biofuels in a bus fleet, biodiesel stands out as the best alternative to diesel, with a lower emission of these gases.

Keywords: biomethane; biodiesel; greenhouse gases; emission; urban transport

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema do Efeito Estufa na Terra. 22
Figura 2 - Divisão por tipo de transporte do PSTM. 27
Figura 3 - Composição de dreno de gás em aterro sanitário. 39
Figura 4 - Transesterificação para produção de biodiesel. 49
Gráfico 1 - Matérias-primas utilizadas na produção de biodiesel (B100) 55
Figura 5 - Sistema de propulsão convencional 61
Figura 6 - Sistema híbrido em série 61
Figura 7 - Sistema híbrido em paralelo 62
Figura 8 - Etapas da Avaliação do Ciclo de Vida para os combustíveis. 70
Figura 9 - Gráfico que apresenta a série histórica com número de ônibus circulantes em Volta Redonda. 84
Gráfico 2 - Percentual de tipo de veículos circulantes de Volta Redonda em 2018 84
Figura 10 - Etapas da ACV para os combustíveis analisados 87
Figura 11 - Ciclo de vida da produção de biometano a partir do RSU. 88
Figura 12 - Distância total entre a CESBRA e o CTR 95
Figura 13 - Distância do CTR até o ponto de abastecimento hipotético. 95
Figura 14 - Distância da CESBRA até o ponto de abastecimento hipotético 96
Figura 15 - Ciclo de vida do biodiesel a partir do óleo residual. 97
Gráfico 1 - Matérias-primas utilizadas na produção de biodiesel (B100) 55
Gráfico 2 - Percentual de tipo de veículos circulantes de Volta Redonda em 2018 84
Gráfico 3 - Contribuição em porcentagem para cada GEE do somatório de CO_{2eq} 110
Gráfico 4 - Percentual das emissões de CO_{2eq} para o ciclo de vida do biometano 111
Gráfico 5 - Percentual de emissão para cada GEE analisado 119
Gráfico 6 - Emissões de CO_{2eq} para o ciclo de vida de produção do biodiesel 121
Gráfico 7 - Comparação das emissõs de CO_{2eq} (em t) das etapas de produção dos combustíveis 123
Gráfico 8 - Comparação das emissões na produção dos combustíveis 124
Gráfico 9 - Comparação das emissões nas etapas de transporte dos biocombustíveis 124
Gráfico 10 - Emissão total de gases na utilização de diesel nos ônibus para 2018 128

Gráfico 11 - Porcentagem das emissões no uso de biometano e diesel nos ônibus para 2018 129
Gráfico 12 - Comparação entre as demandas exigidas para abastecer o motor 130
Gráfico 13- Emissão total por poluente para cada cenário 132

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Mudanças antropogênicas na concentração de alguns GEE 23
Quadro 2 - Principais tratamentos do RSU 34
Quadro 3 - Sistemas constituintes de um aterro sanitário 38
Quadro 4 - Consumo em km/l para cada tipo de veículo 57
Quadro 5 - Características do óleo diesel S-10 58
Quadro 6 - Tipos de ônibus circulantes no Rio de Janeiro. 60
Quadro 7 - Emissão de CO_2 a partir do combustível utilizado e do tipo de ônibus 63
Quadro 8- Poder Calorífico Inferior para biometano, biodiesel e diesel 65
Quadro 9 - Eficiência Térmica para os combustíveis analisados 65
Quadro 10 - Gases do Efeito Estufa e seu valor para GWP 71
Quadro 11 - Fatores de emissão para a gasolina e diesel 75
Quadro 12 - Parâmetros para as equações das emissões CO_2 77
Quadro 13 - Fatores de emissão para cada combustível 78
Quadro 14 - Tipo de veículos circulantes em Volta Redonda em 2018. 83
Quadro 15 - Distâncias percorridas pelos veículos das empresas. 86
Quadro 16 - Rotas dos caminhões nos setores 1,2, 3, 4, 12. 89
Quadro 17 - Rotas dos caminhões nos setores 5, 6, 7, 8, 9B, 10B, 13. 90
Quadro 18 - Rotas dos caminhões nos setores 9, 10, 11 e 11B. 91
Quadro 19 - Rotas dos caminhões no setor 14. 91
Quadro 20 - Parâmetros para determinar o biometano gerado no ano de 2018 93
Quadro 21 - Emissão de CO_{2eq} encontrada por Borba et al. 94
Quadro 22 – Distância percorrida e quantidade de gasolina utilizada pelos utilitários da Ecoóleo. 99
Quadro 23 - Distância percorrida e quantidade de gasolina utilizada pelos utilitários da Óleo Local. 100
Quadro 24 - Distância dos postos de armazenagem até a CESBRA e a quantidade de gasolina utilizada pelos veículos utilitários. 101
Quadro 25 - Parâmetros para o cálculo de produção de biodiesel 103
Quadro 26 - Emissões para o ciclo de vida do diesel 106
Quadro 27 - Emissão de CO_2 no transporte do RSU 107

Quadro 28 - Quantidade de CO_{2eq} em função de biometano gerado 108
Quadro 29 – Quantidade de diesel utilizada para transporte do biometano 109
Quadro 30 - Emissão de CO_{2eq} no transporte do biometano 109
Quadro 31 - Quantidade de CO_{2eq} em função de biometano gerado 109
Quadro 32 - Emissões totais na ACV do biometano 110
Quadro 33 - Emissão de CO_2 para primeira etapa do ACV do biodiesel 112
Quadro 34 - Emissão de N_2O para primeira etapa do ACV do biodiesel 113
Quadro 35 - Emissão de CH_4 para primeira etapa do ACV do biodiesel 113
Quadro 36 - Emissões de CO_{2eq} por empresa para a etapa de transporte 114
Quadro 37 - Emissões de CO_{2eq} no transporte do óleo residual até os postos de armazenagem 114
Quadro 38 - Emissão de CO_2 para segunda etapa do ACV do biodiesel 115
Quadro 39 - Emissão de N_2O para segunda etapa do ACV do biodiesel 115
Quadro 40 - Emissões de CH_4 no transporte do óleo residual para a CESBRA 115
Quadro 41 - Análise das emissões totais por empresa para a segunda etapa de transporte 116
Quadro 42 - Emissões de CO_{2eq} no transporte do óleo residual até os postos de armazenagem 116
Quadro 43 - Total das emissões de CO_{2eq} na produção do biodiesel 117
Quadro 44 - Quantidade de diesel utilizada no transporte do biodiesel 118
Quadro 45 - Emissão de CO_{2eq} no transporte do biodiesel 118
Quadro 46 - Resumo para as emissões de GEE e CO_{2eq} para o ciclo de vida do biodiesel 119
Quadro 47 - Balanço de emissões de CO_2eq nas duas primeiras etapas de transporte do óleo residual 120
Quadro 48 - Emissão de CO_{2eq} em diversos estudos 125
Quadro 49 - Vazão do motor dual para os cenários analisados 126
Quadro 50 - Demanda anual dos ônibus de Volta Redonda 127
Quadro 51 - Emissões totais dos gases poluentes para cada cenário 128
Quadro 52 - Emissão total dos gases poluentes (CO_2, CO, NOx, HC e MP) para todos os cenários 131
Quadro 53 - Estudos que analisaram as emissões da mistura biogás-diesel 134

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANP	Agência Nacional do Petróleo
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
APROBIO	Associação dos Produtores de Biodiesel do Brasil
BEN	Balanço Energético Nacional
BM	Banco Mundial
B100	Biodiesel puro
CBIOS	Certificados de Descarbonização
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CSN	Companhia Siderúrgica Nacional
COP	Conferência das Partes
COPPE/UFRJ	Coordenação de Pós-graduação e Pesquisa em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CTR	Centro de Tratamento de Resíduos
DA	Digestão anaeróbia
DBO	Demanda bioquímica de oxigênio
DETRAN- RJ	Departamento Estadual de Trânsito do Rio de Janeiro
DFDE	*Dual Fuel Diesel Engine*
EPA	*Environmental Protection Agency*
FISPQ	Ficha de Informações de Segurança de Produto Químico
FC	Fator de Consumo
FE	Fatores de emissão
GEE	Gases do Efeito Estufa
GNV	Gás Natural Veicular

GWP *Global Warming Potential*

GRI *Global Reporting Initiative*

HFCs Hidrofluorcarbonos

ISE Índice de Sustentabilidade Empresarial

INC/FCCC Comitê Intergovernamental de Negociação para a Convenção-Quadro sobre Mudança do Clima

INEA Instituto Estadual do Ambiente

IPCC Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas

ISE Índice de Sustentabilidade Empresarial

ISO *International Organization for Standardization*

ISS Estação Espacial Internacional

MCI Motor de Combustão Interna

MDL Mecanismo de Desenvolvimento Limpo

MIT *Massachusetts Institute of Technology*

MP Materiais particulados

OHSAS *Occupational Health and Safety Assessment Series*

ONU Organização das Nações Unidas

OCDE Organização para Cooperação e o Desenvolvimento Econômico

P&D Pesquisa e Desenvolvimento

PFCs Perfluorcarbonos

PNMC Política Nacional sobre Mudança do Clima

PNRS Política Nacional de Resíduos Sólidos

PNQ Prêmio Nacional da Qualidade

PCI Poder calorífico inferior

PCS Poder calorífico superior

MME Ministério de Minas e Energia

NASA *National Aeronautics and Space Administration*

PSTM Plano Setorial de Transporte e de Mobilidade Urbana para Mitigação da Mudança do Clima

PROCONVE Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores

RLU Resíduos de limpeza urbana

RSC Resíduos sólidos comerciais

RSD Resíduos sólidos domésticos

RSU Resíduos sólidos urbanos

UE	União Européia
URE	Usinas de recuperação energética

LISTA DE SÍMBOLOS

CO_2	Dióxido de carbono
CH_4	Metano
N_2O	Óxido nitroso
SF_6	Hexafluoreto de enxofre
PFC	Perfluorcarbonos
HFC	Hidrofluorcarbonos
NF_3	Trifluoreto de nitrogênio
t	Tonelada
G	Giga
CO_{2eq}	Dióxido de carbono equivalente
M	Mega
CO	Monóxido de carbono
NO_x	Óxidos de nitrogênio
HC	Hidrocarbonetos
MP	Material particulado
mg	Miligrama
SO_2	Dióxido de enxofre
l	litros
m^3	metros cúbicos
km	kilometros
ppm	partes por milhão
ppb	partes por bilhão
g	gramas
k	kilo
rpm	rotações por minuto
m	metros

ET	Eficiência Térmica
V_c	Vazão do combustível *c*
kW	Potência do motor
PCI	Poder calorífico inferior
J	Joule
h	hora
Q_j	Quantidade do combustível *j*
FE_{ji}	Fator de emissão do combustível *j* para o gás i
$Emiss_{ki}$	Emissão total do gás i para a mistura k
tEP	tonelada equivalente de petróleo
F_{conv}	Fator de conversão
F_{corr}	Fator de correção

SUMÁRIO

Introdução **20**

1 Fontes alternativas de energia **33**

1.1 Resíduos Sólidos Urbanos 33

1.1.1 Aterro Sanitário 36

1.1.1.1 Métodos Construtivos de um aterro 37

1.1.1.2 Sistemas de extração e tratamento do biogás 39

1.2 Óleo Residual 41

2. Biocombustíveis **43**

2.1 Biogás e biometano 43

2.1.1 Digestão Anaeróbia para geração de biogás e biometano 43

2.1.2 Uso do biogás e biometano 45

2.1.3 Cenário Internacional 45

2.1.4 Cenário Nacional 47

2.2 Biodiesel 47

2.2.1 Produção do biodiesel a partir do óleo residual 48

Os catalisadores são fatores importantes para esse processo, na medida que essas substâncias influenciam na velocidade e na temperatura da transesterificação (DIAS, FERREIRA e CUNHA, 2012). Esses podem ser divididos em catalisadores ácidos e catalisadores básicos. O primeiro citado, como por exemplo os ácidos sulfúricos e sulfônicos, não sofrem interferência de água ou outras impurezas como sólidos presentes no óleo residual, possibilitando o uso de matérias-primas de menor valor agregado no processo, necessitando porém de condições de trabalho mais enérgicas em relação à alcoólise em meio alcalino RAMOS et al (2011). Já os catalisadores básicos, como hidróxido de sódio e hidróxido de potássio, tem como característica principal aumentar a velocidade da reação quando comparada à catálise ácida (GUIMARÃES, 2019). 50

2.2.2 Uso do biodiesel 51

2.2.3 Cenário internacional 52

2.2.4 Cenário Nacional 54
3. Consumo de combustíveis 57
3.1 Tipos de ônibus 59
3.2 Motor de combustão interna 63
4. Avaliação do Ciclo de Vida e CO_2 equivalente 67
4.1 Dióxido de carbono equivalente 70
4.1.1 Cálculo das emissões de CO_{2eq} e emissões dos gases poluentes 71
4.1.1.1 Método *top-down* 72
4.1.1.2 Método *bottom-up* 72
4.1.2 Unidade Funcional e fatores de emissão 74
4.1.2.1 Fatores de emissão 75
5. Estudo de Caso 79
5.1 Breve Histórico de Barra Mansa e Volta Redonda 79
5.1.1 Centro de Tratamento de Resíduos de Barra Mansa 81
5.2 Coleta de óleo residual e produção do biodiesel em Volta Redonda 82
5.3 Transporte urbano em Volta Redonda 83
5.3.1 Ônibus em Volta Redonda 85
6. Avaliação do Ciclo de vida para o biometano e biodiesel 87
6.1 Avaliação do Ciclo de Vida para o biometano 88
6.1.1 Transporte de RSU até o CTR 88
6.1.2 Produção do biometano a partir da matéria orgânica presente no RSU 92
6.1.3 Transporte do biometano até o ponto de abastecimento 94
6.1.4 Combustão do biometano no motor dos ônibus 97
6.2 Avaliação do Ciclo de Vida para o biodiesel 97
6.2.1 Transporte desde estabelecimentos que coletam o óleo residual até os postos de armazenagem 98
6.2.2 Transporte desde os postos de armazenagem até a fábrica de produção do biodiesel 100
6.2.3 Produção do biodiesel 102
6.2.4 Transporte do biodiesel até o posto de abastecimento 104
6.2.5 Combustão do biodiesel no motor dos ônibus 104
6.3 ACV para o diesel 105
6.3.1 Extração do petróleo 105
6.3.2 Transporte de petróleo estrangeiro 105

6.3.3 Refino do petróleo e geração de energia para destilação fracionada 106
7. Resultados e Discussão 107
7.1 Emissões de CO_{2eq} no ciclo de vida do biometano 107
7.1.1 Transporte do RSU até o CTR 107
7.1.2 Produção do biometano a partir da matéria orgânica presente no RSU 108
7.1.3 Transporte do biometano até o ponto de abastecimento 108
7.1.4 Comparação das emissões totais no ACV completa do biometano 110
7.2 Balanço de emissão de CO_{2eq} no ciclo de vida do biodiesel 111
7.2.1 Transporte desde os estabelecimentos até os postos de armazenagem do óleo residual 112
7.2.2 Transporte desde os postos de armazenagem até a fábrica de produção do biodiesel 114
7.2.3 Produção do biodiesel 116
7.2.4 Transporte do biodiesel até o ponto de abastecimento 117
7.2.5 Comparação das emissões totais no ACV completa do biodiesel 119
7.3 Comparação das emissões anuais da ACV do biometano, biodiesel e diesel 122
8. Consumo e emissão dos biocombustíveis nos ônibus 126
8.1 Emissão para os cenários 1 e 4 128
8.2 Emissão hipotética para os cenários 2, 3, 5 e 6 130
Considerações finais 135
Referências Bibliográficas 137

Introdução

A utilização dos recursos naturais permitiu a evolução dos meios produtivos, principalmente no tocante ao uso de combustíveis fósseis, com destaque para os inúmeros usos do petróleo. Esse combustível fóssil é um óleo inflamável formado durante milhões de anos a partir da decomposição de matéria orgânica como plantas, animais marinhos e vegetação típica das regiões alagadiças e é encontrado apenas em terreno sedimentar, sendo composto por carbono e hidrogênio, à qual podem se juntar átomos de oxigênio, nitrogênio e enxofre (ANEEL, 2018).

O petróleo vem sendo utilizado desde a antiguidade, surgindo de maneira natural em diversas localidades, com destaque para as regiões que hoje correspondem ao Oriente Médio. Inicialmente foi utilizado de diferentes modos, como em embalsamentos, lubrificação das rodas de carruagens e até na medicina, já que possui, além de características cicatrizantes e antisépticas, propriedades que auxiliavam no tratamento de surdez e de problemas respiratórios (ANEEL, 2018). Contudo, o petróleo começou a ser explorado como combustível somente no século XIX, com a criação dos motores movidos a gasolina e a óleo diesel, o que possibilitou o crescimento industrial e acelerou a urbanização (MBP, 2014). Com o passar dos anos, novas tecnologias foram criadas e novos derivados do petróleo foram surgindo, como por exemplo, o gás liquefeito, conhecido também como gás de cozinha; querosene de aviação e de iluminação; asfalto; lubrificante; combustível marítimo; solventes e parafinas (ANEEL, 2018).

Pode se dizer então que a indústria petrolífera modificou a economia, a sociedade e o meio ambiente, configurando um novo ciclo econômico, que acelerou o crescimento das cidades e o processo de urbanização, principalmente através da expansão dos meios de transporte e do aumento da facilidade da comunicação global (JUSBRASIL, 2016). Porém, essa intensa utilização do petróleo atingiu não só as esferas econômicas e sociais, mas também a ambiental. Essa última esfera merece destaque, já que o uso desenfreado dos recursos desse combustível fóssil vem causando inúmeros impactos ambientais,

principalmente no tocante ao aumento das emissões de gases poluentes oriundos da queima dos combustíveis oriundos do petróleo. Esses gases, denominados Gases do Efeito Estufa (GEE), compreendem: dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), hexafluoreto de enxofre (SF_6), as famílias dos perfluorcarbonos (PFCs), hidrofluorcarbonos (HFCs), trifluoreto de nitrogênio (NF_3), e ainda, éteres halogenados e outros halocarbonetos. As consequências das sucessivas emissões desses gases causam o Aquecimento Global, fenômeno conhecido por intensificar as ações do Efeito Estufa, afetando todo o planeta e comprometendo irreversivelmente o equilíbrio dos ecossistemas (DULLIUS et al, 2017).

O Efeito Estufa nada mais é do que o aquecimento do planeta Terra. Historicamente, Jean Baptiste Fourier foi o primeiro cientista a tornar o conceito de temperatura planetária um objeto de estudo da ciência. Assumindo que o Sol é a principal fonte de energia para Terra, Fourier raciocinou que se a Terra recebe energia do Sol, essa também deve reemitir energia de volta para o espaço, pois, de outro modo, ela se tornaria cada vez mais quente. Assim, para a Terra e também para os demais planetas, deve existir uma temperatura de equilíbrio para a qual a taxa de energia absorvida é igual à taxa de energia emitida (JUNGES et al, 2018).

Desse modo, ao nível do nosso sistema solar, a única forma de transferência de energia entre o Sol e seus planetas ocorre na forma de ondas eletromagnéticas. O fluxo ou intensidade de energia solar que chega ao planeta depende de diversos fatores como, por exemplo, a luminosidade do Sol e da distância do planeta a esse astro; gravidade; vento solar e campo magnético. Entretanto, nem toda energia solar incidente sobre o planeta é absorvida; geralmente, uma parte dessa energia é refletida de volta para o espaço pela atmosfera e pela superfície do planeta. Como pode se observado na Figura 1, a maior parte da radiação visível proveniente do Sol entra no sistema terrestre e, uma vez aquecida, a Terra reemite para o espaço radiação infravermelha que, por sua vez, é absorvida pelos GEE. Após absorverem essa radiação, esses reemitem novamente radiação infravermelha em todas as direções, sendo que parte dessa é perdida para o espaço e parte é retida na baixa atmosfera (JUNGES et al, 2018).

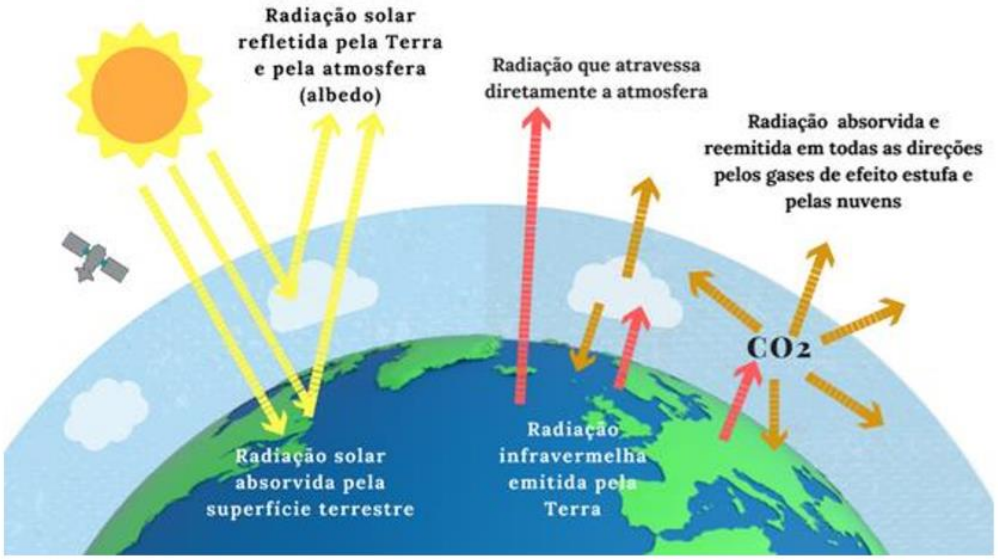


Figura 1 - Esquema do Efeito Estufa na Terra.

Fonte: JUNGES et al, 2018

A consequência da presença dos GEE é de que a radiação infravermelha tem seu caminho para o espaço obstruído, ou seja, esses gases inibem a perda de radiação infravermelha para o espaço tornando a baixa atmosfera mais quente do que estaria na ausência desses gases, contribuindo para manter a temperatura da Terra (JUNGES et al, 2018).

Assim, o Efeito Estufa é um processo natural essencial para a vida no planeta, mas não é imutável e mudanças na composição química da atmosfera implicam em mudanças no próprio fenômeno. O aumento das emissões dos GEE ocasiona um aquecimento da atmosfera, uma vez que esses gases absorvem maior quantidade de radiação infravermelha emitida pela Terra, reemitindo uma maior parte de volta para a superfície terrestre, aumentando, dessa forma, a temperatura da Terra, fenômeno conhecido como Aquecimento Global. (JUNGES et al, 2018).

Inúmeros estudos acadêmicos demonstram que a partir da revolução industrial, a composição química da atmosfera foi modificada consideravelmente. O Quadro 1 apresenta as concentrações naturais e as alterações antropogênicas dos principais gases de Efeito Estufa (JUNGES et al, 2018).

Quadro 1 - Mudanças antropogênicas na concentração de alguns GEE

Concentração em ppb de alguns GEE a partir das mudanças antropogênicas		
GEE	**Ano**	
	1850	**2018**
CO_2	280.000	385.000
CH_4	800	1775
N_2O	280	320

Fonte: Adaptado de JUNGES et al (2018)

Segundo a NASA (2018), o vapor d'água é responsável por 50% do Efeito Estufa, as nuvens contribuem com 25%, o CO_2 com 20% e os demais GEE com 5%. Embora o vapor d'água contribua com 50%, o CO_2 merece destaque já que é um gás não condensável, podendo permanecer por centenas de anos na atmosfera. Além disso, evidências provenientes de cilindros de gelo da Antártica e da Groenlândia, obtidos através da perfuração dos mantos de gelo, conhecidos como testemunhos de gelo, têm revelado que o CO_2 está diretamente correlacionado com as eras do gelo. Estudos com esses testemunhos de gelo permitiram voltar 400 mil anos no tempo, cobrindo quatro eras glaciais, onde foi evidenciado que há uma forte correlação entre os níveis de CO_2 e a temperatura: um alto nível de CO_2 está acompanhado de uma temperatura alta, como observado no período interglacial; por sua vez, um nível de CO_2 baixo, está acompanhado de uma temperatura baixa, englobando o período glacial. Essas evidências demonstram que o dióxido de carbono contribui decisivamente para história climática da Terra (WEART, 2019).

Dessa maneira, o CO_2 apresenta suma importância na regulação da temperatura da Terra e, conseqüentemente, no Aquecimento Global. Como descrito por Lacis et al. (2010), o CO_2 é o principal botão de controle do termostato terrestre e o estudo de ações de mitigação da sua emissão deve ser conduzido.

Complementarmente, o IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas) tem atestado que as evidências científicas são suficientemente fortes para afirmar que o aquecimento observado tem como causa dominante as emissões antropogênicas de gases estufa. Apesar de alguns fatores naturais também contribuírem para o aquecimento do clima, como por exemplo, a influência do Sol, efeitos de erupções vulcânicas e ciclos orbitais,

evidências científicas demonstram que esses fatores naturais não são capazes de explicar o aumento da temperatura registrado nas últimas quatro décadas (IPCC, 2014).

Esse aumento da temperatura da Terra ocasiona aquecimento dos oceanos, aumento do nível do mar, derretimento no gelo do Ártico e muitos outros efeitos climáticos associados. Ainda, estimativas indicam que estas alterações poderão ser catastróficas diante da contínua tendência de aumento da população mundial. Além disto, efeitos advindos destas catástrofes estão sendo considerados um grande problema de saúde pública devido aos danos à saúde das populações (DULLIUS et al, 2017).

Na década de 1980, evidências científicas relacionando as emissões de gases de efeito estufa provenientes das atividades humanas à mudança do clima global começaram a despertar a preocupação pública. Em 1983 foi formada a Comissão Internacional do Meio Ambiente e Desenvolvimento, que deu origem ao relatório denominado "*Our Commom Future"*, que só foi concluído e publicado em 1987. Esse relatório foi de suma importância, na medida que amplificou o conceito de desenvolvimento, ressaltando a necessidade de promover o desenvolvimento sem comprometer as gerações futuras. Além disso, o relatório ainda ressalta que o conceito de desenvolvimento sustentável não tem um caráter meramente ambiental, englobando também as questões sociais importantes, como erradicação da pobreza e igualdade de oportunidades para todos (ELKINGTON, 2012).

Mais precisamente, o conceito de desenvolvimento sustentável foi definido como a capacidade de satisfazer as necessidades das gerações atuais sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazerem suas próprias necessidades. Ainda, a dita Comissão concluiu que os objetivos principais tangenciavam os seguintes temas: promover o crescimento econômico, mas de uma nova forma, com menos material e mais energia, com mais equidade nos impactos gerados; atendimento das necessidades vitais de empregos, alimentos, energia, água e saneamento; garantia de um nível sustentável de população; conservação e aumento da base de recursos naturais; reorientação tecnológica e do gerenciamento de risco; fusão das considerações ecológicas e econômicas nas tomadas de decisão (ELKINGTON, 2012).

Ainda, existem diversas ferramentas que podem ser utilizadas na busca pelo desenvolvimento sustentável, entre estas a Norma AA 1000, ISO 26000, OHSAS 18001, ISO 14001, SA 8000, *Global Compact*, *Global Reporting Initiative* (GRI), diretrizes para empresas multinacionais da Organização para Cooperação e o Desenvolvimento Econômico (OCDE), Índice de Sustentabilidade Empresarial (ISE), dentre outros. Alinhada a essas, as ferramentas da Gestão da Qualidade também contribuem para o gerenciamento eficaz da

sustentabilidade nas organizações, como por exemplo, através do Seis Sigma, Prêmio Nacional da Qualidade (PNQ) e da Melhoria Contínua (MACHADO, 2015).

Ademais, uma série de conferências internacionais começaram a surgir devido à urgência da elaboração de um tratado mundial para enfrentar o aumento das emissões de GEE. Em 1990, a Assembléia Geral das Nações Unidas estabeleceu o Comitê Intergovernamental de Negociação para a Convenção-Quadro sobre Mudança do Clima (INC/FCCC), que foi assinada em junho de 1992 na Cúpula da Terra no Rio de Janeiro, estabelecendo um processo permanente de revisão, discussão e troca de informações nas Conferência das Partes (COP), possibilitando uma adoção de compromissos adicionais em resposta a mudanças no conhecimento científico e nas disposições políticas. Essa conferência ocorre uma vez ao ano e visa avaliar, traçar novas perspectivas e definir acordos sobre os principais temas relacionados aos objetivos da convenção. Entre seus princípios, consta o de responsabilidades comuns, porém diferenciadas, segundo o qual todas as partes assumem responsabilidade compartilhada sobre as emissões de GEE, ao passo que reserva aos países desenvolvidos a iniciativa do combate à mudança do clima e a seus efeitos (PROCLIMA, 2019).

As revisões que merecem destaque são a COP-3 realizada em Quioto (Japão), em 1997, no qual os países industrializados se comprometeram a reduzir suas emissões de gases de efeito estufa em pelo menos 5% até o período entre 2008 e 2012 através de mecanismos, com destaque para o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) (PROCLIMA, 2019); a COP-15, também conhecida como Conferência de Copenhague, estabeleceu metas de redução de GEE para o período 2013 a 2020, tendo como resultado um acordo formulado por Brasil, China, Índia, África do Sul e Estados Unidos, produzido em negociações por um grupo de 26 países, apontando a necessidade de manter o aumento da temperatura global abaixo de 2°C (PROCLIMA, 2019); a COP-21, realizada em Paris, onde foi assinado um acordo por 195 países para reduzir emissões de GEE no contexto do desenvolvimento sustentável. Para o alcance do objetivo final do Acordo, os governos se envolveram na construção de seus próprios compromissos, a partir das chamadas Pretendidas Contribuições Nacionalmente Determinadas, onde cada nação apresentou sua contribuição de redução de emissões dos gases de efeito estufa, seguindo o que cada governo considera viável a partir do cenário social e econômico local (MMA, 2019).

Com relação ao Brasil, logo após a COP 15, foi instituída a Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC), por meio da Lei n° 12.187/2009, que estabelece a redução das emissões do país entre 36,1% e 38,9%, em relação às emissões projetadas até 2020. Segundo

o Decreto n° 7.390/2010 que regulamenta a PNMC, a projeção de emissões de GEE para 2020 foi estimada em 3,236 Gt CO_2 equivalente (eq) e foi considerada as emissões dos setores de energia, processos industriais, agropecuária, mudança do uso da terra e florestas e tratamento de resíduos (TEIXEIRA et al, 2016).

Ainda, esse decreto prevê a elaboração de planos setoriais de mitigação e adaptação às mudanças do clima, com a inclusão de ações, indicadores e objetivos específicos de redução de emissões e mecanismos para a verificação do seu cumprimento, além de medidas que visam a reduzir da vulnerabilidade dos sistemas naturais e humano. Alguns exemplos desses planos são: Plano de Ação para a Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal; Plano Decenal de Energia; Plano de Mineração de Baixa Emissão de Carbono; Plano Setorial da Saúde para Mitigação e Adaptação à Mudança do Clima; Plano de Redução de Emissões da Siderurgia; e Plano Setorial de Transporte e de Mobilidade Urbana para Mitigação da Mudança do Clima (PSTM) (TEIXEIRA et al, 2016).

Esse plano setorial, que será discutido a seguir, merece destaque já que as principais questões ambientais nas cidades estão relacionadas com o uso predominante do petróleo como combustível de transporte e a sua combustão que contribui significativamente para a poluição do ar e gases. Vale ressaltar que as emissões resultam não só da combustão de combustível por veículos, mas também como resultado da extração, transporte, produção e distribuição do próprio combustível. Globalmente o setor de transportes consome aproximadamente 61% de todo o petróleo extraído (KLIUCININKAS et al, 2012).

O PSTM, assim como os demais planos, deverão ser submetidos a revisões em períodos regulares não superiores a dois anos até 2020, objetivando readequá-los às demandas da sociedade e atingir a meta de reduzir as emissões, até o mesmo ano, em 21,8 milhões de t CO_{2eq}. A divisão desse plano por tipo de transporte é melhor visualizada na Figura 2 (MMA, 2013).

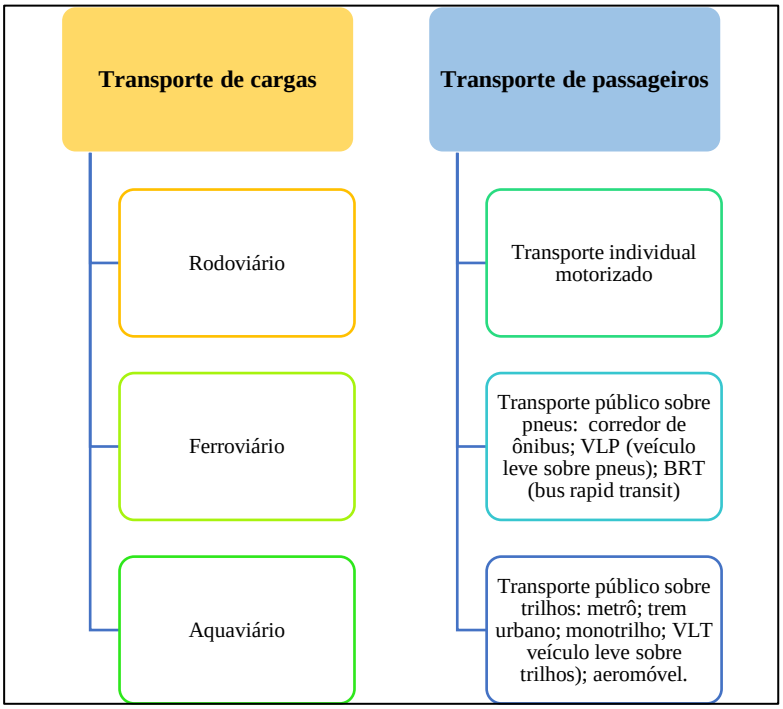


Figura 2 - Divisão por tipo de transporte do PSTM.

Fonte: Adaptado de MMA (2013).

As emissões projetadas do transporte de cargas deverão chegar a uma média de 100 Mt CO_2 em 2020, representando um crescimento de 42% em relação ao ano-base 2010, no qual o transporte rodoviário responderá por 88% das emissões, seguido pelo ferroviário, com 8%, e pelo aquaviário, com 4%. Já para o transporte de passageiros, a estimativa das emissões foram de 64% para transporte individual e de 36% para transporte coletivo, totalizando a emissão de 135,4 Mt CO_2 em 2020, representando um crescimento de cerca de 52% em relação ao ano-base 2010 (MMA, 2013). Na tentativa de modificar esse cenário futuro, o PSTM apresenta uma série de ações políticas para mitigar essas emissões, dentre estas:

- planejamento urbano associado ao planejamento de transporte: promoção de oportunidades de moradia, atividades de lazer, comércio e serviços ao longo dos eixos estruturadores de transporte coletivo, aumentando a acessibilidade por meio do transporte público e contribui efetivamente para a redução da necessidade de viagens motorizadas pelo transporte individual, além de estimular o uso do transporte coletivo (MMA, 2013);
- facilidades para o transporte não motorizado como melhorias para a circulação de ciclistas e pedestres, associadas às medidas de reestruturação da circulação urbana com a introdução de técnicas de moderação de tráfego, que reduzam a velocidade do tráfego motorizado de

> passagem em áreas tipicamente residenciais, também contribuem para estimular a mudança modal para o transporte coletivo ou para o não motorizado (MMA, 2013).

Ainda, esse plano ressalta que há a necessidade de políticas públicas que promovam a adoção de novas fontes de energia de menor intensidade de carbono para o transporte coletivo por ônibus. A substituição da fonte de energia e seus impactos assumem maior importância diante das discussões e propostas existentes em torno de novas tecnologias que estão sendo desenvolvidas para o automóvel, salientando-se a necessidade de ampliação de tais tecnologias para utilização em transporte de passageiros (MMA, 2013).

Desse modo, se tratando da contribuição esperada dos transportes para a redução de emissões de CO_2, os resultados do PSTM ressaltam a importância de planejar e investir em modos de transporte mais eficientes energeticamente, além de criar condições objetivas para melhorar a eficiência energética, tanto dos modos de transporte de cargas quanto de passageiros, esse último focado naquilo que é um dos grandes desafios do país, a melhoria do transporte público e da mobilidade urbana (MMA, 2013).

Dessa forma, o setor de transporte público é um dos maiores contribuintes para aumentar as emissões tanto de GEE quanto dos gases monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NOx), hidrocarbonetos (HC) e material particulado (MP), responsáveis pela poluição atmosférica (ALMEIDA, OLIVEIRA e D'AGOSTO, 2017). Assim, estudos vêm sendo realizados na tentativa de substituir a gasolina e diesel por fontes renováveis de energia, conhecidos como biocombustíveis. Esses são derivados de biomassa renovável que podem substituir, parcial ou totalmente, combustíveis derivados de petróleo e gás natural em motores a combustão ou em outro tipo de geração de energia. Os dois principais biocombustíveis líquidos usados no Brasil são o etanol obtido a partir de cana-de-açúcar e, em escala crescente, o biodiesel, que pode ser produzido através da reação de transesterificação de óleos vegetais ou de gorduras animais, sendo adicionado ao diesel de petróleo em proporções variáveis. Aproximadamente, 45% da energia e 18% dos combustíveis consumidos no Brasil já são renováveis. No resto do mundo, 86% da energia vêm de fontes energéticas não renováveis, tornando o Brasil pioneiro mundial no uso de biocombustíveis, uma vez que esse alcançou uma posição almejada por diversos países que buscam desenvolver fontes renováveis de energia como alternativa ao petróleo. (ANP, 2019a; NADALETI et al, 2017a).

Pela Lei nº 13.576/2017, uma nova Política Nacional de Biocombustíveis foi instituída. Também nomeada de RenovaBio, essa política tem como objetivo a expansão da

produção de biocombustíveis no Brasil, baseada na sustentabilidade ambiental, econômica e social, almejando-se uma contribuição dos biocombustíveis na redução das emissões de gases de efeito estufa no país. Na tentativa de melhorar o diálogo com o setor privado, o RenovaBio tem sua atuação baseada em quatro eixos estratégicos: discutir o papel dos biocombustíveis na matriz energética; desenvolvimento baseado no tripé da sustentabilidade; regras de comercialização e desenvolvimento de novos biocombustíveis (MME, 2017).

Assim, essa nova política busca criar um mercado de crédito de carbono, tendo em vista o volume produzido de combustíveis fósseis por cada distribuidor, que será obrigado a compensar as emissões desses fósseis, comprando CBIOS (Certificados de Descarbonização) nesse novo mercado. O CBIO equivale a uma tonelada de carbono, sendo fundamental para esse programa, uma vez que sua comercialização estimula os produtores de biocombustíveis a ampliarem sua produção, contribuindo também para atrair novos investimentos, induzindo uma maior participação dos biocombustíveis na matriz e contribuindo para a redução de emissões de GEE. O mecanismo dos CBIOs tende a equilibrar o mercado dos combustíveis (MME, 2017).

Além do biodiesel, o biometano é outro biocombustível que também se destaca para substituir o diesel e gasolina. Esse que pode ser obtido a partir do processamento do biogás, através de um processo de degradação da matéria orgânica, como por exemplo, produtos e resíduos orgânicos agrossilvopastoris, resíduos agrícolas, estercos animais, esgoto doméstico e resíduo sólido urbano (RSU), sendo esse depositado em aterros sanitários. Esses dois biocombustíveis podem ser utilizados em várias aplicações, como na geração de energia elétrica, através de geradores, instalações de aquecimento para animais; aquecimento de plantas de estufa e, principalmente em veículos de transporte públicos ou privados (NADALETI et al, 2017a).

De acordo com o Inventário de Emissões Atmosféricas do Transporte Rodoviário de Passageiros no Município de São Paulo (2019), as emissões de materiais particulados (MP) geradas pelos ônibus (4,9 mg por passageiro a cada quilômetro) são quase quatro vezes menores que pelos carros (18,5 mg) e quase 3 vezes menores que pelas motocicletas (13,4 mg). Proporcionalmente, os automóveis são responsáveis por 71% das emissões do poluente na cidade, contra 25% dos ônibus e 4% das motocicletas (Energia e Ambiente, 2019).

De modo geral, o mesmo ocorre para outros tipos de poluentes atmosféricos (como monóxido de carbono e hidrocarbonetos não-metano) e os GEE, com os automóveis como os principais emissores. Proporcionalmente, as emissões só são maiores nos ônibus no caso dos

óxidos de nitrogênio, o que é explicado pelo fato de esse poluente ser gerado em níveis mais elevados pelos motores movidos a diesel (Energia e Ambiente, 2019).

Ainda no mesmo Inventário, também foi analisada a quilometragem percorrida pelos diferentes modos de transporte. Constatou-se que os automóveis são responsáveis por 88,1%, as motocicletas por 9,1% e os ônibus por 2,8%. No entanto, quando considerados os quilômetros percorridos por pessoa (e não por veículo), os ônibus são responsáveis por 55%, contra 42% dos automóveis e 3% das motocicletas (Energia e Ambiente, 2019).

Dado este cenário, a pesquisa e desenvolvimento (P&D) dos biocombustíveis, bem como sua introdução e utilização no transporte público e privado são questões importantes que devem ser analisadas, já que esse tipo de transporte emite exacerbada quantidade de CO_2, principalmente quando se analisa o transporte por ônibus. Assim, os combustíveis renováveis, principalmente o biometano e o biodiesel desempenham papel importante na redução das emissões de CO_2, uma vez que substituindo, total ou parcialmente, a gasolina e o diesel, a queima desses combustíveis irá gerar uma menor quantidade de CO_2 emitida para a atmosfera.

Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo analisar as emissões de dois biocombustíveis, no caso, biodiesel e biometano, que será estimado através das emissões de CO_2 equivalente, já que esse gás é o principal responsável pelo Efeito Estufa, como dito anteriomente. Essas emissões serão calculadas em cada etapa do ciclo de vida de produção do biodiesel e biometano para o ano de 2018. O biodiesel analisado será oriundo do óleo residual recolhido por empresas situadas na cidade de Volta Redonda, ao passo que o biometano será oriundo da degradação do RSU presente no Centro de Tratamento de Resíduos (CTR) de Barra Mansa.

Ainda, o reconhecimento dos malefícios causados à saúde por poluentes oriundos da queima de combustíveis, em especial os fósseis, como problemas respiratórios e cardiovasculares, bem como reações alérgicas, tem feito com que a regulamentação do setor de transporte coletivo passe a considerar cada vez com maior rigor as questões relativas aos combustíveis e às tecnologias de propulsão. Dentre essas regulamentações, destaca-se a Resolução CONAMA 403/2008, que dispõe sobre a nova fase de exigência do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE) para veículos pesados novos (Fase P-7), como medida mais efetiva para redução das emissões (ANTP, 2014).

Para uma análise ambiental mais completa, visando à poluição atmosférica causada pela combustão nos motores dos ônibus, será discutido o uso do biometano e biodiesel nesses, através de 6 cenários. Assim, esse trabalho engloba duas discussões a respeito das emissões

de gases: as emissões de CO_{2eq} na avaliação do ciclo de vida do biometano, biodiesel e diesel (para efeito de comparação); e as emissões de CO, NOx, HC e MP, que pela Resolução CONAMA nº 403/ 2008 (ALMEIDA, OLIVEIRA e D'AGOSTO, 2017).

Segundo Silva (2005), existem algumas formas de classificar as pesquisas. Pela forma de abordagem, a pesquisa pode ser quantitativa, que considera que as informações podem ser quantificáveis, o que requer a utilização de recursos e de técnicas estatísticas; já a pesquisa qualitativa considera a existência de uma relação entre o mundo real e o sujeito, onde a interpretação dos fenômenos e a atribuição de significados são os pontos principais no processo desse tipo de pesquisa. Com relação aos objetivos, uma pesquisa pode se caracterizar como: exploratória, descritiva, explicativa. A pesquisa do tipo exploratória visa tornar a questão discutida mais tangível, tornando–a explícita e construindo hipóteses, envolvendo levantamento bibliográfico e entrevistas. Já o segundo tipo de pesquisa citada objetiva descrever características do tema em si, com o uso de técnicas padronizadas de coleta de dados, assumindo em geral, o formato de levantamento. Já a última pesquisa, tem como objetivo a identificação de fatores que contribuem para a questão discutida na pesquisa. Dessa forma, a metodologia utilizada nesse trabalho se caracteriza como quantitativa e exploratória.

Ainda, esse trabalho caracteriza-se como um estudo de caso, já que é um estudo de natureza empírica que busca investigar um determinado fenômeno. Trata-se de uma análise aprofundada de um ou mais casos, objetivando aprofundar o conhecimento acerca de uma situação, visando estimular a compreensão, sugerir hipóteses e questões (MIGUEL, 2007).

Para um melhor entendimento, os capítulos iniciais discutirão as principais fontes de biodiesel e biometano, bem como a importância desses biocombustíveis no Brasil e no mundo; em seguida serão apresentados os cálculos e equações consideradas para o consumo do motor dos ônibus de Volta Redonda. Após, há uma breve explicação sobre a importância de se avaliar o ciclo de vida de um combustível bem como a necessidade de se calcular as emissões de CO_2 equivalente. Depois, apresentar-se-á o Estudo de Caso, onde serão discutidas as características das cidades de Barra Mansa, detalhando seus sistemas de recolhimento de resíduos sólidos urbanos (RSU) e seu Centro de Tratamento de Resíduos (CTR); e de Volta Redonda, explicando o funcionamento da coleta de óleo residual. Finalmente, serão apresentadas cada fase dos ciclos de vida do biometano e biodiesel e os resultados encontrados para as emissões de CO_{2eq}. Em seguida, será apresentado o consumo dos biocombustíveis nos ônibus, bem como a emissão dos gases CO_2, CO, HC, NOx e MP causada pela combustão nos motores dos ônibus, para 6 cenários distintos. Enfim, será

apresentada a conclusão e possíveis contribuições desse estudo para o meio acadêmico e para a sociedade, despertando o interesse para novas pesquisas nesse setor.

Muitos estudos já foram realizados comparando-se as emissões de gases poluentes entre diesel e seus substitutos, como biodiesel de soja, biodiesel de dendê, biodiesel de mamona. Contudo, carecem os estudos comparativos da produção de tais substitutos frente à produção do petrodiesel, analisando todo o ciclo de vida do produto e não só o uso final.

1 Fontes alternativas de energia

A importância do desenvolvimento de novas fontes de energia, principalmente dos biocombustíveis, contempla não só o retardamento dos efeitos das emissões de CO_2, mas também contribuem para o reaproveitamento de materiais, como os resíduos gerados pelas cidades. Neste contexto, a disposição final do lixo urbano é um dos graves problemas ambientais enfrentados pelos grandes centros urbanos e tende a agravar-se com o aumento do consumo de bens descartáveis, que passam cada vez mais a compor os grandes volumes de lixo gerados pela população.

Ainda, a geração de RSU está diretamente relacionada com a população urbana, seu padrão de vida e hábitos de consumo. A coleta, tratamento e disposição adequada destes resíduos refletem a qualidade de vida da população, a qualidade das águas dos rios e águas subterrâneas, atividade pesqueira e vetores patogênicos. (PECORA, 2006). Dessa forma, a geração de resíduos e a disposição final do RSU tornaram-se uma questão ambiental que merece ser discutida.

1.1 Resíduos Sólidos Urbanos

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e o Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) definem resíduos sólidos como resíduos nos estados sólido e semi-sólido que resultam das atividades da comunidade de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Complementando essa definição, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) define resíduos sólidos como material, substância, objeto ou bem descartado que resulta das atividades humanas em sociedade, cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido (SILVA, 2012).

Segundo SILVA (2012), os resíduos sólidos urbanos podem ser subdivididos em: resíduos sólidos domésticos (RSD), gerados nas atividades diárias dos domicílios,

constituídos basicamente por restos de alimentos, produtos deteriorados, jornais e revistas, garrafas, papel higiênico, fraldas descartáveis, embalagens em geral e uma grande diversidade de outros itens; resíduos sólidos comerciais (RSC), sendo esses gerados em estabelecimentos comerciais, cujas características dependem da atividade ali desenvolvida; e resíduos de limpeza urbana (RLU), que são aqueles presentes nos logradouros públicos, em geral resultantes da natureza, tais como folhas, restos de poda, poeira, terra, areia e também aqueles descartados de forma irregular e indevidamente pela população em ocasiões pontuais (eventos culturais, shows, comemorações cívicas, por exemplo). Com relação ao tratamento dos RSU, os principais tipos estão explicitados no Quadro 2.

Quadro 2 - Principais tratamentos do RSU

Tratamento do RSU	**Características**	**Benefícios**
Compostagem	processo biológico oxidativo de decomposição da matéria orgânica presente no RSU, que ocorre pela ação agentes biológicos microbianos em condições físicas e químicas adequadas, resultando em um produto ou composto orgânico (húmus);	redução do volume do lixo; aproveitamento do húmus no setor agrícola; eliminação de patógenos e a economia no tratamento de efluentes (Tarazona, 2010);
Incineração	queima de resíduos em unidades especiais que permitem uma combustão completa, destruindo os componentes orgânicos presentes e obtendo como subprodutos cinzas inertes e geração de energia.	redução do volume, depuração de gases,
Reciclagem	os resíduos são recuperados como matéria prima ou servem como fonte de energia, podendo ser reutilizados, tais como vidros, papeis, papelão, entre outros.	redução do volume dos resíduos que irão ser dispostos no aterro, geração de empregos.
Pirólise	processo de decomposição física e química da matéria orgânica, resultando na queima dos resíduos;	redução do volume do lixo orgânico; aproveitamento como fonte energética, podendo ser gerado óleo, carvão ou gás. Elevado custo de implantação e manutenção.

Fonte: Adaptado de TARAZONA (2010)

O Plano Nacional de Resíduos Sólidos estipula que, em relação à destinação final dos RSU no Brasil, existem duas principais formas (MMA, 2011):

- Lixão: forma inadequada de disposição final de resíduos e rejeitos, que consiste na descarga do material no solo sem qualquer técnica ou medida de controle (MMA, 2011);
- Aterro sanitário: técnica de disposição de RSU no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança minimizando os impactos ambientais, utilizando os princípios de engenharia para confinar os resíduos e rejeitos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-o com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho (MMA, 2011); essa forma de destinação será melhor discutida mais a frente.

Nesse contexto, a PNRS foi instituída pela Lei Federal nº 12.305/2010, dispondo sobre seus princípios, objetivos e instrumentos, além das diretrizes relativas à gestão integrada, ao gerenciamento de resíduos sólidos e às responsabilidades dos geradores e do poder público e aos instrumentos econômicos aplicáveis (BRASIL, 2010).

A regulamentação da PNRS prevê a elaboração o Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos, definindo os instrumentos e fornecendo diretrizes sobre os planos de resíduos sólidos e os planos de gerenciamento de resíduos sólidos, além de instituir a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos. Esse gerenciamento é formado por um conjunto de ações exercidas, direta ou indiretamente, nas etapas de coleta, transporte, transbordo, tratamento e destinação final adequada dos resíduos sólidos e disposição final adequada dos rejeitos. Dentre essas ações, a reciclagem e coleta seletiva ganham destaque (BRASIL, 2010).

A coleta seletiva engloba o recolhimento de materiais recicláveis, segregados conforme sua composição, podendo ser realizado exclusivamente pelas prefeituras, ou pelas prefeituras em conjunto com cooperativas ou exclusivamente pelos catadores; enquanto que a reciclagem é um processo de transformação dos resíduos sólidos que envolve a alteração de suas propriedades físicas, físico-químicas ou biológicas, objetivando a transformação em novos produtos (BRASIL, 2010), o que possibilita a preservação de recursos minerais e energéticos, como por exemplo a reciclagem do alumínio, que economiza 95% de energia se comparada ao processo a partir da matéria-prima mineral, que é a bauxita, além de permitir o aumento da vida útil dos aterros sanitários (SILVA, 2016). Assim, um adequado sistema de gerenciamento de resíduos, para atender plenamente às diretrizes atuais de proteção ambiental

e responsabilidade social, deve objetivar a eliminação, minimização, reuso e reciclagem dos resíduos.

Ainda, o § 1º do artigo 9º da Lei Federal nº 12.305 de 2010 estabelece a possibilidade de Recuperação Energética, no qual poderão ser utilizadas tecnologias e tratamentos visando à recuperação energética dos RSU, desde que comprovada sua viabilidade técnica e ambiental e acompanhada da implantação de programa de monitoramento de emissão de gases tóxicos aprovado pelo órgão ambiental. Portanto, os RSU podem ser utilizados como combustível em usinas de recuperação energética (URE), desde que sigam a ordem de prioridade determinada pela PNRS (ROSSI, 2014). Essas usinas, de acordo com a portaria interministerial nº 274/2019, correspondem a qualquer unidade dedicada ao tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos com recuperação de energia térmica gerada pela combustão, com vistas à redução de volume e periculosidade, preferencialmente associada à geração de energia térmica ou elétrica (IMPRENSA NACIONAL, 2019). Um exemplo dessa usina é a URE de Barueri que, idealizada em 2010, permitirá a diminuição da dependência de aterros sanitários através da redução do volume de resíduos e da geração de energia elétrica de fonte renovável (LUZ et al, 2017).

A reciclagem energética pode ocorrer por diferentes métodos sejam eles térmicos ou biológicos, como por exemplo, em aterros sanitários, que poderão gerar energia pela utilização do poder calorífico para a produção de energia elétrica ou através da queima de combustíveis verdes, nesse caso o biogás, em geradores de energia elétrica (ABRELPE, 2015). Sendo assim, os aterros sanitários desempenham papel importante na geração de energia renovável.

1.1.1 Aterro Sanitário

Os aterros sanitários são locais adequados para a disposição final dos resíduos sólidos urbanos já que dispõem de técnicas corretas para a impermeabilização do solo, cobertura dos resíduos, captação do chorume, além da captação e queima do biogás. A impermeabilização eficiente da base e da cobertura do aterro possibilita condições adequadas para a degradação da matéria orgânica, aumentando conseqüentemente a produção de biogás. Além disso, é uma maneira de minimizar contaminações tanto no solo como em lençóis freáticos. A concepção de aterros sanitários visa o armazenamento correto do lixo e o aproveitamento do biometano gerado pela digestão anaeróbica, como será discutido no próximo item . Ainda, o biogás

captado do aterro pode ser queimado em flare, onde ocorre a transformação do metano em dióxido de carbono (TARAZONA, 2010). Já os aterros controlados são considerados uma fase intermediária entre o lixão e aterro sanitário.

1.1.1.1 Métodos Construtivos de um aterro

O principal objetivo de um aterro sanitário é o de não degradar o meio ambiente, incluindo águas superficiais, águas subterrâneas e gases emitidos à atmosfera, assim, minimizando as emissões de contaminantes e reduzindo os impactos à saúde pública. Dessa forma, é importante que o aterro tenha um projeto adequado e uma gestão de operação eficiente (TARAZONA, 2010).

O projeto de um aterro sanitário deve prever a instalação de elementos para captação, armazenamento e tratamento dos lixiviados e biogás, além de sistemas de impermeabilização superior e inferior. Esses elementos são de fundamental importância, pois, quando bem executados e monitorados, tornam a obra segura e ambientalmente correta, com reflexos diretos na melhoria da qualidade de vida da população do entorno do aterro (ELK, 2007).

Sendo assim, o método construtivo de um aterro sanitário deve considerar os seguintes elementos apresentados no Quadro 3.

Quadro 3 - Sistemas constituintes de um aterro sanitário

Sistemas componentes de um aterro sanitário	**Características**
Sistema de drenagem das águas	Evita a entrada de água de escoamento superficial no aterro, uma vez que a infiltração das águas superficiais pode causar instabilidade na massa de resíduos depositados.
Sistema de revestimento de fundo e de laterais	Protege e impede a percolação do chorume para o subsolo e aqüíferos; Constituído por uma ou várias camadas impermeabilizantes, que podem ser de solo compactado ou geossintéticos; Para o Brasil, a exigência mínima para a contenção de lixiviados não-perigosos é de que as camadas consistam de uma camada simples, podendo ser de argila.
Sistema de drenagem dos lixiviados	Composto por uma rede de drenos internos, geralmente constituídos de tubos perfurados preenchidos com brita, que carregam o chorume drenado para um sistema de tratamento; O material utilizado na construção do dreno deve ser resistente ao resíduo e ao chorume, podendo ser de polietileno e projetado de forma a não sofrer obstruções.
Sistema de tratamento de lixiviados	Tratamentos de lixiviados mais usuais: tratamentos biológicos aeróbios ou anaeróbios (lodos ativados, lagoas, filtros biológicos) e os tratamentos por processos físico-químicos (diluição, filtração, coagulação, floculação, precipitação, sedimentação, adsorção, troca iônica, oxidação química); O chorume também pode ser recirculado para o interior da massa de resíduos, para manter o grau de umidade necessário ao processo de decomposição dos resíduos orgânicos ou pode ser encaminhado para Estações de Tratamento.
Sistema de cobertura de solo intermediária e final	Na cobertura intermediária, cada célula de resíduo é coberta diariamente por material argiloso, de espessura de 15 a 30 cm, com o objetivo de isolar as células umas de outras, diminuir o odor, evitar a infiltração das águas e proliferação de vetores; A cobertura final é constituída de camadas de drenagem e camadas de impermeabilização, objetivando minimizar a infiltração de águas para reduzir a geração de lixiviado, controlar a saída de gases para a atmosfera; isolar os resíduos e favorecer a recuperação final da área e o crescimento de vegetação.
Sistema de coleta e controle de gás	É uma rede de drenagem que evita que os gases escapem através dos meios porosos que constituem o subsolo e atinjam fossas, esgotos e até edificações. Estes gases são transportados por este sistema e podem ser utilizados para a produção de energia ou queimados em flares.

Fonte: QIAN et al (2002); ELK (2007)

Ainda, os drenos responsáveis pela coleta dos gases originados a partir da degradação da matéria orgânica presente no RSU, são compostos, na maioria dos casos, por uma coluna de tubos perfurados de concreto armado envoltos por uma camada de brita ou rachão, conforme pode ser observado na Figura 3 (ITURRI, 2006).

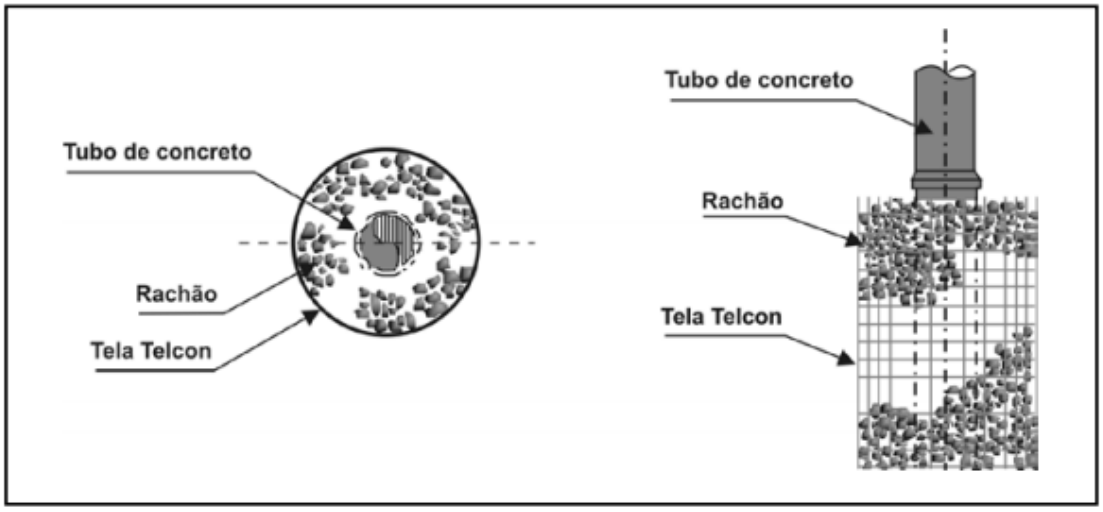


Figura 3 - Composição de dreno de gás em aterro sanitário.

Fonte: ITURRI, 2006.

Abaixo será detalhado o sistema de extração e tratamento do biogás, que envolve diversos equipamentos e materiais.

1.1.1.2 Sistemas de extração e tratamento do biogás

Esse sistema de extração e tratamento é formado por tubos coletores, compressores, desumidificadores e filtros.

- Tubos de coleta: a coleta de gás começa após o fechamento da célula sanitária que irá formar um poço de gás. Existem duas configurações de sistemas de coleta: poços verticais e trincheiras horizontais. Mas, independentemente do tipo usado, o sistema de coleta será conectado a uma tubulação lateral, que transportará o gás para um coletor principal (TOLMASQUIM, 2003). Ainda, a ligação dos poços a um tubo principal, percorrendo todo o aterro é a forma mais utilizada para conectar um poço de gás à bomba e ao sistema de utilização (WILLUMSEN, 2001);

- Compressor: Um compressor é necessário para puxar o gás dos poços de coleta e também pode ser necessário para comprimir o gás antes que este entre no sistema de recuperação energética. O tamanho, o tipo e o número de compressores necessários dependerão da taxa, do fluxo de gás e do nível desejado de compressão que, tipicamente, é determinado pelo equipamento de conversão energética (MUYLAERT et al, 2000);
- Tratamento do Condensado – quando o biogás viaja através do sistema de coleta, este se resfria, formando um condensado que pode bloquear o sistema de coleta e interromper o processo de recuperação de energia, devendo, portanto, ser controlado, removido e então adequadamente descartado (TOLMASQUIM, 2003);
- Tratamento do Biogás e conversão em biometano: depois de ser coletado e antes de ser usado no processo de conversão de energia, o biogás deve ser tratado a fim de remover algum condensado que não foi coletado nos tanques de captura, assim como particulados e outras impurezas, para enfim tornar-se o biometano. As necessidades de tratamento dependem da aplicação de uso final. As aplicações de gerações de energia incluem uma série de filtros para remover impurezas, as quais podem danificar os componentes do motor ou turbina e, com isso, reduzir a eficiência do sistema (LANDIM & AZEVEDO, 2008);
- Desumidificador – O sistema de desumidificação tem a finalidade de segregar eventuais gotículas de líquidos contidos no biogás, evitando seu aporte para os compressores do sistema de extração de gases (ICLEI, 2009).

Esse biometano pode ser utilizado para geração de energia elétrica, térmica ou mecânica, além de possuir diversas finalidades como produção de calor ou vapor, produção de eletricidade com produção combinada de calor e energia; fonte de energia industrial para aquecimento, vapor ou eletricidade e resfriamento; produção de produtos químicos e proteínas; como combustível para veículos, caraterizando o biometano como uma fonte de energia renovável, possibilitando ainda redução de custos financeiros e energéticos (HOLM-NIELSEN et al, 2009).

Assim, a questão dos resíduos sólidos e a busca pela redução do desperdício, associadas à potencialização de geração de renda, delineiam um vasto campo para a inovação na gestão dos resíduos sólidos (SILVA, 2016). Contudo, não cabe somente ao poder estatal o combate ao desperdício e a gestão de resíduos sólidos.

> A Constituição brasileira, visando assegurar a efetividade da proteção ambiental estabeleceu direitos e deveres aos particulares e ao próprio Estado. O parágrafo primeiro do artigo 225 traz os deveres impostos ao Poder Público; os parágrafos 2º, 3º e 6º impõem deveres aos particulares exploradores de atividade econômica. Desta forma, o particular se tornar corresponsável por um meio ambiente equilibrado, possuindo deveres diretos de proteção ambiental, inclusive no que concerne aos resíduos sólidos, sendo tarefa do cidadão contribuir para prevenção de contaminação ambiental por rejeitos sólidos e para redução na produção de resíduos (NAVARRO, 2014).

Ainda, o princípio da participação indica a necessidade da participação popular visando à conservação do meio ambiente. A sociedade deixa de ser apenas beneficiária da proteção ambiental para se tornar responsável pela proteção ao meio ambiente, atuando em conjunto com o Estado. Ainda, a política de resíduos sólidos, ao propor o envolvimento em processos educativos no contexto de gestão inovadora não pode se restringir ao treinamento e capacitação técnica, até porque compreende uma diversidade de públicos e agentes dessa cadeia, como catadores, consumidores, gestores públicos e empresários (NAVARRO, 2014).

É muito importante também que a educação ambiental para resíduos sólidos seja diretamente ligada a aspectos práticos, vinculando as informações oferecidas, como, por exemplo, a importância da coleta seletiva com modificações efetivas no comportamento, como aumento da coleta seletiva domiciliar e distribuição de postos de entrega voluntária de produtos recicláveis (NAVARRO, 2014). Um desses produtos recicláveis é o óleo residual, que será no subitem abaixo.

1.2 Óleo Residual

Os óleos vegetais usados em processos de fritura representam riscos de poluição ambiental, não havendo um consenso quanto à forma ideal de descarte do óleo vegetal residual. Uma parte desse óleo vegetal residual é destinada à fabricação de sabões e à produção de biodiesel. Entretanto, a maior parte deste resíduo é descartada na rede de esgotos e a pequena solubilidade desses óleos na água é preocupante, uma vez que quando presentes em mananciais utilizados para abastecimento público causam problemas no tratamento da água. Esse óleo também diminui a área de contato entre a superfície da água e o ar atmosférico, o que impede a transferência do oxigênio da atmosfera para a água e, em seu

processo de decomposição, reduzem o oxigênio dissolvido, elevando a demanda bioquímica de oxigênio (DBO), causando alterações no ecossistema aquático (CHRISTOFF, 2006).

Assim, a logística reversa é um processo fundamental no processo de descarte do óleo residual. Esse processo se caracteriza por ser um instrumento de desenvolvimento econômico e social, caracterizado por um conjunto de ações, procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento, em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente adequada (MMA, 2011).

O processo de coleta do óleo residual normalmente envolve as etapas de planejamento e operação. Na primeira, tem-se um aviso enviado pelos grandes geradores e pontos de coleta sobre a existência de resíduo a ser coletado e seu volume. Essa etapa leva alguns dias, até que os pedidos de coleta sejam acumulados. Após o acúmulo de pedidos, a etapa de operação tem início com a partida dos veículos que devem visitar todos os pontos indicados para coleta. Após as visitas, os motoristas retornam para a central, onde o resíduo é tratado. A decisão sobre a sequência de coleta e o percurso entre os pontos deve ser tomada de modo a minimizar o custo total do roteiro (GUABIROBA R. C. S., D'AGOSTO M. 2011).

Existem três principais vantagens decorrentes da utilização de óleo residual de fritura como matéria-prima para produção de biodiesel: de caráter tecnológico, pois dispensa o processo de extração do óleo; de caráter econômico, principalmente pelo menor custo da matéria-prima, uma vez que se trata de um resíduo o óleo residual de fritura que tem seu preço de mercado estabelecido; e finalmente de cunho ambiental, com a destinação adequada de um resíduo que, em geral, é descartado inadequadamente impactando o solo e o lençol freático e, conseqüentemente, a biota desses sistemas (DIB, 2010).

Fica claro, portanto que é fundamental o envolvimento das esferas políticas e sociais para que haja um correto reaproveitamento dos RSU e do óleo residual, contribuindo para que os biocombustíveis, como o biometano e o biodiesel oriundos dessas fontes, despertem o interesse da sociedade.

2. Biocombustíveis

Nos últimos anos, diversas idéias foram surgindo na tentativa de desenvolver fontes de energia alternativas. Essas incluem, por exemplo, energia eólica, diferenças de temperatura geotérmica, energia cinética armazenado em água (por exemplo, ondas e marés dos oceanos ou represas fluviais) e a irradiação do sol. Ainda, tem-se a energia gerada a partir da biomassa, que pode ser convertida em diferentes produtos diferentes, como por exemplo, bioetanol, biogás/biometano e biodiesel (MUSSGNUG et al, 2010). Esses dois últimos serão melhor discutidos nos subitens a seguir. Ainda, também é importante avaliar o consumo desses biocombustíveis quando comparado com outros combustíveis de origem fóssil.

2.1 Biogás e biometano

O biogás proveniente da digestão anaeróbia de matéria orgânica constitui uma fonte de energia alternativa, bem como contribui na solução dos problemas ambientais, reduzindo os impactos da fonte poluidora. Sua composição é uma mistura de gases, no qual a proporção de cada gás depende de vários parâmetros, como o tipo de digestor e o substrato (matéria orgânica). Essa mistura é essencialmente constituída por metano, que é o componente útil que pode ser utilizado como combustível, e dióxido de carbono, estando o seu poder calorífico diretamente relacionado com a quantidade de metano existente na mistura gasosa. O teor de metano varia de 40 a 75% dependendo da fonte geradora. (SUZUKI et al, 2011).

Para esse estudo, o biometano obtido a partir da purificação do biogás será considerado como o biocombustível, para o cálculo da quantidade de metano gerado no aterro, uma vez que, como dito anteriormente, esse gás é o elemento que pode ser aplicado como combustível.

2.1.1 Digestão Anaeróbia para geração de biogás e biometano

A formação do biometano através da digestão anaeróbia (DA), também conhecida como biometanização, é um processo que decompõe a matéria orgânica em uma variedade de produtos anaeróbicos sob condições livres de oxigênio (SOTI, 2014). Essa atividade envolve processos biológicos que ocorrem em quatro etapas:

- Hidrólise: nessa etapa, as bactérias fermentativas hidrolíticas secretam a matéria orgânica, convertendo a matéria orgânica particulada em matéria orgânica dissolvida. Os produtos originados nessa etapa são compostos mais simples como ácidos orgânicos, alcoóis, cetonas, dióxido de carbono e hidrogênio. Ainda, são gerados produtos metabólicos oriundos da atividade das bactérias acidogênicas, que servirão de substratos para as bactérias acetogênicas e para as arqueas metanogênicas (CHERNICHARO, 1997; Y. LI et al, 2011);
- Acetogênese: a produção de acetato é conduzida pelas bactérias acetogênicas, que oxidam compostos orgânicos intermediários e convertem os ácidos orgânicos em acetato, dióxido de carbono e hidrogênio, que são substratos para produção de metano (CHERNICHARO, 1997; Y. LI et al, 2011);
- Metagênese: etapa final da conversão anaeróbia de compostos orgânicos em metano e dióxido de carbono, sendo realizada pelos microrganismos metanogênicos (CHERNICHARO, 1997; Y. LI et al, 2011).

As principais vantagens da DA nos aterros sanitários está relacionada com o aumento da vida útil dos aterros sanitários, a retirada da fração orgânica dos RSU e a coleta do biogás gerado (SAMEK, 2017), através do sistema de extração e tratamento do biogás, apresentado no item 1.1.1.2. Essa coleta do biogás apresenta um caráter importante, na medida em que impede a emissão do CH_4 gerado para a atmosfera, contribuindo para a redução das emissões de GEE, uma vez que esse gás tem um alto potencial de Aquecimento Global.

Ademais, quanto maior a quantidade de metano encontrada no biogás, melhor a qualidade do gás gerado. Assim, é necessário um processo de refino de biogás em biometano. Esse processo ocorre em duas etapas: na primeira, ocorre uma limpeza do biogás, visando à remoção de componentes nocivos; já na segunda etapa, há o ajuste do poder calorífico e da densidade relativa, por meio de um processo de remoção do CO_2 (SAMEK, 2017).

O biometano é um combustível gasoso que apresenta um conteúdo energético elevado semelhante ao gás natural, composto, principalmente, por hidrocarbonetos de cadeia curta e linear. Pode ser utilizado para geração de energia elétrica, térmica ou mecânica, além de possuir diversas finalidades como produção de calor ou vapor, produção de eletricidade com produção combinada de calor e energia; fonte de energia industrial para aquecimento, vapor ou eletricidade e resfriamento; produção de produtos químicos e proteínas; como combustível para veículos, (HOLM-NIELSEN et al, 2009).

2.1.2 Uso do biogás e biometano

A origem do biogás pode ocorrer de forma natural no meio ambiente, em meio aquático e pela ação antrópica, sendo originado a partir da digestão anaeróbia de algumas fontes de substrato, como: microalgas (MUSSGNUG et al, 2010); resíduos agrícolas (SUZUKI et al, 2011); resíduos alimentares (Y. LI et al, 2011); estrume animal e lamas de unidades de produção de bovinos e suínos (HOLM-NIELSEN et al, 2009); lodo gerado no tratamento dos esgotos (COELHO et al, 2006), além de resíduos sólidos urbanos. Nesse último caso, o manejo de resíduos inclui como fontes principais de emissão de metano, o tratamento de efluentes e a disposição de resíduos sólidos em aterros sanitários, sendo esta fonte de geração de biometano o foco dessa dissertação.

O biogás pode ser usado como combustível para diversos veículos: tratores (OWCZUK et al, 2019); caminhões que transportam RSU (WINSLOW, LAUX & TOWNSEND, 2019; SHANMUGAM, TYSKLIND & UPADHYAYULA, 2018); transportadores comerciais (KAMMUANG-LUE & BHUDTIYATANEE, 2018); veículos agrícolas (SAIDI et al, 2018; COIMBRA-ARAUJO et al, 2014); taxis em Bangkok, Thailand (NILRIT; SAMPANPANISH & BUALERT, 2018).

KUWAHARA, BERNI & BAJAY (2018) discutem o uso potencial de biogás e biometano de aterros municipais para abastecer ônibus de transporte urbano em algumas cidades brasileiras, enquanto SANTOS et al (2018) apresentam uma avaliação do potencial de energia e das emissões evitadas pela utilização de energia de biogás produzida a partir da biodigestão de sete tipos de resíduos orgânicos.

KURIEN B. T et al (2006) apresentaram um estudo de geração de biogás na Estação Espacial Internacional (ISS), em que o ambiente anaeróbico é particularmente adequado neste cenário e se for bem sucedido, a NASA planeja lançar veículos espaciais para Marte usando este combustível, com a ISS como a área de teste.

2.1.3 Cenário Internacional

Analisando o cenário mundial, pode-se constatar que a Suécia tem a ambição de eliminar progressivamente os combustíveis fósseis e aumentar significativamente a participação dos biocombustíveis em diversos setores. É interessante notar que a Suécia já produz o biogás desde a década de 70, começando na indústria manufatureira e no setor

agrícola. Já em 2015, havia 282 usinas de biogás nesse país, com cerca de 60% do biogás utilizado como combustível. A produção de biogás é muito maior em outros países como Alemanha, Holanda e Reino Unido, mas a parcela de biogás usada como combustível para veículos é menor em comparação com a Suécia (LARSSON, GRÖNKVIST & ALVFORS, 2016).

AHRENS & WEILAND (2007) realizaram um estudo que avaliou as taxas de eficiência de uma usina que produz biogás e biometano, localizada na cidade sueca de Västerås, bem como as taxas de eficiência e as perdas de metano das instalações de melhoramento de gás. De uma maneira mais abrangente, LARSSON, GRÖNKVIST & ALVFORS (2016) demonstraram que esquemas de apoio ao investimento e isenções de energia e carbono e impostos sobre o dióxido de carbono têm sido instrumentos-chave para iniciar a construção de novas instalações de produção de biogás e infra-estrutura. Já LÖNNQVIST, GRÖNKVIST & SANDBERG (2017) estudaram como o metano derivado da floresta pode complementar o biogás da digestão anaeróbica como combustível de transporte, concluindo que o quadro político sueco favorece o uso de metano derivado da floresta no transporte, mas também que biocombustível pode ser usado localmente para geração de eletricidade ou em processos industriais ou ser injetado na rede de gás natural.

Na Índia, BREITENMOSER et al (2019) identificaram barreiras e fatores capacitantes ao longo da cadeia da AD (resíduos biológicos para a tecnologia para utilização do produto); em Treviso (nordeste da Itália), um tratamento combinado de fermentação ácida e AD foi desenvolvido em escala piloto para a conversão de bio-resíduos urbanos em ácidos graxos voláteis e biogás.

Na mesma perspectiva, WANG et al (2018) apresentaram um estudo de caso para Gana na África Subsaariana, onde três categorias de resíduos, incluindo águas residuais, resíduos sólidos urbanos e resíduos agrícolas são testados como matéria-prima para tratamento termoquímico via incineração, gaseificação, ou pirólise para geração combinada de calor e energia, ou tratamento biológico, como digestão anaeróbica (AD) e tratamento aeróbico, considerando uma combinação de tecnologias de tratamento de resíduos. Os resultados indicaram que o biogás gerado a partir do tratamento de resíduos acaba sendo uma promissora fonte de energia renovável na região analisada.

Já o estudo apresentado por LIU et al (2018) na Malásia estudou o uso de biogás para atender a demanda de energia de edifícios comerciais em países tropicais enquanto que os resíduos de uma cidade Argentina foram analisados para produção de biogás (PIACENTINI & VEJA, 2017).

2.1.4 Cenário Nacional

No Brasil, NADALETI et al (2017a) apresentaram uma análise sobre a substituição do diesel em ônibus urbanos dos 27 estados brasileiros, utilizando como fonte de energia, o biometano de instalações aterros sanitários e a energia derivada de usinas hidrelétricas, comparando este cenário com o uso de apenas metano de aterros sanitários, avaliando questões como emissões de poluentes, desempenho do motor e instalações de implantação. Essa análise concluiu que é possível substituir o óleo diesel por formas de energia limpa, como misturas de hidrogênio e metano e, ainda, nos cenários apresentados, se implantadas, são capazes de abastecer a frota urbana nacional de 107.000 ônibus e mais, aumentando consideravelmente a frota atual. Os mesmos autores também analisaram motores abastecidos com biocombustíveis, analisando do uso do hidrogênio-metano levando em conta aspectos relacionados à eficiência e emissão de poluentes. A ideia principal levantada pelo estudo foi incentivar a mudança no algoritmo de controle dos motores de ignição, normalmente abastecidos com gás natural. Além disso, os ônibus movidos a diesel no Brasil poderiam ser convertidos para esses motores a gás analisados, sem perda de eficiência (NADALETI et al, 2017b).

2.2 Biodiesel

O biodiesel é um biocombustível renovável e contribui para preservação do meio ambiente, uma vez que emite menos dióxido de carbono em seu ciclo de vida, quando comparado com o óleo diesel de petróleo (D'AGOSTO, 2004). Além disso, o biodiesel pode ser utilizado em motores de veículos projetados exclusivamente para uso do óleo diesel de petróleo (WASSELL & DITTMER, 2006), com a ressalva de que o biodiesel deve estar dentro das especificações de qualidade estabelecidas por órgãos de controle nacionais e internacionais.

Devido às crises do petróleo da década de 70, o governo brasileiro percebeu a necessidade de criar um programa para a substituição do diesel. Através do programa PRO-ÓLEO era esperada uma substituição de até 30% do diesel de petróleo. Contudo, a produção de biodiesel no país foi retomada nos últimos anos, com a criação da Lei nº 11.097 de 13

de Janeiro de 2005, que dispõe sobre a introdução do biodiesel na matriz energética brasileira e a criação do Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel. Ainda, foi fixado em 5% o percentual mínimo obrigatório de adição de biodiesel ao óleo diesel comercializado ao consumidor final, em qualquer parte do território nacional. Além disso, a Lei n° 11.116/2005 definiu as regras tributárias (DIB, 2010).

A maior barreira para a comercialização do biodiesel é o alto preço de manufatura associado ao preço dos óleos vegetais. Os óleos e gorduras residuais são uma alternativa para a produção de biodiesel, na medida que apresentam menor custo que os óleos vegetais tradicionalmente utilizados. Já se percebe o crescimento de cooperativas que realizam a coleta de óleo residual para a produção de biodiesel (DIB, 2010).

Segundo HOLANDA (2004), não existe perdas significativas no desempenho do motor de veículos quando estes utilizam biodiesel ou outras misturas, apresentando pouca redução na potência, com uma maior alteração em relação ao consumo de combustível, não havendo assim necessidades de muitas alterações no motor. Contudo, em alguns casos é necessário adaptar o motor. No caso de misturas de óleo diesel com biodiesel, não há necessidade de modificação do motor, sendo necessário somente que o biodiesel possua padrão de qualidade, podendo ser utilizado nos motores de combustão interna.

Ainda, estudos apontam que há um aumento no desempenho e potência de um motor alimentado com óleo diesel mineral e misturas deste com biodiesel (BARBOSA et al, 2008). Em relação ao consumo energético, pesquisas demonstram que o biodiesel proveniente do óleo de soja apresenta menor consumo específico e energético em relação ao diesel (VOLPATO et al, 2009) e que há aumento do consumo de combustível à medida que as frações de biodiesel na mistura biodiesel-diesel aumentam, devido ao fato do biodiesel ter menor poder calorífico, maior densidade e viscosidade, quando comparado ao combustível diesel puro (ILERI & KOCAR, 2014).

2.2.1 Produção do biodiesel a partir do óleo residual

A produção do biodiesel, tanto a partir dos óleos vegetais quanto de gordura animal e óleo de residual, envolve algumas tecnologias, tais como:

- Esterificação: o uso de reações de esterificação está usualmente associado ao desenvolvimento de processos híbridos. Estudos cinéticos da reação de

esterificação metílica de ácidos graxos, utilizando o ácido sulfúrico como catalisador (RAMOS et al, 2011);

- Processos híbridos: ocorre mais de um processo, podendo ser: esterificação seguida da transesterificação; esterificação simultaneamente à transesterificação e a hidrólise seguida de esterificação (ou hidroesterificação). Embora, a transesterificação seja mais comum, este processo é sensível à presença de ácidos graxos livres no meio de reação e para contornar essa questão, utilizam-se mais de um processo (RAMOS et al, 2011);
- Transesterificação: principal método de produção do biodiesel é a transesterificação, onde um mol de triacilglicerol reage com três mols de álcool, usualmente o metanol ou o etanol, na presença de um catalisador, que pode ser homogêneo, heterogêneo ou enzimático. Para esse trabalho, será considerado o metanol como álcool reagente, conforme pode se observar na Figura 4.

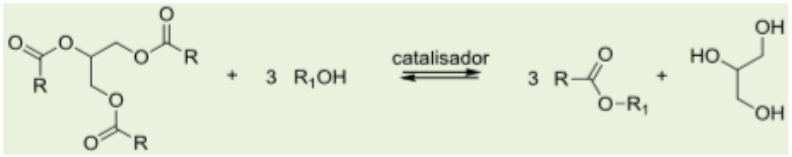


Figura 4 - Transesterificação para produção de biodiesel.

Fonte: RAMOS et al (2011)

Esses processos ocorrem em usinas de produção de biodiesel. Geralmente, as usinas são constituídas por quatro tanques, que correspondem a: um reator para a preparação do catalisador; um reator principal com aquecimento e agitação por reciclo; um tanque para decantação e lavagem com aquecimento e sistema de lavagem por borbulhamento; um tanque para a recepção do álcool destilado sob pressão reduzida (FARIAS et al, 2011). Esses tanques são melhor explicados a seguir:

- Reator de preparação do catalisador: tanque com formato cilíndrico, fundo cônico, com volume útil de 120 litros, adaptado com um agitador mecânico para homogeneização da mistura do álcool e base (FARIAS et al, 2015);
- Reator Principal: tanque onde ocorre a reação de transesterificação, com volume útil de 300 l, cilíndrico com fundo cônico, sendo sua agitação realizada

por recirculação através de bomba centrifuga e aquecimento por resistência elétrica com 7000 watts de potência (FARIAS et al, 2015);

- Tanque de decantação e lavagem: formato cilíndrico, fundo cônico, volume total de 350 litros construído, adaptado com uma resistência elétrica de 6000 Watts de potência e um sistema de borbulhamento com injeção de ar comprimido (FARIAS et al, 2015);
- Tanque de destilação: formato cilíndrico hermeticamente fechado, com fundo cônico e volume de 115 litros, adaptado a um trocador de calor de placas e uma bomba a vácuo, onde ocorre a destilação do excesso de álcool utilizado no processo de transesterificação (FARIAS et al, 2015).

No Brasil, a transesterificação é a tecnologia mais utilizada nas usinas em funcionamento. O rendimento e a qualidade da conversão dos triacilgliceróis em ésteres no processo de transesterificação dependem de diversos fatores como, por exemplo, tempo de reação, temperatura e catalisador utilizado, dentre outros (GUIMARÃES, 2019).

Os catalisadores são fatores importantes para esse processo, na medida que essas substâncias influenciam na velocidade e na temperatura da transesterificação (DIAS, FERREIRA e CUNHA, 2012). Esses podem ser divididos em catalisadores ácidos e catalisadores básicos. O primeiro citado, como por exemplo os ácidos sulfúricos e sulfônicos, não sofrem interferência de água ou outras impurezas como sólidos presentes no óleo residual, possibilitando o uso de matérias-primas de menor valor agregado no processo, necessitando porém de condições de trabalho mais enérgicas em relação à alcoólise em meio alcalino RAMOS et al (2011). Já os catalisadores básicos, como hidróxido de sódio e hidróxido de potássio, tem como característica principal aumentar a velocidade da reação quando comparada à catálise ácida (GUIMARÃES, 2019).

Ainda, o processo de transesterificação pode ocorrer por catálise homogênea e heterogênea. Uma catálise homogêna ocorre quando o catalisador está na fase líquida, assim como os reagentes envolvidos no processo, sendo um processo vantajoso na medida que a conversão dos triglicerídeos ocorre com tempo de reação mais baixo, porém gera águas residuárias, a reutilização do catalisador é inviável e há a incorporação de impurezas no produto, demandando a ocorrência de mais processos de purificação (BOEY, MANIAM e HAMID, 2011; GUIMARÃES, 2019). Já na heterogênea, os catalisadores não são

consumidos na reação, ocasioanado assim a redução de impurezas, diminuindo o custo de separação final do produto (VAZ, 2015).

2.2.2 Uso do biodiesel

A reciclagem de óleo residual torna-se necessária principalmente na esfera ambiental, na tentativa de minimizar os efeitos nocivos quando esse óleo é lançado no meio ambiente. Cada litro de óleo jogado no esgoto tem capacidade para poluir cerca de um milhão de litros de água, o equivalente ao consumo de uma pessoa no período de 14 anos. O óleo é mais leve que a água, fica, portanto, na superfície, criando uma barreira que dificulta a entrada de luz e a oxigenação da água, comprometendo assim, a base da cadeia alimentar aquática e contribuindo para a ocorrência de enchentes. Essa contaminação gera ainda graves problemas de higiene e mau cheiro, atraindo baratas e ratos e prejudicando o funcionamento das estações de tratamento de água (CNM, 2007).

O acúmulo de óleos e gorduras nos encanamentos pode causar entupimentos, refluxo de esgoto e até rompimentos nas redes de coleta. Para retirar esse material e desentupir os encanamentos são empregados produtos químicos tóxicos, o que acaba criando uma cadeia perniciosa e que ainda aumenta consideravelmente os custos dos Serviços de Água e Esgoto da cidade. Ainda, quando o óleo residual que é lançado na rede de esgoto chega aos mares e rios, o impacto ambiental é imediato, já que, além de emitir metano em sua decomposição, esse óleo afeta o fitoplâncton, que é a base da cadeia alimentar aquática (CNM, 2007).

Com relação a esfera econômica, a geração de renda a partir da coleta do óleo residual torna-se um negócio lucrativo. Estima-se que no Brasil possam ser reciclados pelo menos 10% dos 4 bilhões de litros de óleo vegetal consumidos por ano. No estado do Rio de Janeiro, por exemplo, a reciclagem é realizada por meio do Programa de Reaproveitamento de Óleos Vegetais do Rio de Janeiro, coordenado pelo Instituto Estadual do Ambiente (INEA) e pela Secretaria Estadual do Ambiente do Rio de Janeiro. A maior parte da coleta do óleo é feita por cerca de 80 cooperativas de catadores envolvidas no projeto, que atuam principalmente na região metropolitana e contam com o apoio da secretaria na compra de equipamentos. No interior do estado, existem pontos de coleta em Magé e Volta Redonda, que funcionam como polarizadores dos municípios vizinhos. Apesar disso, não há uma estimativa real com relação ao número de funcionários das cooperativas ou quantos estabelecimentos são contemplados, já que o vínculo entre eles é informal. Contudo, o principal destino do óleo coletado no estado são as indústrias de sabão e de massa de vidraceiro. Ainda, o Rio de Janeiro têm um grande

potencial nessa área, mas faltam investimentos para aumentar a capilaridade das redes de coleta e para construir melhores plantas industriais de conversão do óleo em biodiesel (F. P. D.E., 2009).

O Centro de Tecnologia Sustentável da Coordenação de Pós-graduação e Pesquisa em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ) já tem uma usina piloto com capacidade para produzir 10 mil litros de biodiesel por dia. Essas usinas de conversão em biodiesel são o melhor destino que pode ser dado ao óleo residual, já que as formas de reaproveitamento mais conhecidas que são a produção de sabão e de ração animal, enfrentam um grave problema: o óleo residual estocado de forma inadequada ocasiona a proliferação de microorganismos causadores de doenças como à da vaca louca e o botulismo. Dessa forma, destinar o óleo residual para a produção de sabão e ração seria uma ameaça à saúde pública. Quando o produto é convertido é biodiesel, o combustível é queimado a temperaturas altíssimas nos motores de automóveis (F. P. D.E., 2009).

2.2.3 Cenário internacional

Com relação aos impactos ambientais, a nova estratégia energética da União Européia (UE) visa aumentar a utilização de combustíveis biológicos ou renováveis em substituição aos combustíveis fósseis. No âmbito da Diretiva de Energia Renovável, que é uma diretiva da UE que determina os níveis de uso de energia renovável dentro dessa, há um objetivo específico relativo aos combustíveis nos transportes: até 2020, pelo menos 10% os combustíveis utilizados devem ser renováveis, exigindo um grande esforço para desenvolver uma nova geração de combustíveis e melhorar o uso daqueles já disponíveis. O transporte é um setor estratégico do ponto de vista energético, uma vez que representa cerca de 32% do consumo final de energia na UE. Além disso, esse setor é responsável por cerca de 20% das emissões dos GEE na UE. O transporte rodoviário é novamente o mais importante, emitindo cerca de 72% das emissões totais do setor, demonstrando assim a importância de encontrar alternativas que reduzam essas emissões (CORSINI et al, 2015).

Kallas & Gil (2015) analisaram, através de questionários, as opiniões, atitudes e disposição de 300 consumidores em pagar pelo biodiesel como alternativa ao diesel em Barcelona. Os resultados apontaram que os consumidores não estavam dispostos a pagar pelo biodiesel, além de não saberem muita informação sobre sua produção e situação na Espanha; além disso, a principal limitação encontrada pelos autores foi que os fabricantes de automóveis não recomendam a utilização do biodiesel, pois pode levar à falha do motor e,

além disso, outra limitação significativa é a falta de biodiesel disponível, devido à sua baixa quota de mercado. Outro caso espanhol foi o trabalho realizado por Perdiguero & Jiménez (2011), que testaram como diferentes fatores que podem afetar a introdução do biodiesel no mercado da gasolina espanhola. Esses fatores englobaram o nível de competição local, dificuldades técnicas e ações do governo local e as evidências empíricas demonstram que como a promoção da concorrência e a contratação pública de veículos podem melhorar a comercialização de biocombustíveis.

Bai et al (2016) realizaram experimentos que avaliaram misturas de biodiesel com diesel em motores de ônibus municipais na Hungria e demonstraram que o uso de biodiesel, particularmente com 20 a 50% de biodiesel e a mistura com diesel normal, é altamente recomendado ambiental e tecnicamente.

Um caso interessante é a aceitação social da utilização de biodiesel de óleo de palma na Malásia. Esse país declarou sua intenção de reduzir 40% da emissão do carbono até 2020, com base no nível registrado em 2005, durante a Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas em Copenhagen. No entanto, segundo Chin et al (2014), os estudos acadêmicos acerca da barreira de aceitação social do biogás ainda são negligenciados quando comparados com as outras barreiras. Ainda, os mesmos autores afirmam que uma imagem completa da aceitação social só pode surgir depois que as três dimensões de aceitação: sociopolíticas, da comunidade e do mercado, são investigadas e compiladas e que o desenvolvimento de biocombustíveis será restrito se as questões de aceitação social continuarem sendo negligenciadas.

Já Soundararajan & Thomson (2013) relataram como alguns governos asiáticos e europeus, admirando o sucesso do programa brasileiro de etanol começaram a desenvolver indústrias de biocombustíveis depois do ano 2000. As taxas de crescimento tanto do biodiesel quanto do bioetanol nos primeiros anos foram muito elevados, mas caíram drasticamente depois de 2008. Dentro de ambas as regiões, enquanto alguns países conseguiram desenvolver projetos de primeira geração bem-sucedidos. Contudo, a falta de padronização de qualidade e de harmonização de políticas resultou em distorções econômicas ao longo de toda a cadeia de valor.

Grasman & Sadashivam (2012) realizaram um estudo nos Estados Unidos para estabelecer melhores práticas para implementação de programas de biodiesel que buscavam informações em programas de biodiesel existentes, além de práticas e lições aprendidas. Uma das conclusões foi que a aquisição de biodiesel de melhor qualidade é o passo mais crítico na

implementação de um programa estadual estadunidense; além disso, medidas para garantir uma entrega, armazenamento e uso adequados devem ser tomadas.

Tica et al (2010) realizou testes de biodiesel em Belgrado, relacionando o uso deste combustível alternativo em condições operacionais reais no sistema de transporte público urbano, com aspectos técnicos, ecológicos e operacionais do uso de biocombustíveis. Esses autores concluíram que e o biodiesel poderia ser uma alternativa para motores de ignição por compressão, pode ser usado totalmente como um combustível para o sistema de transporte público urbano e, ainda, fornecem reduções significativas nas emissões de gases poluentes.

2.2.4 Cenário Nacional

Com relação a estudos no Brasil, merece destaque a substituição dos combustíveis fósseis e a adoção do biodisesel no transporte coletivo em Curitiba, Paraná, que tem sido pioneira neste tipo de gestão ambiental. O uso de biodiesel no transporte público nessa cidade evitou a emissão de aproximadamente 10.000 toneladas métricas de CO_2, verificando que existe uma contribuição significativa por parte da cidade para reduzir a emissão de GEE. Ainda, a análise econômica demonstrou que se toda a frota da cidade fosse híbrida, haveria uma economia de cerca de R$ 60 milhões de reais e esse valor poderia cobrir gastos com saúde pública advindos das emissões do transporte coletivo (DULLIUS et al, 2017).

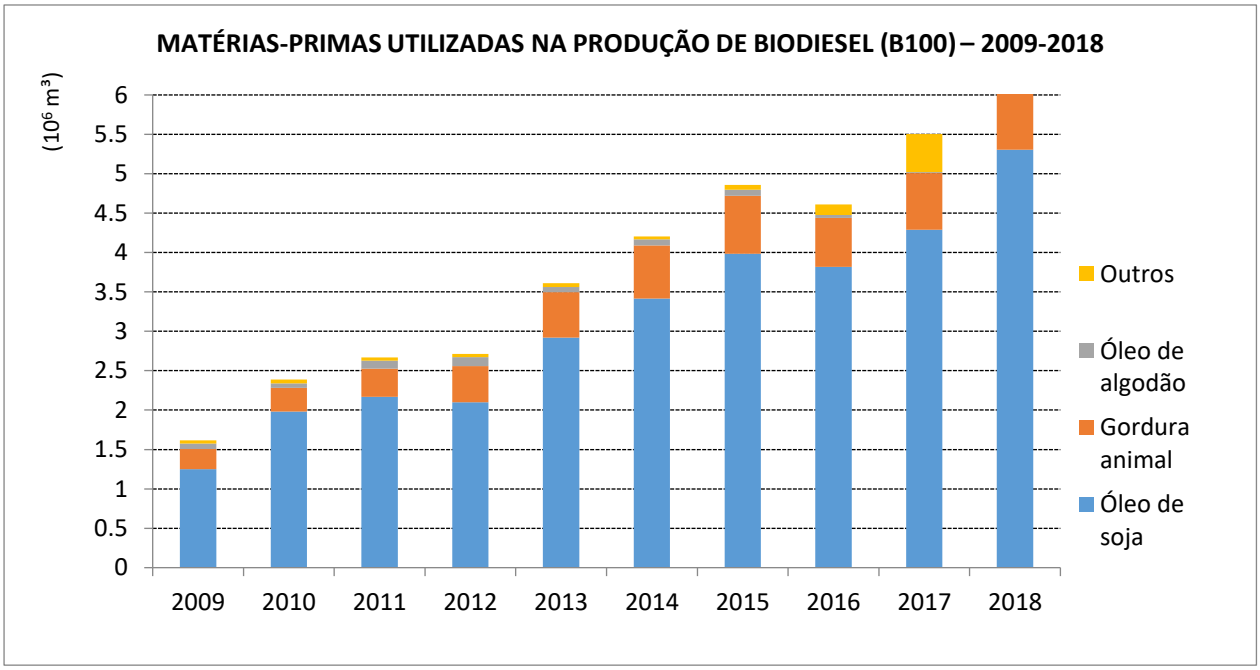
Contudo, outro estudo também realizado na cidade de Curitiba, analisou a influência do combustível, tanto diesel quanto biodiesel e das condições da frota de veículos do transporte coletivo de Curitiba nas emissões de NO_x e concluiu que, embora o uso de biodiesel traga vantagens ambientais, os resultados indicaram o aumento das emissões de NO_2 e principalmente NO com a utilização de motores a biodiesel. Dessa forma, para que as vantagens ambientais desse combustível renovável possam ser maximizadas, novas tecnologias e dispositivos para o controle de emissões, sobretudo de NO, devem ser desenvolvidos (RIBAS et al, 2016).

Já Ribeiro & Abreu (2008) analisaram quatro iniciativas de políticas públicas para o setor de transportes brasileiro como a adoção da tecnologia flexfuel; o Programa Nacional de Biodiesel; o Programa Nacional de Eficiência Veicular; e o Programa de Inspeção e Manutenção de Veículos Leves do Estado do Rio de Janeiro. Com essa análise, os autores concluíram que benefícios significativos são mostrados em termos de emissões reduzidas de CO_2 que muitas vezes não são consideradas pelos formuladores das políticas brasileiras. Já D'agosto, Ribeiro & Souza (2013) identificaram quais são as opções de combustíveis e

tecnologias de propulsão que são aplicáveis ao trânsito de ônibus no estado do Rio de Janeiro e que apresentam uma potencial redução das emissões de CO_2 em curto prazo, concluindo que o uso de sistemas de biodiesel e diesel-gás destaca-se em relação às reduções nas emissões de CO_2 quando considerado o investimento inicial, o consumo de energia e custo operacional, relatando também que o uso de ônibus híbridos é uma opção promissora opção e que uso de bioetanol é caro, mas ainda é a melhor opção para reduzir as emissões de CO_2.

Em 2018, a soja continuou sendo a principal matéria-prima para a produção de biodiesel puro (B100), equivalente a 69,8% do total, com um aumento de 20,5% em relação a 2017. A segunda matéria-prima no ranking de produção das usinas foi a gordura animal (16,2% do total), após elevação de 19,3% em relação a 2017, seguida por outros materiais graxos (13% do total) e óleo de algodão (0,9%) (ANP, 2019a), conforme pode ser observado no Gráfico 1.

Gráfico 1 - Matérias-primas utilizadas na produção de biodiesel (B100)



Fonte: ANP (2018a)

Vale destacar que a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) aprovou em agosto de 2019, o aumento da mistura de biodiesel no diesel de 10% para 11%. Atualmente, cerca de 80% do biodiesel no Brasil é produzido a partir do óleo de soja. Segundo a Associação dos Produtores de Biodiesel do Brasil (APROBIO), o volume adicional

irá demandar cerca de 600 milhões de litros de biocombustível no período de um ano, ou seja, 3 milhões de toneladas de soja a mais para esta finalidade (APROBIO, 2019).

Esses estudos, aliados às políticas de incentivo, demonstram a importância socioeconômico e ambiental da introdução de fontes alternativas na matriz energética mundial e brasileira. Contudo, deve se considerar algumas métricas para analisar se a utilização desses biocombustíveis, particularmente em automóveis, gera de fato ganhos econômicos, ambientais e sociais. Assim, um fator que interfere diretamente na utilização de biocombustíveis é o consumo desses no motor do automóvel, o que será discutido no capítulo a seguir.

3. Consumo de combustíveis

O consumo de um combustível depende de diversos fatores como: tipo do veículo; estilo de dirigir; condições de operação; além do tipo e qualidade do combustível utilizado e do tipo do veículo. Ainda, fatores ligados a tecnologia do veículo também afetam o consumo, como por exemplo: tamanho, desenho da banda de rodagem, pressão e condições dos pneus; carroceria; relação de transmissão do trem de força; equipamentos adicionais (ar condicionado, aquecimento auxiliar, ventilador de acoplamento viscoso**)** (PETROBRAS, 2018a).

Técnicas como prevenir acelerações e frenagens freqüentes e manter a rotação do motor dentro da faixa de rotação econômica são as principais técnicas para diminuir o consumo de um combustível. Algumas condições de operação aumentam o consumo do combustível como: regiões montanhosas; trânsito urbano intenso e viagens curtas frequentes; veículo carregado; funcionamento prolongado do motor com veículo parado; partidas frequentes com o motor frio. (PETROBRAS, 2018a).

Por esta razão, não é possível estabelecer precisamente quanto combustível um determinado veículo pode consumir. Para efeito de cálculo, serão utilizados os valores encontrados no 2° Inventário de Emissões Atmosféricas por veículos automotores (2013), desenvolvido pelo MMA. Os combustíveis utilizados para o cálculo das emissões serão a gasolina e o diesel, utilizados pelos veículos utilitários e pelos caminhões, respectivamente e que podem ser observados no Quadro 4.

Quadro 4 - Consumo em km/l para cada tipo de veículo

Tipo de veículo	Consumo em km/l
Carro (utilitário)	10,3
Caminhão – tanque	4,01
Caminhão – coletor	2
Ônibus urbanos	2,4

Fonte: MMA (2013)

O diesel tipo S10 começou a ser comercializado no Brasil em 2014, substituindo o diesel S50. A medida, regulamentada pela Resolução ANP 50/2013, faz parte de um acordo

para reduzir a emissão veicular de gases poluentes ao meio ambiente. O S10 é um combustível com teor de enxofre máximo de 10 partículas por milhão (ppm) e, de acordo como o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE), criado pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), é de uso obrigatório para todos os veículos rodoviários (leves e pesados) fabricados a partir de janeiro de 2012. Assim, para esse trabalho, foi considerado que os veículos, nesse caso caminhões-tanques, ônibus e caminhões que carregam o RSU, serão abastecidos com o S-10. O Quadro 5 apresenta as principais características desse tipo de diesel, segundo a Ficha de Informações de Segurança de Produto Químico (FISPQ) emitida pela Petrobras, que é a principal fabricante de combustíveis no Brasil (PETROBRAS, 2018b).

Quadro 5 - Características do óleo diesel S-10

Características	
Densidade relativa	815 a 853 kg/m³
Temperatura de decomposição	400ºC
Faixa de destilação	100–400 ºC a 760 mmHg

Fonte: PETROBRAS (2018b)

Diversos estudos apontam que o diesel tipo S-10 é menos poluente que o S-500. (PETROBRAS (2018b); JÚNIOR, FERNANDES E SILVA (2014); ANP (2019a)), o que é mais um motivo para o uso do S-10 nos veículos analisados. Assim, o valor adotado para a densidade do S-10 é uma média dos valores máximos e mínimos, sendo então de 834 kg/m³.

Já para a gasolina, o tipo comum é um combustível que não tem aditivos de limpeza, não possuindo substâncias que protegem o motor, deixando assim resíduos de combustão depositados sobre as válvulas de admissão do motor, comprometendo as misturas entre ar e combustível ao longo do tempo, além de comprometer o funcionamento do veículo, resultando num aumento de consumo. Já a gasolina aditivada é composta por aditivos e dispersantes químicos que podem ajudar na limpeza do motor, além de possuir substâncias químicas que criam uma espécie película de proteção nas partes internas do motor, reduzindo o atrito e conseqüentemente, a energia que seria desperdiçada pelo motor é melhor aproveitada em forma de potência nas acelerações. Por permitir uma maior limpeza, a gasolina aditivada emite uma menor quantidade de GEE's (NOTICIAS AUTOMOTIVAS, 2018). Dado isso, ao tipo utilizado pelos veículos utilitários será a gasolina aditivada, que possui uma densidade de 742 kg/m³ (ANP, 2019a).

Cada tipo de veículo está também associado a um Fator de Consumo (FC) expresso em litros/km e sua quantificação também pode ser realizada dentro da mesma lógica da quantificação das emissões. Cada litro de cada tipo de combustível pode ser convertido em emissões totais de dióxido de carbono de origem fóssil, principal agente causador do efeito estufa ou aquecimento do planeta. Esse gás também é emitido pelo escapamento como produto da combustão completa, juntamente com o vapor d'água (ANP, 2019a).

No que diz respeito ao consumo de combustível e às emissões de CO_2, embora alguns modelos específicos tenham de fato sofrido otimizações de projeto que efetivamente trouxeram ganhos, em termos de eficiência, os operadores de frota e a própria agência ambiental reportam valores médios inalterados em relação aos veículos de tecnologias anteriores (ANP, 2019a).

Com relação ao consumo do biodiesel, diversos estudos apontam que motores submetidos a ensaios com biodiesel e diesel apresentam pouca diferença na potência, torque e consumo específico (RIBAS et al, 2016; BARBOSA et al, 2008; SILVA 2012). RIBAS et al (2016) utilizaram o motor Volvo modelo B12M, que obedece às condições de rotações inferiores a 2200 rpm (rotações por minuto) para analisar o consumo de biodiesel, analisando a influência do uso de biodiesel e diesel em uma frota de transporte coletivo.

Sendo assim, é necessário selecionar um veículo que permita reduzir as emissões de escapamento da frota circulante, na medida em que o consumo de um determinado combustível também depende do tipo do veículo, tamanho e carroceria, por exemplo. Como o foco dessa dissertação é a emissão de CO_2 em ônibus urbanos, os principais tipos desse veículo presentes nas rodovias do Rio de Janeiro serão explicados na seção a seguir.

3.1 Tipos de ônibus

Os principais modelos de ônibus urbanos que circulam no estado do Rio de Janeiro estão caracterizados no Quadro 6.

Quadro 6 - Tipos de ônibus circulantes no Rio de Janeiro.

Tipo de ônibus	Características	Número de assentos	Comprimento (em m)
Articulado	Utilizados preferencialmente em corredores segregados ou exclusivos e em linhas onde se permite o transporte de passageiros em pé. É composto por um carro trator e um reboque, unidos por rótula de articulação que permite livre passagem entre eles.	45	15
Ônibus urbano		35	10,5
Ônibus Padron		35	14

Fonte: COPPE/UFRJ (2012)

Com relação ao funcionamento do sistema dos ônibus, as principais tecnologias alternativas de sistemas de propulsão dos ônibus do Estado do Rio de Janeiro são divididas em dois sistemas de propulsão: convencional e alternativo (COPPE/UFRJ, 2012).

O sistema de propulsão convencional combina um motor alternativo de combustão interna, que transforma a energia química do combustível em energia mecânica e um sistema de transmissão mecânica que transmite a potência e o torque do motor para as rodas, conforme Figura 5. Este tipo de sistema de propulsão é encontrado em grande parte dos ônibus cariocas (COPPE/UFRJ, 2012).

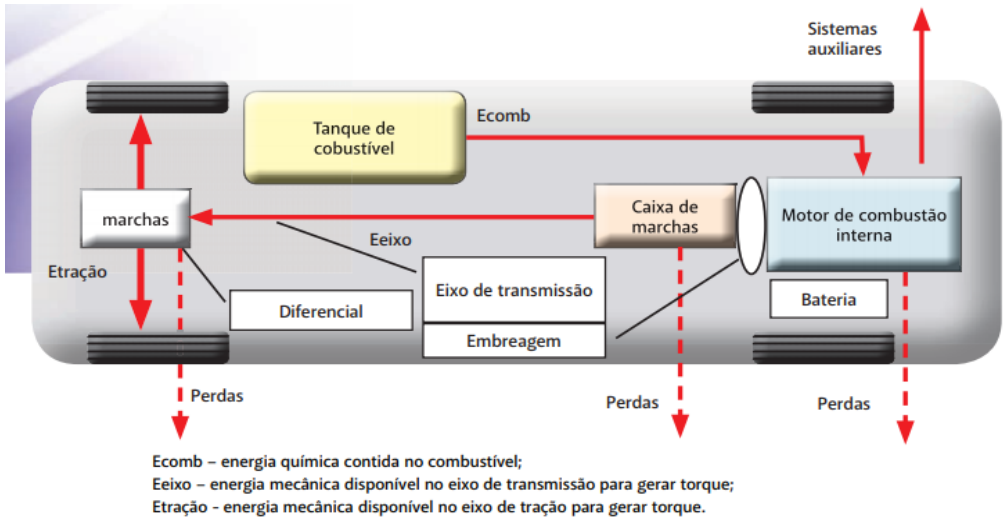


Figura 5 - Sistema de propulsão convencional

Fonte: COPPE/UFRJ, 2012

Já o sistema de propulsão alternativo é híbrido e consiste em uma combinação de dois tipos de motores, usualmente um motor de combustão interna e um motor elétrico. A configuração dos sistemas híbridos se divide em dois tipos: híbrido em série (Figura 6) e híbrido em paralelo (Figura 7). No primeiro tipo, o motor de combustão interna utiliza combustível armazenado no tanque, convertendo energia química em energia mecânica, que aciona um gerador que fornece energia elétrica a um motor elétrico. O motor elétrico fica responsável por proporcionar o movimento do veículo por meio de um mecanismo de tração, conforme Figura 8. Nesses sistemas, o motor elétrico aproveita a energia cinética que seria perdida na frenagem para, através do controlador, alimentar as baterias. Esta forma de alimentar as baterias é chamada de: “frenagem regenerativa”, que contribui para a redução do consumo de combustível.

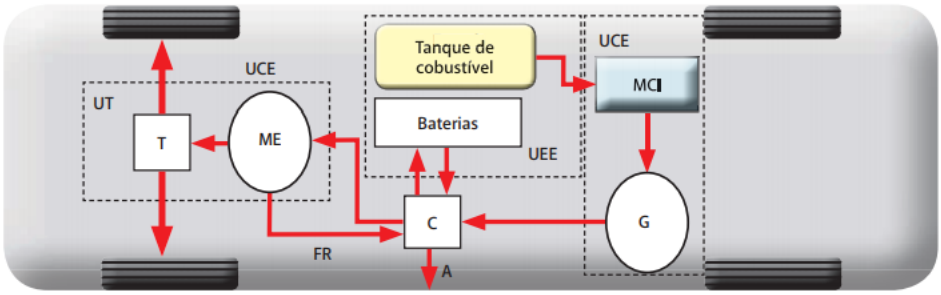
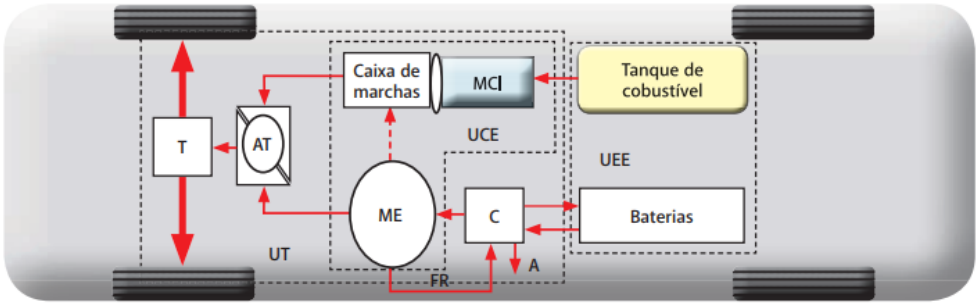


Figura 6 - Sistema híbrido em série

Fonte: COPPE/UFRJ (2012)

No sistema híbrido em paralelo, o motor elétrico não depende diretamente do motor de combustão interna para obter energia, uma vez que tanto o motor elétrico quanto o motor de combustão interna, ou os dois juntos, podem fornecer energia ao eixo de tração do veículo de forma independente. Nesses sistemas, o motor de combustão interna é alimentado pelo tanque de combustível, enquanto o motor elétrico é alimentado pelo banco de baterias, que também



T – Mecanismo de tração
AT – Acoplador de torque
ME – Motor elétrico
C – Controlador
MCI – Motor de combustão interna

UT – Unidade de tração
UEE – Unidade de estocagem de energia
UCE – Unidade de conversão de energia
FR – Freio regenerativo
A – Carga dos acessórios

podem ser recarregadas por meio do reaproveitamento da energia cinética que seria perdida durante a frenagem.

Figura 7 - Sistema híbrido em paralelo

Fonte: COPPE/UFRJ (2012)

Segundo Resolução nº 403 de 11 de novembro de 2008 publicada pelo CONAMA, a partir de janeiro de 2012 todos os fabricantes de veículos e motores que atuam no Brasil passaram, obrigatoriamente, a produzir motores e equipar seus veículos com motores que atendam ao padrão de emissões do EURO V, o que implica em uma adequação gradativa da frota de ônibus do Rio de Janeiro para atender estas exigências que procuram garantir uma redução significativa da emissão de poluentes atmosféricos locais (MMA, 2009).

Um trabalho desenvolvido pela COPPE/UFRJ verificou que as reduções na emissão de CO_2 são aproximadamente proporcionais ao percentual de biocombustível utilizado em mistura com o diesel, conforme pode ser observado no Quadro 7.

Quadro 7 - Emissão de CO_2 a partir do combustível utilizado e do tipo de ônibus

Ônibus	Combustíveis utilizados	Emissão de CO_2 (g/km)
Veículo convencional com motor dianteiro	Diesel (B5)	928,74
Veículo convencional com motor traseiro	Diesel (B5)	928,74
Veículo convencional com motor traseiro	Diesel-gás	657,79
Veículo padrão com motor traseiro	Diesel (B5)	1.394,51

FONTE: COPPE/UFRJ, 2012

Assim, para o presente trabalho será utilizado para o modelo convencional com motor traseiro, pois esse tipo de ônibus emite uma menor quantidade de CO_2 quando comparado com outros modelos.

3.2 Motor de combustão interna

Existem diversos tipos de motor que podem ser utilizados pelos ônibus e um desses é o motor de combustão interna (MCI). Esse tipo de motor pode operar com diferentes tipos de combustíveis, tanto líquidos como gasosos (SUZUKI et al, 2011), e também, pode ser facilmente modificado para um DFDE (*Dual Fuel Diesel Engine*), isto é, para um motor dual, simplesmente conectando um misturador de gás no coletor de admissão e instalando um mecanismo de controle de combustível para limitar o suprimento de combustível piloto (BORA et al, 2015).

Os motores de CI podem ser utilizados para geração de eletricidade e na locomoção no setor transporte, com uso do biodiesel e biogás ou biometano como biocombustíveis. Esse tipo de motor funciona no modo dual, sendo alimentado por dois combustíveis, um combustível gasoso, chamado combustível primário, no qual o motor funciona

principalmente; e um combustível líquido, chamado como piloto, que atua como fonte de ignição do combustível gasoso. O recurso mais interessante desse motor é a capacidade de mudar seu modo de operação instantaneamente de combustível duplo para o modo convencional, operando unicamente com um combustível líquido em caso de falta de combustível primário (BORA et al, 2015).

Todo combustível tem propriedades físicas e químicas diferentes e, assim as características de combustão variam. Os parâmetros para o funcionamento do MCI precisam ser ajustados de acordo com as características de combustão do combustível para obter o desempenho ideal do motor. Um desses parâmetros é a eficiência térmica (ET), que é expressa em porcentagem e varia de acordo com a mistura no motor (BORA et al, 2015).

Sendo assim, o motor dual apresenta vazões diferentes para cada mistura de combustível. Para o cálculo dessas vazões, considerando apenas um combustível alimentado o motor, utilizou-se a Equação 1, adaptada de Bora et al (2015):

$$V_c = \frac{P \times 3600 \times 100}{PCI \times ET} \quad (1)$$

onde,

V_c = vazão do combustível *i*, em l/h;
P = potência do motor, em kW;
PCI = poder calorífico inferior, em MJ/kg;
ET = eficiência térmica, em porcentagem.

Para calcular as vazões das misturas dos combustíveis, utiliza-se a Equação 2, também adaptada também de Bora et al (2015):

$$V_{biocombustível\ c} = z * (V_i + V_{biocombustível}) \quad (2)$$

onde:
$V_{biocombustível\ c}$ = vazão do biocombustível para a mistura com o combustível c, em l/h;
z = porcentual de substituição do biocombustível, em %;
V_i = vazão do combustível piloto, em l/h;

Segundo Bora et al (2015), é possível conseguir uma substituição do diesel de até 80% usando biogás ou biometano; sendo assim, z tem valor de 80%. Para o biodiesel, foi

considerada uma mistura com o diesel igual 10%, de acordo com o adiantamento das decisões da Lei 13.263, na qual tornou obrigatório essa porcentagem na mistura com diesel (ANP, 2019).

Os demais valores considerados para o cálculo das vazões dos combustíveis encontram-se no Quadro 8.

Quadro 8- Poder Calorífico Inferior para biometano, biodiesel e diesel

Combustível	PCI (MJ/kg)
Biometano	20,67
Biodiesel	37,27
Diesel	42

Fonte: BORA et al (2015)

A potência considerada é de 166 kW e os valores da eficiência térmica foram calculados através de uma média de valores encontrados em outras pesquisas, que analisaram a eficiência do motor dual utilizando misturas com biocombustíveis, conforme pode ser observado no Quadro 9.

Quadro 9 - Eficiência Térmica para os combustíveis analisados

Combustíveis	Eficiência térmica (%)	Fonte
Biometano	24,63	Deheri et al (2020)
		Jagadish e Gumtapure (2019)
		Khayum, Anbarasu, Murugan (2020)
Biodiesel	32,18	Dimitriou, Tsujimura e Suzuki (2019);
Diesel	28,24	Dimitriou, Tsujimura e Suzuki (2019); Charita et al (2019); Deheri et al (2020)
Biometano-diesel	26,85	Duraisamy, Rangasamy e Govindan (2020); Oishi et al (2019); Khayum, Anbarasu e Murugan (2020); Halewadimatha, Yaliwalb and Banapurmath (2019)
Biometano-biodiesel	24,33	Kalsi e Subramanian (2017); Halewadimath, Yaliwalb e Banapurmath (2019)
Biodiesel-diesel	21,5	El-Adawy, El- kasaby e Eldrainy (2018)

Com os valores das vazões, é possível então, calcular a demanda exigida pelos ônibus, que segue a Equação 3:

$$D_i = n * V_c * t \quad (3)$$

onde,

D_i = demanda do ônibus utilizando o combustível i, em l/dia

n = número de ônibus;

V_c = vazão do combustível c, em l/h;

t = horas que 1 ônibus percorre em 1 dia, em h/dia

Fica evidente, portanto, que diversos fatores, desde o tipo de veículo, tipo de combustível e tipo de motor influenciam na vazão e consequentemente, na utilização dos combustíveis e na demanda exigida pelos veículos automotores. Todos esses fatores contribuem diretamente na emissão de GEE. Além desses fatores, para avaliar se um biocombustível é vantajoso ambientalmente, deve se verificar se seu processo de produção emite menos GEE ao longo do seu ciclo de vida quando comparado com o combustível fóssil que ele irá substituir (HILL et al, 2006). Para essa avaliação utilizam-se indicadores, sendo o balanço de emissões de GEE o mais utilizado (CARVALHO, 2012). Assim, grande parte dos estudos dessa área utiliza princípios e fundamentos da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), na medida em que essa ferramenta permite um melhor entendimento de como o processo de emissão de GEE está integrado na cadeia de conversão dos combustíveis, uma vez que diferentes processos presentes nesses ciclos também são responsáveis pela emissão de CO_2 e não só a combustão desses nos motores. Assim, o próximo capítulo tratará do conceito de avaliação do ciclo de vida e como essa ferramenta é aplicada para o cálculo das emissões de dióxido de carbono equivalente.

4. Avaliação do Ciclo de Vida e CO_2 equivalente

As indústrias interagem com os diferentes componentes da biosfera, depositando assim materiais nocivos na atmosfera. Então, o conceito de Avaliação de Ciclo de Vida surgiu na década de 70, quando a conscientização sobre problemas ambientais tornou-se pauta de discussão em convenções internacionais. O primeiro estudo feito relacionado com o tema foi realizado pela Coca-Cola, que comparou o ciclo de vida entre suas embalagens para saber qual utilizaria menos recursos e tivesse um menor índice de emissões atmosféricas (SEO e KULAY, 2006). Esse estudo foi aprimorado para a agência de proteção ambiental norte americana e deu origem ao conceito de ACV. Contudo, os resultados podiam divergir mesmo que o produto fosse o mesmo e, dessa forma em 1989, a Sociedade de Toxicologia e Química Ambiental promoveu um evento científico para melhorar o desenvolvimento da ACV (PALANEDI, 2017).

Em 1997, a ISO (*International Organization for Standardization*) normatizou a Avaliação de Ciclo de Vida através da NBR ISO 14040 Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Princípios e Estrutura. No Brasil, em 2001, a normatização ocorreu pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), com a norma ABNT NBR ISO 14040, que foi a primeira versão brasileira da norma internacional. Já em 2004, o Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia introduziu a ACV em suas linhas de pesquisa, buscando enriquecer o desenvolvimento do banco de dados nacional de Inventários de Ciclo de Vida, sendo referência nacional para a abordagem desse tema (IBICT, 2018).

Atualmente, diversas indústrias implementaram em sua política o Selo Verde ou Rótulo Ambiental, que são estudos que consideram os impactos associados ao projeto do produto, desde a exploração dos recursos para geração de matéria prima, passando pela fabricação do produto final e até seu uso de descarte. Esses estudos são chamados de avaliação berço ao túmulo e levam as empresas a entenderem melhor seus processos e gerenciarem o ciclo de vida de seus produtos (ORLANDIN, 2013).

A ACV pode ser definida como uma metodologia de investigação e avaliação dos impactos ambientais de um produto ou serviço com relação tanto seu uso final quanto aos

impactos causados ao longo de sua cadeia de produção produtiva (CHERUBINI, BARGIGLI e ULGIATI, 2009). No caso de um produto, a análise se inicia na extração das matérias-primas necessárias para sua produção e finaliza na disposição dos resíduos gerados por todo processo permitindo assim, uma comparação entre produtos distintos de um mesmo tipo, o que possibilita a escolha pelo melhor desempenho ambiental (BERGHOUT, 2008).

A norma ISO 14040:2009 especifica métodos para gestão ambiental, tendo como objetivo descrever os princípios e a estrutura de uma avaliação do ciclo de vida (ABNT, 2009). Assim, essa norma preconiza cinco etapas para a elaboração da ACV, que são:

a) Definição de objetivo: define e descreve o objeto de análise (ORLANDIN, 2013);

   Definição do escopo do estudo: estabelece o contexto do estudo, a avaliação irá ser desenvolvida, com a discussão de pressupostos e qualidade de dados, definindo limites do sistema e a escolha da unidade funcional a ser usada, que é o fluxo ao qual irá se remeter os impactos (CHERUBINI, BARGIGLI e ULGIATI, 2009; ORLANDIN, 2013), sendo uma referência que guia as entradas e saídas do sistema, ou seja, todos os demais fluxos estarão associados a ela;

b) Análise do Inventário do Ciclo de Vida: coleta e modelagem dos dados de entrada e saída, como os fluxos de matéria e energia e as emissões ao meio ambiente, ao longo de todo ciclo de vida de produção do produto em estudo, adaptando os dados à unidade funcional escolhida na etapa anterior; apresentação dos resultados (CHERUBINI, BARGIGLI e ULGIATI, 2009);

c) Alocação: distribuição de cargas ambientais entre os coprodutos da ACV, devendo ser evitada quando possível,realizando, como alternativas a ela a expansão do sistema, incluindo funções adicionais e coprodutos. Porém, se a alocação não puder ser evitada, devem-se especificar em critérios diferentes suas quantidades, como por exemplo, percentual mássico, valor econômico, poder calorífico (ORLANDIN, 2013);

d) Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida: avaliação dos impactos potenciais associados ao uso de recursos e às emissões resultantes dos processos ocorridos ao longo de todo ciclo de vida do produto, calculados a partir dos resultados do inventário. Essa avaliação é realizada por diferentes

categorias de impactos, como por exemplo, impactos no efeito estufa. (CHERUBINI, BARGIGLI e ULGIATI, 2009);

e) Interpretação do Ciclo de Vida: interpretação dos resultados encontrados e, assim, elaboradas as conclusões (CHERUBINI, BARGIGLI e ULGIATI, 2009).

A ACV, realizada considerando as transformações do material e transporte dos insumos, deve ser avaliada levando em conta os fluxos energéticos e materiais, respeitando os critérios estabelecidos pela etapa de construção e avaliação do inventário. As emissões de CO_2 são importantes, na medida em que a quantidade desse gás é alocada sobre os produtos e coprodutos, como por exemplo, a glicerina oriunda do processo de produção de biodiesel a partir de óleos vegetais, como óleo de soja e dendê (ORLANDIN, 2013).

Assim, as principais contribuições dessa ferramenta para o cálculo das estimativas das emissões de GEE do processo de produção do biogás e biodiesel se referem à unidade funcional, fronteira do sistema, sistema de referência e critérios de alocação. Com relação à fronteira do sistema, existem casos de aplicações parciais de ACV, i.e., não contemplam o ciclo de vida completo do produto, mas são suficientes para os objetivos de um determinado estudo. Essas variações são (FERREIRA e CARVAS, 2014):

- *Cradle-to-gate*: eliminação de todos os processos que ocorrem após a produção do produto;
- *Gate-to-grave*: eliminação das etapas anteriores: eliminação de todos os processos que ocorrem antes da produção do produto;
- *Gate-to-gate*: somente a produção do produto é considerada.

Para esse trabalho, a ACV considerará duas etapas principais (Figura 8). A primeira etapa contempla os processos anteriores e posteriores à produção dos combustíveis, com o CO_{2eq} como unidade funcional. Já a segunda etapa da ACV contempla a utilização dos combustíveis nos ônibus, tendo como unidade funcional a soma das emissões de alguns GEE em t de GEE. Não foi possível obter a mesma unidade funcional para as duas etapas principais da ACV porque alguns valores para o cálculo não foram encontrados na literatura, como será explicado no próximo Capítulo.

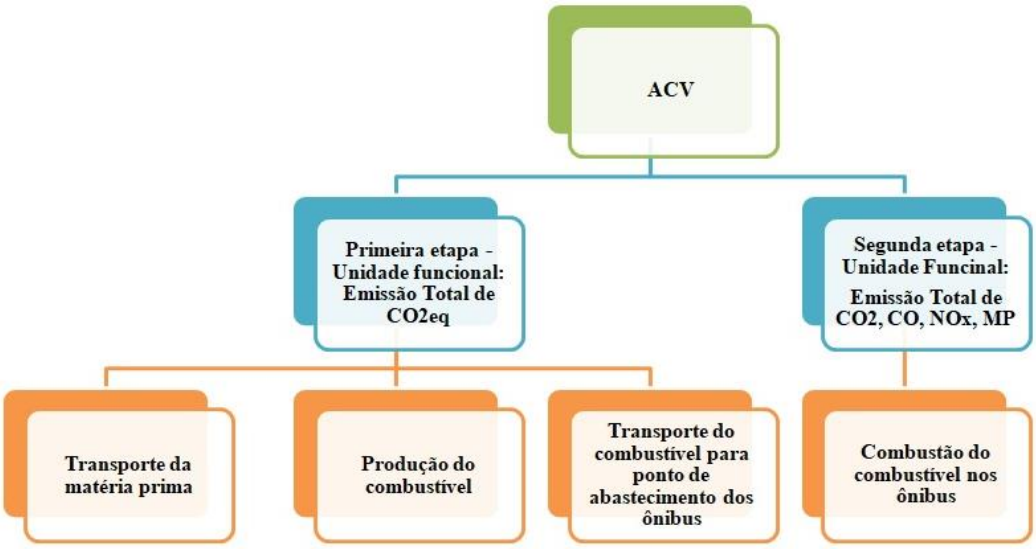


Figura 8 - Etapas da Avaliação do Ciclo de Vida para os combustíveis.

Elaboração própria

4.1 Dióxido de carbono equivalente

Dióxido de carbono equivalente ou equivalência em dióxido de carbono (em inglês, carbon dioxide equivalent), CO_{2eq} ou CO_{2e}, é uma medida internacionalmente aceita que expressa a quantidade de GEE em termos equivalentes da quantidade de dióxido de carbono. A equivalência leva em conta o potencial de aquecimento global dos gases envolvidos e calcula quanto de CO_2 que seria emitido se todos os GEE fossem emitidos como esse gás (BNDES Set, 2018**).**

Assim, para comparar e somar os GEE, a métrica mais usual é o Potencial de Aquecimento Global (*Global Warming Potential* – GWP), que é utilizada para inventários como fator de ponderação para se chegar à unidade comum, que é o CO_{2eq}. Alguns GEE e seus respectivos GWP podem ser visualizados no Quadro 10 (PROCLIMA, 2019).

Quadro 10 - Gases do Efeito Estufa e seu valor para GWP

Gás		GWP
Dióxido de carbono (CO_2)		1
Metano (CH_4)		21
Óxido nitroso (N_2O)		310
Hexafluoreto de enxofre (SF_6)		23.900
Perfluorcarbonos	CF_4	6.500
	C_2F_6	9.200
Hidrofluorcarbonos	HFC-23	11.700
	HFC-125	2.800
	HFC-34a	1.300
	HFC-143a	3.800
	HFC-152a	140

Fonte: PROCLIMA, 2019.

Assim, o CO_{2eq} é usado para comparar as emissões de diversos gases de efeito estufa baseado na quantidade de dióxido de carbono que teria o mesmo GWP. Para uma correta interpretação e comparação dos resultados, a unidade funcional deve ser escolhida como base para estimar as emissões de GEE dos processos produtivos que se quer investigar (MORTIMER et al, 2003). Essas emissões são analisadas em toda a cadeia produtiva. Vale ressaltar que apesar do GWP de todos os gases apresentarem um valor maior que o CO_2, este se apresenta em maior quantidade que os demais, tendo, portanto, maior representatividade no efeito estufa (PROCLIMA, 2019).

4.1.1 Cálculo das emissões de CO_{2eq} e emissões dos gases poluentes

Existem dois métodos conhecidos para calcular as emissões de CO_{2eq} e GEE e que são os métodos *top-down* e *bottom-up*. Essas metodologias foram criadas pelo IPCC em 1996 e são utilizadas até hoje nos inventários de emissões (CETESB, 2019).

4.1.1.1 Método *top-down*

A metodologia top-down determina as emissões com dados mais abrangentes, sendo mais econômico e de fácil implementação e tem finalidade de estimar emissão de poluentes a partir do consumo de combustível em questão. Nesse caso, utilizam-se os fatores de emissão do combustível, não do veículo. Tal metodologia foi utilizado para o cálculo das emissões de GEE pela CETESB (2018), por Vasques, (2018) e Meotti (2019) e será aplicado no presente trabalho. O cálculo da emissão por este método é representada pela Equação 4, adaptada de Carvalho (2012):

$$CO_{2ej} = \sum_{j=1}^{n} (Q_j * FE_{ji}) \quad (4)$$

onde:

CO_{2ej}= Quantidade de dióxido de carbono equivalente do combustível *j* utilizado (t CO_{2e});
Q_j = Quantidade do combustível *j* utilizado (t);
FE_{ji} = Fator de emissão do combustível *j* para o gás i; em t CO_{2ej}/ t *j*, com *i* correspondendo a CO_2, N_2O e CH_4

Esse método foi o escolhido porque foi verificado que as principais etapas do ciclo de vida do biometano e biodiesel envolvem transporte e, consequentemente, a utilização de combustível. Nesse trabalho, serão considerados o diesel e a gasolina para o cálculo dos combustíveis.

4.1.1.2 Método *bottom-up*

Os cálculos das emissões de gases do Efeito Estufa pelo método *bottom-up* podem ser realizados como procedimento adicional ao método *top-down*. Essa metodologia é utilizada para se estimar emissão de poluentes a partir da frota, da distância percorrida e dos fatores de emissão dos veículos (CETESB, 2019). A Equação 5, adaptada do estudo de Zanolli (2015) apresenta o cálculo para essa metodologia:

$$Emiss_{ki} = \sum(FE_{ki} * D_{\hat{o}nibus}) \quad (5)$$

Onde:

$Emiss_{ki}$= emissão total do gás i para a mistura k que irá alimentar o motor para os seguintes cenários: diesel; biometano; biodiesel; diesel e biometano; diesel e biodiesel; biometano e biodiesel

FE_i = fator de emissão do gás i na mistura k;

i = CO_2, CO, NOx, HC, MP;

$D_{\hat{o}nibus}$ = volume da mistura k necessária para abastecer o motor dos ônibus.

Para esse trabalho, essa metodologia será aplicada para o cálculo das emissões nos ônibus, utilizando diesel, biodiesel e biometano. Vale ressaltar que essas emissões não consideram as emissões do CO_{2eq}, i.e., o somatório das emissões de CO_2, CH_4 e N_2O, na medida em que, ao se investigar na literatura as emissões desses gases para combustão de biodiesel e biometano em motores de ônibus, percebeu-se que grande parte das pesquisas considera as emissões de CO_2, CO, óxidos de nitrogênio (NO_x), hidrocarbonetos que não considerando o metano (HC) e materiais particulados (MP) (RIBAS et al (2016); DE PAULO (2019); FALCO, (2017); FERNANDES (2011)), como principais gases que contribuem para poluição do ar nos grandes centros urbanos. Ainda, a Resolução CONAMA nº 403 de 2008 estabelece os limites de emissão para veículos pesados de ciclo diesel e os gases estabelecidos por essa resolução são CO, NOx. HC e MP ((ALMEIDA, OLIVEIRA e D'AGOSTO, 2017).

Assim, esse trabalho analisa o cálculo das emissões do CO_{2eq} no ciclo de vida da produção do biometano, biodiesel e diesel, bem como as emissões de CO, NOx, HC, MP causadas pela combustão nos motores dos ônibus de Volta Redonda, para finalmente, avaliar qual desses combustíveis emite menos GEE ao meio ambiente.

Então, para as etapas consideradas na cadeia produtiva do biometano, biodiesel e diesel, a Equação 4 será aplicada para calcular as emissões de CO_{2eq}, considerado o dióxido de carbono, óxido nitroso e o metano, uma vez que esses três gases são os principais GEE

estudados na literatura que contribuem para o cálculo do CO_{2eq} (MMA, 2018; MANDALHO, 2014). Assim, a Equação 6 representa a soma para o cálculo do CO_{2eq}, demonstrando o fator GWP de cada gás.

$$CO_{2eq} = CO_2 + 21\ CH_4 + 310\ N_2O \quad (6)$$

4.1.2 Unidade Funcional e fatores de emissão

Assim, o CO_{2eq} é usado para comparar as emissões de diversos gases de efeito estufa baseado na quantidade de dióxido de carbono que teria o mesmo GWP. Para uma correta interpretação e comparação dos resultados, a unidade funcional deve ser escolhida como base para estimar as emissões de GEE dos processos produtivos que se quer investigar (MORTIMER et al, 2003).

No caso da massa de biodiesel produzida a partir do óleo residual, podem ser utilizados parâmetros como: por unidade de tempo, neste caso, ano (t CO_{2e}/ano) e por distância percorrida (t CO_{2e}/km percorrido), no caso dele ser usado em meios de transporte (CHERUBINI, BARGIGLIS, ULGIATI, 2009). Para o biometano, consideram-se os parâmetros por tonelada de RSU (t CO_{2e}/t RSU) e a distância percorrida (t CO_{2e}/km percorrido). Visando uma comparação entre ambos os combustíveis, o correto seria usar o mesmo motor, uma vez que a potência pode ser diferente para diferentes motores (MORTIMER et al, 2003).

Para comparar o biocombustível com o seu equivalente fóssil, a unidade funcional mais indicada é distância percorrida (kg CO_{2e}/km percorrido). Já para comparação entre biocombustíveis provenientes de diferentes categorias de matéria-prima ou entre biocombustíveis provenientes de diferentes biomassas residuais, as unidades funcionais mais indicadas são à distância percorrida ou a quantidade de energia contida no combustível, na medida que independe do tipo de matéria-prima ou do processo de sua conversão em combustível (MORTIMER et al, 2003; CHERUBINI, BARGIGLIS, ULGIATI, 2009).

No caso do biocombustível produzido para uso em ônibus urbano, o sistema de referência é o diesel, um combustível derivado do petróleo. A cadeia produtiva para combustíveis derivados do petróleo tem como etapas principais: a extração do óleo cru, o transporte deste até a refinaria, o refino, o transporte do derivado até as distribuidoras e sua

combustão no motor (YAN & CROOKES, 2009). Dessa forma, as emissões do processo de refino estão baseadas em princípios de alocação entre os produtos resultantes deste processo.

Contudo, uma parte dos estudos que analisou balanços de emissão de GEE apresentou resultados divergentes, que podem ter relação com diferenças, como por exemplo, no método de alocação adotado, no sistema de referência, nas tecnologias empregadas na produção, na quantidade de combustível gasto nas máquinas e no transporte, nas distâncias percorridas para transportar a matéria-prima e o biocombustível (CHERUBINI, BARGIGLIS, ULGIATI, 2009).

4.1.2.1 Fatores de emissão

Os fatores de emissão (FE) são valores representativos que estimam a quantidade de um determinado poluente liberado em função de uma atividade associada à liberação desse poluente. O FE tipicamente utilizado nesses casos é a massa de poluente emitida pelos veículos ao percorrer uma distância, com a unidade usual de g/km. Contudo, alguns desses fatores são determinados através de experimentos e cálculos onde são medidas as quantidades emitidas de cada poluente em função da energia demandada, principalmente para veículos pesados como caminhões e ônibus, que são obtidos a partir de teste no motor e expressos em massa de poluente por quantidade de trabalho mecânico realizado (g/kWh) (CETESB, 2018).

Para esse trabalho, os fatores de emissão estão em kg/l e podem ser observados no Quadro 11. Esses fatores serão utilizados para o cálculo do ACV de produção do biodiesel e biometano.

Quadro 11 - Fatores de emissão para a gasolina e diesel

Combustível	**Fator de emissão (em kg/l)**		
	CO_2	**CH_4**	**N_2O**
Gasolina	**2,202**	**0,000033**	**0,0002398**
Diesel	**2,603**	**0,000216**	**0,000108**

Fonte: CETESB (2019)

Para a análise da utilização do biodiesel e biometano nos ônibus urbanos, os fatores de emissão do CO_2 para esses biocombustíveis foram encontrados a partir do método aplicado por Zanotti (2015), que calcula as emissões a partir da conversão de todas as medidas de

consumo de um determinado combustível para uma unidade comum. Esse método foi aplicado na medida que converte à mesma unidade comum o consumo dos biocombustíveis analisados nesse trabalho (biometano e biodiesel), já que são combustíveis diferentes, com PCI e massa específica diferentes. As Equações abaixo são aplicadas nesse método (ZANOLLI, 2015):

$$CC = CA * F_{conv} * 41{,}9 * 10^{9} * F_{corr} \quad (7)$$

onde,

1 tEP = tonelada equivalente de petróleo = 41,9 x 10^9 J;

CC = consumo de energia em TJ;

CA = consumo de combustível (m^3);

F_{conv} = fator de conversão da unidade física de medida da quantidade de combustível para tEP, com base no poder calorífico superior (PCS) do combustível. Os valores desse fator podem apresentar variação anual; assim para esse trabalho esses dados foram retirados do Balanço Energético Nacional (BEN) desenvolvido pelo Ministério de Minas e Energia (MME), referente ao ano de 2018 (EPE, 2019);

F_{corr} = fator de correção de PCS para poder calorífico inferior (PCI). Esse fator foi pré-estabelecido pelo IPCC, que considera que a conversão da unidade comum de energia deve ser feita pela multiplicação do consumo pelo PCI; esses valores foram retirados do BEM (EPE, 2019).

Com o valor do consumo de energia, através da Equação 8, o cálculo da quantidade de carbono emitida na queima de um determinado combustível:

$$QC = CC \times F_{emiss} \times 10^{-3} \quad (8)$$

onde,

QC = conteúdo de carbono emitido, em Gg C;

CC = consumo de energia, em TJ;

F_{emiss} = fator de emissão de carbono (tC/tJ). Esses valores foram retirados também do BNE (EPE, 2019);

10^{-3} = tC/GgC

Finalmente, as emissões de CO_2 podem ser calculadas de acordo com a Equação 9. Vale lembrar que em função dos respectivos pesos moleculares, 44 t CO_2 corresponde a 12 t de C ou 1 t CO_2 = 0,2727 t C (MATTOS, 2001).

$$ECO_2 = QC \times 44/12 \quad (9)$$

onde,

ECO_2 = Emissão de CO_2, em t;

QC = emissão de C, em t.

Assim, as emissões de CO_2 para o biometano, biodiesel e diesel foram calculadas através das Equações 7, 8 e 9. Os dados de entrada para esses cálculos estão no Quadro 12.

Quadro 12 - Parâmetros para as equações das emissões CO_2

Combustível	**Parâmetros***		
	Fatores de conversão (tonelada equivalente de petróleo/m³) F_{conv}	Fator de correção F_{corr}	Fatores de emissão do carbono (tC/TJ) F_{emiss}
Biodiesel	0,792	0,95	20
Biometano	0,88	0,90	15,3
Diesel	0,848	0,90	20,2

Fonte: * EPE, 2019

Como dito anteriormente, as emissões na combustão dos ônibus contemplaram, além do CO_2, os gases CO, NOx, HC, MP. Os fatores de emissão para esses gases estão no Quadro 13. Vale ressaltar que o biometano como combustível automotivo, tem comportamento semelhante ao GNV (Gás Natural Veicular), portanto, os fatores de emissão para esse combustível foram os encontrados para o GNV (VID, 2018). A diferença do GNV para o biometano é que ele tem origem fóssil, como a gasolina e o diesel.

Quadro 13 - Fatores de emissão para cada combustível

Combustível	**Fator de emissão (em kg/l)**				
	CO_2 *	**CO****	**NOx****	**HC****	**MP****
Diesel[1]	2,367	0,0095	0,0596	0,00168	0,00092
Biodiesel[2]	2,310	0,0076	0,0618	0,00079	0,00026
Biometano[3]	1,8602	0,0121	0,0154	0,00126	-

Fonte: *Calculado pela autora; ** CETESB (2019); PIAN et al (2009)

Para um melhor entendimento do ciclo de vida do biometano e do biodiesel, o próximo capítulo detalhará as etapas pertinentes a cada um desses biocombustíveis, bem como as equações que foram utilizadas para o cálculo de emissão de CO_{2eq}.

5. Estudo de Caso

Esse capítulo apresentará os principais tópicos que foram considerados para o cálculo das emissões do CO_{2eq} no ciclo de vida da produção do biometano e do biodiesel nas cidades de Barra Mansa e Volta Redonda. Para isso, este capítulo trará dados sobre:

- apresentação das cidades de Barra Mansa e Volta Redonda, bem como sua importância para sustentabilidade do Estado do Rio de Janeiro;
- principais características do aterro controlado que recebe o RSU, que posteriormente irá gerar o biometano;
- mecanismos para a coleta do óleo residual, que será convertido em biodiesel;
- transporte público em ônibus urbano em Volta Redonda.

5.1 Breve Histórico de Barra Mansa e Volta Redonda

O município de Barra Mansa se estende por 547,2 km² e conta com 177.813 habitantes, segundo o censo de 2019, sendo sua densidade demográfica de 324,9 habitantes por km² (IBGE, 2019). Formada na margem direita do Rio Paraíba do Sul e criada em 1832, a cidade de Barra Mansa teve diversos ciclos econômicos, possuindo diversas funções comerciais, passando inicialmente pelas atividades de mineração, no fim do século XVIII; pelo plantio de café, devido principalmente à atração de colonos para suas terras, no início do século XIX; pela pecuária de corte extensiva, evoluindo posteriormente para a produção leiteira. Somente no final da década de 30, teve início seu desenvolvimento industrial, com a implantação de setores ligados às indústrias alimentícias. O grande marco da expansão industrial no Brasil, deflagrada no pós-guerra, foi representado pela instalação, na década de 40, da primeira usina da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), em Volta Redonda, na época ainda distrito de Barra Mansa. A indústria metalúrgica e mecânica se estabeleceu na década de 50 (BARRA MANSA, 2018).

Volta Redonda, através da promulgação da lei n° 2.185, de 17 de julho de 1954, tornou-se município e tem esse nome originado graças à geografia da região, uma vez que o rio Paraíba do Sul corta o município, fazendo uma curva sinuosa, ou seja, uma volta redonda

(VOLTA REDONDA, 2019). Conhecida como Cidade do Aço, devido à presença da CSN, essa cidade conta com 257.803 habitantes, possuindo uma densidade demográfica de 1.412,75 hab/km² (IBGE, 2019).

Juntas, Barra Mansa e Volta Redonda exercem influência direta sobre grande parte da Região do Médio Paraíba, bem como sobre a porção meridional do Centro-Sul fluminense, devido principalmente a conurbação, isto é, uma extensa área urbana formada por essas duas cidades que foram surgindo e se desenvolvendo um ao lado do outro, formando um conjunto. O crescimento está relacionado à implantação da CSN, que desempenhou papel multiplicador na atividade industrial da região, com conseqüente aumento de serviços.

Contudo, o crescimento dessas cidades gerou aumento do número de resíduos e algumas medidas foram tomadas na tentativa de dar um correto destinamento a esse resíduos. Uma iniciativa foi a criação do Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de Barra Mansa (PMGIRS - Barra Mansa/RJ), que é um instrumento legal que tange as disposições acerca da limpeza pública e do manejo de resíduos sólidos, objetivando assegurar meios para redução, reutilização e reciclagem desses. Esse plano é importante na medida que promove o senso de sustentabilidade e ainda, atribue responsabilidades ao poder público, fabricantes, distribuidores, comerciantes e geradores de resíduos sólidos. Esse plano também possibilitou a criação de alguns programas como o: Barra Mansa Sustentável, que objetiva a valorização do meio ambiente e o desenvolvimento do município com sustentabilidade, através de indicadores como o crescimento e melhoria da qualidade de vida de seus cidadãos; Cidade Limpa – Cidade Sustentável, que utiliza como indicadores o percentual de resíduos coletados de coleta seletiva e de logradouros limpos, com o objetivo de zelar pela limpeza urbana e pela destinação adequada dos RSU (PREFEITURA MUNICIPAL DE BARRA MANSA, 2017).

Um outro resíduo gerado que merece destaque é o óleo residual. Em 2007, a prefeitura de Volta Redonda inaugurou um programa que promoveu a captação e a reciclagem do óleo de cozinha usado para ser transformado em biodiesel. A Associação de Coletores de Resíduos Líquidos e Sólidos começou a trabalhar em escolas do município, orientando alunos, funcionários e professores por meio de palestras, cartazes e folhetos. As escolas foram cadastradas e receberam bombonas plásticas, além de serem remuneradas para cada litro de óleo vegetal coletado. Ainda, estabelecimentos comerciais como bares, pensões, lanchonetes, restaurantes, pastelarias, hotéis e que trabalhem com frituras também puderam doar para a escola de sua preferência (CNM, 2007).

A seguir, serão apresentadas as características do CTR de Barra Mansa, da coleta de óleo residual em Volta Redonda e o funcionamento do transporte público de Volta Redonda.

5.1.1 Centro de Tratamento de Resíduos de Barra Mansa

O aterro que foi estudado para a geração de biometano foi o Centro de Tratamento de Resíduos (CTR), localizado no Km 3 da Estrada Bananal, no bairro de Cotiara, na cidade de Barra Mansa, no Estado do Rio de Janeiro. Inaugurado em 2012, o CTR recebe diariamente cerca de 750 toneladas de resíduos, porém comporta até 950 toneladas/dia. Além disso, esse CTR também recebe RSU de outras cidades: Volta Redonda, Porto Real, Quatis, Rio Claro, Pinheiral, Bananal e Arapeí. O CTR é gerenciado pela Foxx Haztec (BARRA MANSA, 2019).

O CTR tem uma área total de 1.936 mil metros quadrados, o que garante a unidade pelo menos 50 anos de vida útil. Para 2020, o CTR terá a primeira estação de tratamento do chorume, que permite economicamente o tratamento do chorume, sem a necessidade do tratamento deste líquido em uma estação de esgoto (BARRA MANSA, 2019).

O aterro também fomenta a economia local, gerando aproximadamente 150 empregos diretos e indiretos, arrecadação de impostos (Imposto Sobre Serviço- ISS) e pagamento de outorga pela operação do aterro sanitário, que rende ao município cerca de R$ 90 mil/ mês, acrescidos de outros R$ 18 mil referentes à outorga do biogás/biometano. Além disso, o CTR extinguiu o trabalho dos catadores de lixo, absorvendo grande parte dos catadores como funcionários do aterro (BARRA MANSA, 2019).

Dotado de tecnologia avançada, o CTR produz biometano, através de um sistema de captação e queima em flare, com capacidade de 1.220 Nm^3/h, gerando cerca 635.000 kWh de energia, volume suficiente para abastecer quase 4 mil residências mensalmente (BARRA MANSA, 2019).

Esse centro de tratamento de resíduos é gerenciado pela empresa Haztec, que atende seis CTRs e duas unidades de tratamento de resíduos perigosos. No Rio de Janeiro, essa empresa é responsável pelo gerenciamento do CTR de Nova Iguaçu, São Gonçalo e Caxias (HAZTEC, 2019).

5.2 Coleta de óleo residual e produção do biodiesel em Volta Redonda

A coleta de óleo residual na cidade de Volta Redonda é realizada pelas empresas Óleo Local e Ecoóleo, que arrecadam cada uma, 30000 l de óleo residual/mês, ou seja, um total de 720.000 l de óleo residual/ano. Com relação a Óleo Local, as informações para a realização dos cálculos foram obtidas através de contato por email com a empresa, que relatou que os principais estabelecimentos de onde é recolhido o óleo residual são indústrias, bares, restaurantes e lanchonetes; que são 3 veículos que realizam a coleta do óleo; e que são percorridos 2.700 kilometros durante um mês.

Devido à falta de informações concretas, a distância percorrida pelos utilitários da empresa Ecoóleo foram estimadas, considerando que a coleta de óleo residual ocorre uma vez por semana em cada estabelecimento. Para efeito de cálculo, foram utilizadas informações contidas no site da prefeitura de Volta Redonda, que especificavam quais escolas do município que coletaram o óleo residual no período considerado para o estudo, que é o ano de 2018 (VOLTA REDONDA, 2018). Ainda foi descoberto, através de entrevista do presidente e sócio fundador da Ecoóleo, publicada no site *YouTube* (YOUTUBE, 2019) que essa empresa também coleta óleo residual de supermercados e da CINBAL, que é uma empresa especializada em serviços de corte, envernizamento, litografia e transporte de folhas metálicas (CINBAL, 2019).

Após a coleta, as bombinas que armazenam o óleo residual são armazenadas nas sedes das empresas e, em seguida, são enviadas à CESBRA, que é uma companhia química atuante desde 1950 no Rio de Janeiro. Inicialmente criada para atender a demanda pela Companhia Siderúrgica Nacional, a empresa fabrica produtos químicos à base de estanho. Em 2009, a empresa decidiu entrar no mercado de biodiesel (BIODIESELBR, 2018). Assim, será considerado que esse fábrica pode produzir o biodiesel a partir do óleo residual. Mais adiante, será apresentado o ciclo de vida do biometano e do biodiesel, considerando a quantidade de CO_{2eq} que é emitida em cada etapa de produção desses biocombustíveis. O próximo tópico tratará do modal rodoviário presente em Volta Redonda.

5.3 Transporte urbano em Volta Redonda

Segundo dados do IBGE (2019), dos 137.147 mil veículos circulantes em Volta Redonda no ano de 2018, os ônibus correspondem a apenas 655 do total veículos e são o meio de transporte público da população da cidade. Pelo Quadro 14, tem-se um panorama completo dos tipos de veículos circulantes.

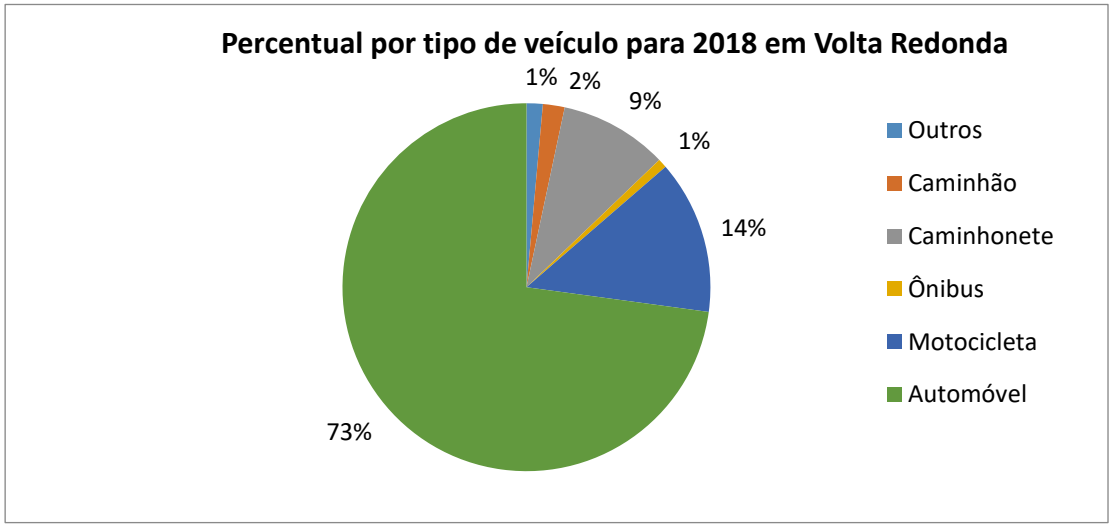
Quadro 14 - Tipo de veículos circulantes em Volta Redonda em 2018

Tipo de veículos	Quantidade
Automóvel	98821
Bonde	0
Caminhão	2334
Caminhão trator	290
Caminhonete	7520
Camioneta	5503
Chassi plataforma	1
Ciclomotor	288
Micro-ônibus	452
Motocicleta	16240
Motoneta	2281
Ônibus	655
Outros	8
Quadriciclo	0
Reboque	1298
Semi-reboque	302
Sidecar	2
Trator de esteira	0
Trator de rodas	7
Triciclo	50
Utilitário	1095
Veículos Totais	137147

Fonte: IBGE (2019)

Assim, os ônibus correspondem a 1% dos tipos de veículos circulantes enquanto os automóveis correspondem a 73% dos veículos, como observado no Gráfico 2. Esse número exorbitante de automóveis é justificado pelo aumento de carros circulantes. Em 2018, foram licenciados 2.716 veículos novos contra 2.465 em 2017, representando uma alta de 10,18% (DIÁRIO DO VALE, 2020).

Gráfico 2 - Percentual de tipo de veículos circulantes de Volta Redonda em 2018



Fonte: Adaptado de IBGE (2019)

Com pouco mais de 250 mil moradores, Volta Redonda tem uma taxa de 1,8 habitantes por veículo e um dos principais problemas citados pelos moradores é que esse excesso de veículos nas ruas dificulta a procura de vagas para estacionar (G1, 2018). Esse crescimento da venda de carros é preocupante na medida que a maior emissão de GEE é diretamente proporcional ao aumento do número desses veículos circulantes. Esse fato demonstra a importância dos ônibus como estratégia na mitigação de CO_2 equivalente.

Ainda analisando uma série histórica de 12 anos (Figura 9), observou-se que 2018 foi caracterizado pelo aumento dos ônibus circulantes. Isso, de certa forma, impactará nos resultados encontrados, uma vez que uma maior quantidade de CO_2 foi emitida nesse ano de análise.

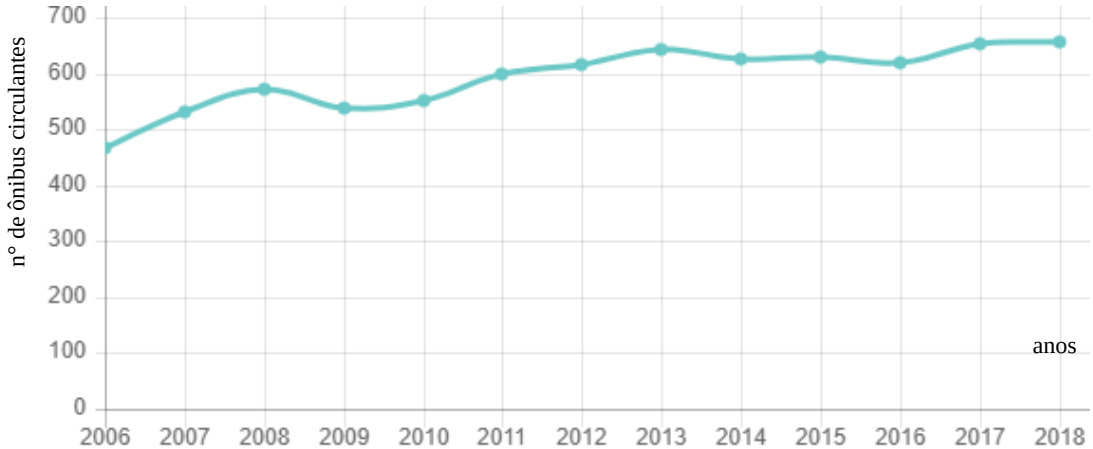


Figura 9 - Gráfico que apresenta a série histórica com número de ônibus circulantes em Volta Redonda.

Fonte: IBGE (2018)

5.3.1 Ônibus em Volta Redonda

Segundo o site da prefeitura de Volta Redonda, as empresas responsáveis pelo transporte coletivo são a Viação Agulhas Negras, Viação Elite, Viação Pinheiral e Viação Sul Fluminense. Vale destacar que em 2019, ocorreu uma crise no transporte público do município. A Sul Fluminense, que cobria a maioria das linhas de ônibus, entrou em crise inicialmente por desentedimento dos sócios, passando assim por uma intervenção judicial e para complementar esse quadro, 30 veículos foram retirados de circulação, devido ao mal estado de conservação; essa situação fez com que o prefeito Samuca Silva decretasse a caducidade da concessão da empresa e, assim, determinou a licitação das linhas (REVISTA DO ÔNIBUS, 2019) da Sul Fluminense. Essa situação não dificultou o presente trabalho, uma vez que as emissões de CO_2 equivalente na ACV foram calculadas para o ano de 2018.

A frota da Viação Cidade do Aço é composta de ônibus convencionais, executivos e urbanos, micro-ônibus e *sprinter*s, que são utilizados no transporte diário de pessoas, no fretamento eventual e contínuo, contando com 200 veículos, equipados com carrocerias Busscar e Marcopolo, das marcas Mercedes-Benz, Scania e Volkswagen (CIDADE DO AÇO, 2019). A Viação Cidade do Aço é uma empresa de ônibus fundada em 1951, no estado do Rio de Janeiro. Iniciou suas operações entre as cidades de Barra Mansa e Volta Redonda. Em seguida, ampliou sua atuação para a capital carioca, Baixada Fluminense e o Sul de Minas Gerais. Entre os destinos oferecidos pela Viação Cidade do Aço, é possível comprar passagens de ônibus online para cidades, como Itatiaia, Resende, Caxambu e Rio de Janeiro. Contudo, como o foco do trabalho é a emissão de CO_2 em Volta Redonda, será considerado somente as viagens dentro desse município. Assim, essa empresa conta com somente duas linhas que operam em Volta Redonda.

Segundo informações da Viação Elite (2019), a distância percorrida pelos ônibus da empresa é, em média 600.000 kilometros por mês, transportando 1.300.000 pessoas por mês, contando com 16 linhas. Assim, utilizando esse valor da distância percorrida, foram estimadas as distâncias para as outras empresas, conforme pode ser observado no Quadro 15.

Quadro 15 - Distâncias percorridas pelos veículos das empresas.

Empresa	Número de linhas	km total em 1 mês	km total em 1 ano
Viação Cidade do Aço	2	75.000	900.000
Viação Elite	16	600.000	7.200.000
Viação Pinheiral	8	300.000	3.600.000
Viação Fluminense	25	937.500	1.125.000

Assim, a distância total percorrida por todos os ônibus circulantes de todas as linhas em Volta Redonda no ano de 2018 foi de 22.950.000 km. Considerando o consumo de 2,3 km/l de diesel, estimou-se que o diesel necessário para abastecer os ônibus é 9.978.260,87 litros.

Em 2019, a prefeitura de Volta Redonda, instituiu o decreto nº 15.653, que aprovou o Plano de Mobilidade Urbana Sustentável do Município de Volta Redonda. Uma das metas desse plano para o transporte coletivo é aumentar a velocidade média dos ônibus em 50%: dos atuais 17km/h para 25km/h até 2025. Sendo assim, como a análise dos cenários foi para o ano de 2018, será considerado que a velocidade média dos ônibus é de 17 km/h (VOLTA REDONDA EM DESTAQUE, 2019).

Com esses dados, calculou-se que em 1 dia, 1 ônibus percorre cerca de 104,3 km em 6,11 h.

6. Avaliação do Ciclo de vida para o biometano e biodiesel

Como dito anteriormente, o ACV é uma ferramenta eficaz para visualizar as emissões de GEE na cadeia de produção e, posteriormente, conversão do biometano e do biodiesel. Assim, as seções a seguir apresentarão cada ciclo de vida desses biocombustíveis.

Conforme explicado no Capítulo 4, as avaliações do ciclo de vida para esse trabalho têm duas etapas principais: antes e depois da produção dos combustíveis; e utilização dos combustíveis nos ônibus (Figura 8). Assim, para a primeira etapa, será considerado o transporte da matéria-prima até o local de produção do combustível, a sua produção e o transporte do combustível até os ônibus, enquanto que a segunda etapa considera as emissões de GEE na combustão no motor dos ônibus.

Visando uma melhor análise, as avaliações do ciclo de vida serão separadas por combustível: ACV para o biometano, biodiesel e diesel, conforme pode ser observado na Figura 10.

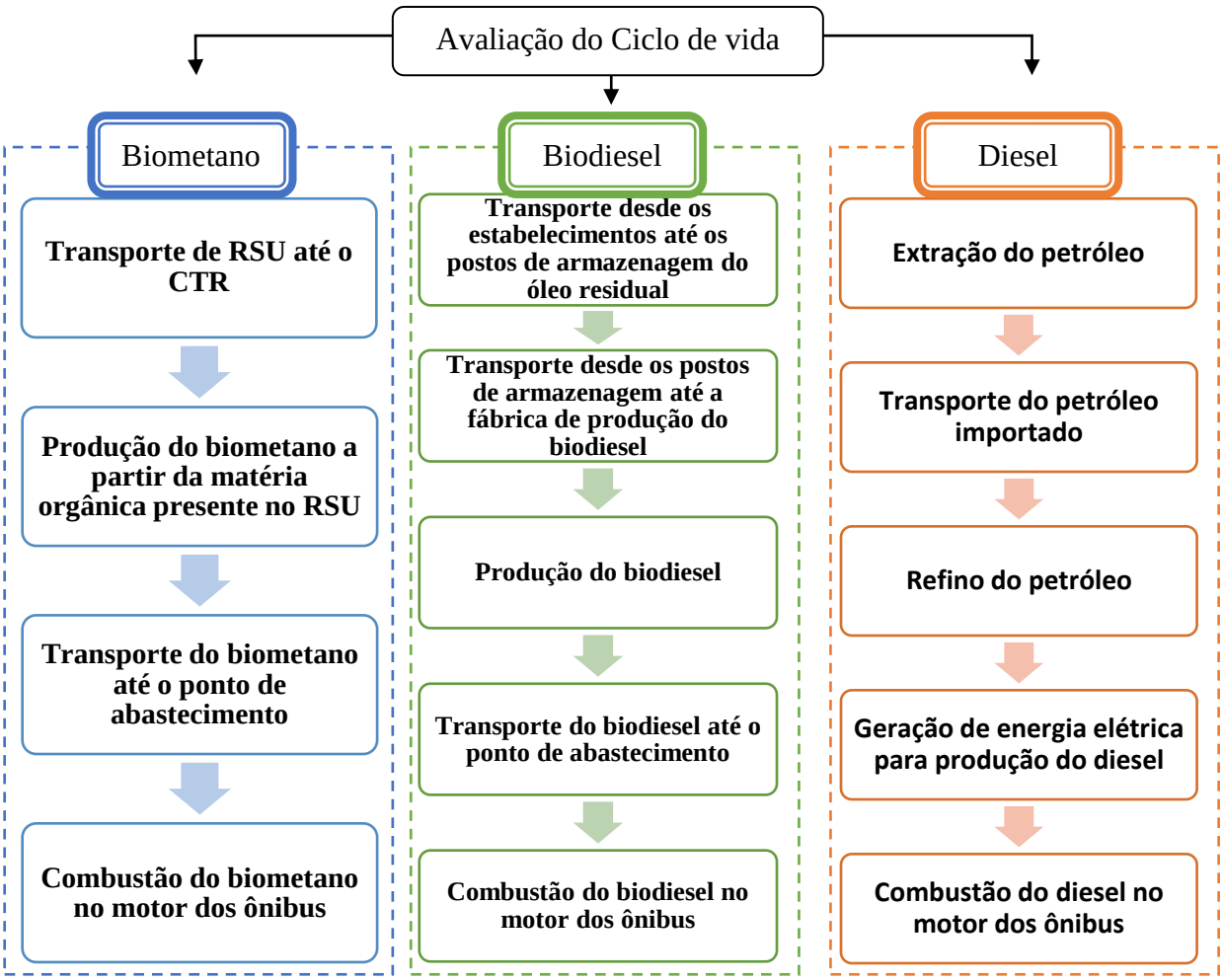


Figura 10 - Etapas da ACV para os combustíveis analisados

6.1 Avaliação do Ciclo de Vida para o biometano

Para o cálculo da emissão de CO_2 equivalente a partir do ciclo de vida do biogás originado a partir do RSU, foram consideradas quatro etapas: 2 de transporte, 1 de produção do biocombustível e uma de combustão no motor do ônibus. Esse ciclo de vida completo é observado na Figura 11.

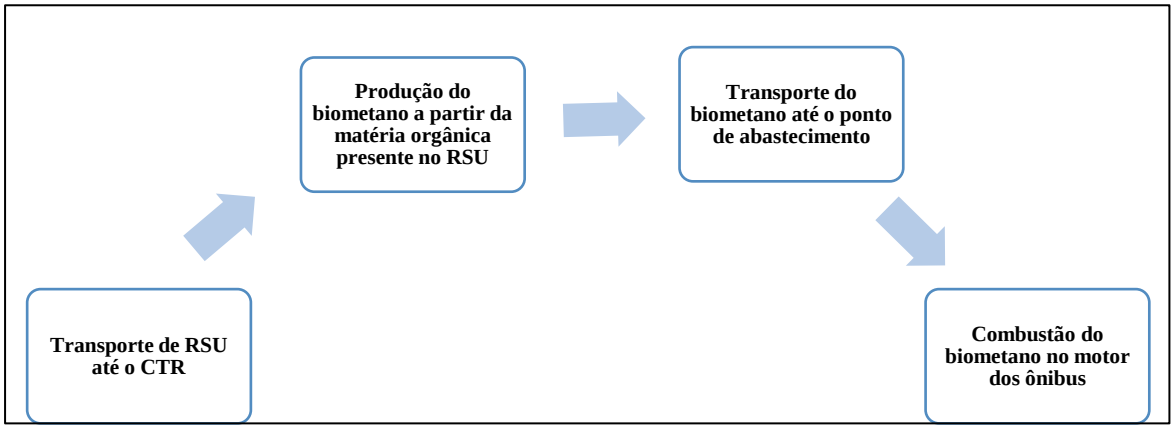


Figura 11 - Ciclo de vida da produção de biometano a partir do RSU.

Fonte: Elaboração Própria

6.1.1 Transporte de RSU até o CTR

Nessa etapa ocorre o recolhimento do RSU em pontos espalhados pela cidade. Os caminhões compactadores de lixo da prefeitura de Barra Mansa percorrem rotas que são divididas por setores (1 a 12) e por dias da semana, podendo ser melhor observadas nos Quadros 16, 17, 18 e 19. Essas distâncias percorridas por esses caminhões foram encontradas no site da Prefeitura de Barra Mansa e foi considerado que esse tipo de caminhão tem um consumo médio de 3,6 km/l (CETESB, 2019).

Quadro 16 - Rotas dos caminhões nos setores 1,2, 3, 4, 12.

Segunda-feira, Terça-feira, Quarta-feira		
Setor	**Itinerário dos caminhões compactadores de lixo**	**Distância total percorrida (ida e volta) em km**
1	Ary Parreiras → Vila Coringa → Jardim Central → Vila Brigida → Km 4 → Rua Ozório G. de Brito → Água Comprida → Vila Nova	32
2	Loteamento Sofia → Loteamento Chinês → Lot. Aiuruoca → Belo Horizonte → Vista Alegre → São Vicente → Santa Maria II → Vila Ursulino	43,7
3	São Domingos → Siderlândia Cantagalo → Morada Verde → Rua José Gonçalves Rebollas → Santa Maria I → Cond. Morada do Sol → Cond. Morada da Colônia → Residêncial Aymoré → Residencial Vila Primavera → Residêncial São Lucas → Col.St° Antônio/ Perimetral → Residencial Novo Horizonte	65,3
4	Vale do Paraíba → Getúlio Vargas → S. Francisco → Santa Isabel → R. Elias Geraldine → Parque Independência → V. Orlandélia → Cristo Redentor → Rua15/Orlando Brandão	39,4
12	Vila Maria → Saudade → Via Saturnino Braga → Margem da Dutra → Albo Chiesse → Ministro Amaral Peixoto → Saudade - Parte de cima → Bom Pastor	51

O setor 3 corresponde à maior kilometragem percorrida pelos caminhões nas segundas, terça e quartas-feiras, com aproximadamente 30% do total, sendo seguido pelo setor 12 e 2, com 22% e 19%.

Quadro 17 - Rotas dos caminhões nos setores 5, 6, 7, 8, 9B, 10B, 13.

Terça-feira, Quinta- feira e Sabádo		
Setor	**Itinerário dos caminhões compactadores de lixo**	**Distância total percorrida (ida e volta) em km**
5	Vila Barabará/ Sest Senat → Boa Sorte → São Luiz → Apóstolo Paulo → Lot. Chinês (Piteiras) → Piteiras → Jardim Alice → São Judas Tadeu → Boa Vista I → Sol da Dutra	51,4
6	São Genaro → Entanha → Jardim Marilu → Santa Lúcia → Goiabal → Santa Clara → Jardim Marajuara → Lot Nova Esperança → Jardim Primavera → Roselândia I e II	34
7	Margem da Dutra/ Aspen → Santa Rita → Jardim Redentor → Jardim Guanabara → Assunção → Metalurgico → Santa Inês → Minerlândia → Morada da Granja → São Sebastião → Nove de Abril → Rua K1 → Rua Jair Alves dos Santos	65,5
8	Vila Elmira → Paraíso de Baixo → Paraíso de Cima → Boa Vista II e III → Rua José Ferreira de Matos → Mangueira → Jardim Ponte Alta → Cajueiro → Recanto do Sol	32,7
9B	Morro do Cruzeiro → Loteamento Chácara	21,2
10B	Av. Homero Leite → Rua General Barcelos → Av. Ministro Amaral Peixoto → Boa Vista (centro) → Nossa Senhora de Fátima → São Silvestre	49,4
13	Cotiara → Vila Independência → Jardim América → Rod Saturnino Braga → São Pedro → Monte Cristo → São João → Boa Sorte	34,6

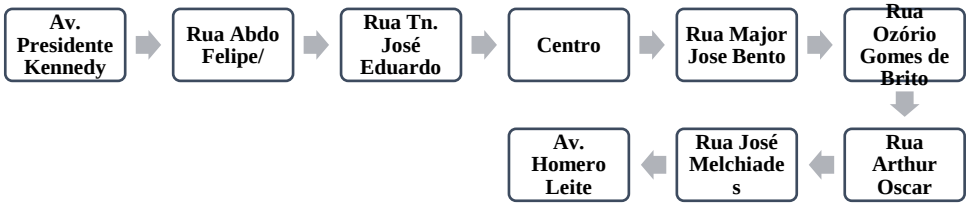
Nas rotas percorridas na terça-feira, quinta-feira e sábado, a rota 7 é a com maior kilometragem, correspondendo a aproximadamente 26% do total.

Quadro 18 - Rotas dos caminhões nos setores 9, 10, 11 e 11B.

Segunda-feira à Sábado		
Setor	**Itinerário dos caminhões compactadores de lixo**	**Distância total percorrida (ida e volta) em km**
9	Varzea do Quartel → Verbo Divino → Rua São Sebastião → Rua José Alves Caldeira → Av. Coutinho → UBM → Rua José Hipólito (PM) → Roberto Silveira → Rua Eduardo Junqueira	43,9
10	Rua Major Luiz Alves (Boa Sorte) → Rua Crispim José F. Neto → Rua Dr. Roberto Lang → Rua Dario Aragão* → Av. Joaquin Leite → Rodovia Sérgio Braga → Av. Presidente Kennedy (ano bom)	44,1
11	Rua Major José Bento → Rua Ozório Gomes de Brito → Rua Arthur Oscar → Rua São Pedro → Rua Tancredo Neves → Rua Cristiano R. Meirelles Filho → Rua Tenente José Eduardo → Ano Bom → Santa Rosa	37,6
11B	Rua Antônio Graciano da Rocha	27

Aos domingos, somente o setor 14 tem coleta de lixo, conforme pode ser observado no Quadro 19.

Quadro 19 - Rotas dos caminhões no setor 14.

Domingo		
Setor	**Itinerário dos caminhões compactadores de lixo**	**Distância total percorrida (ida e volta) em km**
14		38,1

Assim, as emissões dessa etapa estão relacionadas à quantidade de diesel consumida pelos caminhões compactadores na coleta dos resíduos, conforme Equação 10:

$$E_{transp\text{-}RSU} = \sum (Q_{diesel} * FE_{diesel\,i}) \quad (10)$$

onde:

$E_{transp\text{-}RSU}$ = Emissões de CO_{2e} transporte de RSU até o CTR, em tCO_{2e};

Q_{diesel} = Quantidade de diesel utilizada pelos veículos no transporte de RSU até o CTR, em t de diesel;

$FE_{diesel\,i}$ = Fator de emissão do diesel para o gás *i*, em g/kg.

Os fatores de emissão do GEE analisados, considerando o diesel queimado pelos caminhões encontram-se no Quadro 11 do Capítulo 4. A quantidade de diesel utilizada foi calculada através da distância percorrida pelos 15 caminhões compactadores que recolhem o RSU; essa informação foi obtida através de contato com a Secretaria Municipal de Infraestrutura de Barra Mansa.

6.1.2 Produção do biometano a partir da matéria orgânica presente no RSU

Modelos para estimar a produção de biometano em aterros são ferramentas úteis para projetar essas emissões ao longo do tempo e podem ser usados para dimensionar sistemas de coleta de biogás, avaliações e projeções de recuperação de energia e para regulamentações de emissões. Em comparação com outros métodos, os modelos teóricos apresentam vantagens, tais como o baixo custo e resultados rapidamente observáveis. Contudo, esses modelos estimam a produção de biogás durante anos de degradação do RSU e o foco desse trabalho é a produção de biometano durante um ano.

Segundo Ferreira (2015), Rocha (2016) e Araújo (2017), a quantidade equivalente a uma tonelada de resíduos sólidos urbanos produz cerca de 400 m³ de biometano em condições normais de temperatura e pressão. O biometano será produzido a partir da decomposição anaeróbia da matéria orgânica presente no RSU. Soares (2011) estimou que o teor de matéria orgânica médio é de 32%, sendo assim, essa porcentagem será utilizada para cálculo. Então, dos 70.338,9 ton de RSU que foram recebidas pelo CTR em 2018 (dado pelas Prefeituras de Volta Redonda e Barra Mansa), cerca de 22.508,45 ton foram utilizadas para geração do biometano.

Assim, com a estimativa de produção do biometano e com o volume de RSU, foi possível obter uma aproximação do volume teórico de biometano produzido, que é de 9.003.379,2 m³/ano. Considerando que a massa específica do biometano é 0,717 kg/m³ (ARAÚJO, 2017), esse volume encontrado gera 6.455,43 t de biometano/ano. O Quadro 20 resume os parâmetros utilizados para esses cálculos.

Quadro 20 - Parâmetros para determinar o biometano gerado no ano de 2018

Parâmetros	Quantidade	Unidade
RSU total	**70.338,90***	t
RSU convertido em matéria orgânica	**22.508,45**	t
Volume de biometano produzido	**9.003.379,20**	m³
Massa específica do biometano	**0,717****	kg/m³
Massa de biometano produzida	**6.455,43**	t

*Fornecidos pela Prefeituras de Volta Redonda e Barra Mansa/** Araújo (2017)

As emissões dessa etapa consideraram os valores encontrados por Borba et al (2018), que realizaram um estudo para estimar a quantidade de CO_{2eq} emitida pelo aterro sanitário de

Seropédica. Esse estudo foi escolhido como fonte uma vez que a cidade de Seröpedica possui características climáticas semelhantes à Barra Mansa e que a produção do biometano é influenciada pelo clima na região em que está localizado o aterro. Assim, Borba et al encontraram os valores de CO_{2eq} emitido, baseado na quantidade de RSU depositada no aterro em 1 ano e esses valores foram utilizados para calcular a quantidade de CO_{2eq} emitida pelo RSU disposto no CTR no ano de 2018. Esses valores estão no Quadro 21.

Quadro 21 - Emissão de CO_{2eq} encontrada por Borba et al.

Itens	Quantidade (t)
Resíduos dispostos	5.100.000,000
Emissão de CO_{2eq}	1.005.381,493

Fonte: Borba et al, 2018

Assim, considerando a estimativa de Borba et al (2018), considerou-se que para 70.338,90 t de RSU depositada em no CTR de Barra Mansa, a quantidade de CO_{2eq} emitida na produção do biometano é de 13.839,025 t.

6.1.3 Transporte do biometano até o ponto de abastecimento

Para uma melhor análise das emissões de CO_{2eq} nessa etapa, será considerado que o biometano, bem como o biodiesel, serão transportados até um ponto de abastecimento hipotético, que estará localizado entre a CESBRA e o CTR e que será responsável pelo abastecimento dos ônibus de Volta Redonda. Um ponto de abastecimento é uma instalação para o suprimento de combustíveis de equipamentos móveis, veículos automotores terrestres, aeronaves, embarcações ou locomotivas de posse do detentor da instalação (ANP, 2019b).

Assim, através da ferramenta *Google Maps*, analisou-se a distância entre os dois pólos de produção dos biocombustíveis (Figura 12) e, assim, foi possível verificar que a melhor localização para um ponto de abastecimento seria em um ponto médio entre os dois pontos de produção do biometano e do biodiesel, ou seja, entre CTR e a CESBRA (Figura 12 e 13).

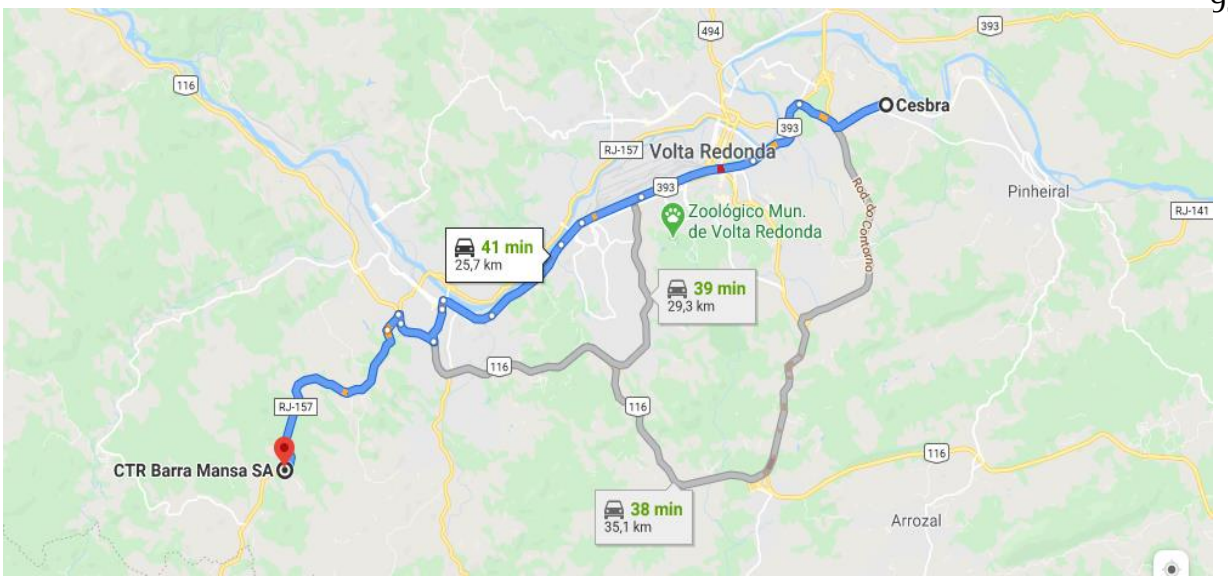


Figura 12 - Distância total entre a CESBRA e o CTR

Fonte: *Google Maps*

Dada essa distância total, a escolha de um ponto de abastecimento estaria localizada a 14 km do CTR (Figura 13).

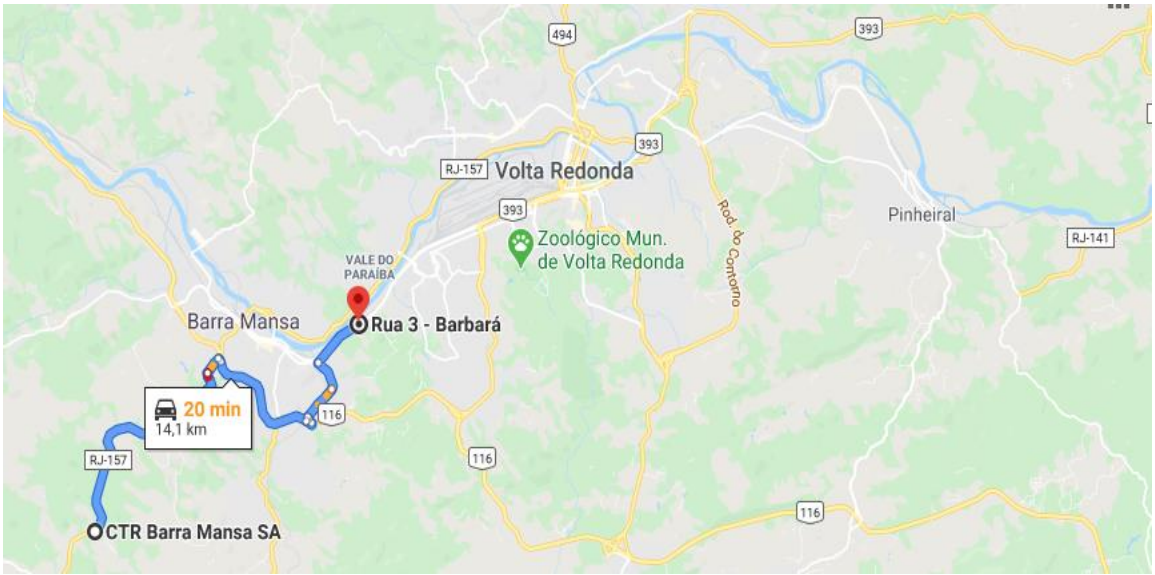


Figura 13 - Distância do CTR até o ponto de abastecimento hipotético.

Fonte: *Google Maps*

Para a CESBRA, esse ponto estaria localizado a uma distância de 13 km, conforme pode ser observado na Figura 14.

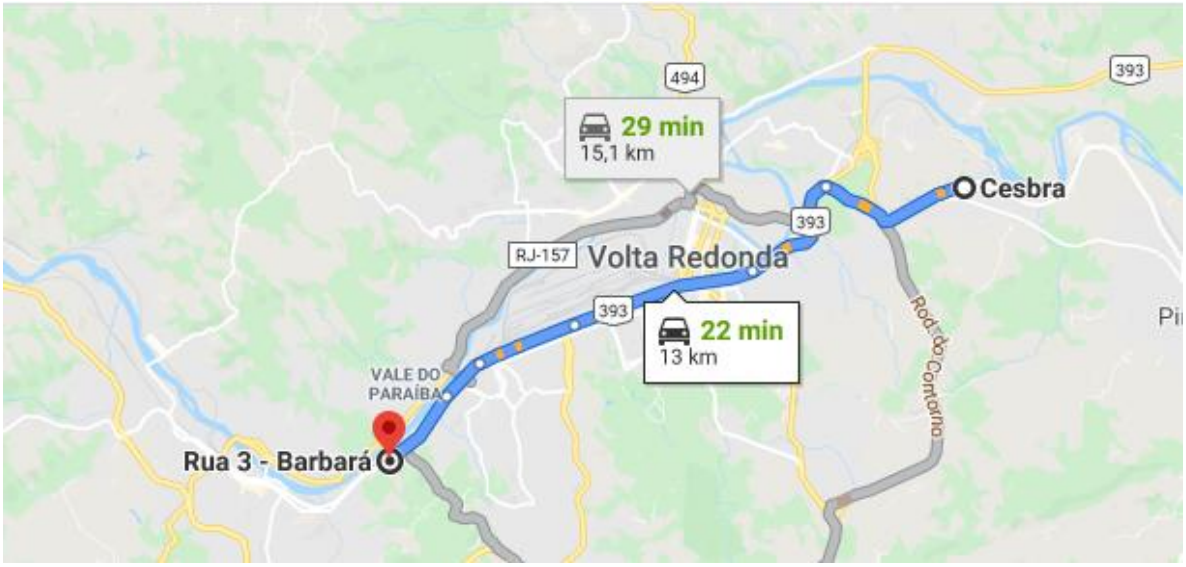


Figura 14 - Distância da CESBRA até o ponto de abastecimento hipotético. Fonte: Google Maps

Vale destacar que o endereço escolhido tem área suficiente para construção de um ponto de abastecimento e ainda, é localizado perto de uma Fundação de apoio à Escola Técnica (FAETEC), o que fomentaria a oferta de emprego para os alunos ingressantes nessa instituição. Ainda, a FAETEC de Barra Mansa possui curso de Tecnologia em Gestão Ambiental (FAETEC, 2018), contribuindo ainda mais para o incentivo de práticas sustentáveis e, principalmente, da utilização de biocombustíveis em automóveis.

O transporte do biometano foi realizado através de carretas que rebocam conjuntos de cilindros de gás, comprimido a 250 bar. Um caminhão desse tipo pode transportar até 4 mil m³ de gás, em feixes de 120 cilindros, com 12 m de comprimento cada um. Assim, o modelo de carreta escolhido foi o da marca Scania R500, modelo de 2018, que consome 4 km/L (TRANSPORTE MUNDIAL, 2019).

Para essa etapa, foi considerada somente a quantidade necessária para abastecer os ônibus durante 1 ano.

A Equação 11 corresponde à emissão decorrente desse transporte:

$$E_{\text{transporte biometano}} = \sum (Q_{diesel-caminhõestanque} * FE_{\text{diesel}i}) \qquad (11)$$

onde:

$E_{\text{transporte biometano}}$ = Emissões do transporte do biometano até o posto de abastecimento, em t CO_{2e}·;

$Q_{diesel-caminhõestanque}$ = Quantidade de diesel utilizada no transporte do biometano até a o posto de abastecimento, em t de diesel;

$FE_{\text{diesel}i}$ = Fator de emissão do diesel para o gás *i*, em kg/l.

6.1.4 Combustão do biometano no motor dos ônibus

As emissões consideradas nessa última etapa estão relacionadas à utilização do biometano como biocombustível nos ônibus, obedecendo a Equação 12:

$$E_{biometano} = \sum (Q_{biometano} * FE_{biometano\,i}) \qquad (12)$$

onde:

$E_{biometano}$ = Emissões de GEE na combustão do biometano nos ônibus, em t de GEE;

$Q_{biometano}$ = Quantidade de biometano utilizada pelos ônibus, em t de biometano;

$FE_{biometano\,i}$ = Fator de emissão do biometano para o gás *i*, em t kg/l, considerando CO_2, CO, NOx, HC

Vale ressaltar que para essa etapa, não serão considerados as emissões de CO_{2eq}, já que a maioria das pesquisas encontradas na literatura calcula as emissões de combustão do biometano considerando as emissões de NOx, HC e CO, não encontrados valores para o N_2O e CH_4.

6.2 Avaliação do Ciclo de Vida para o biodiesel

Para o cálculo da emissão de CO_2 equivalente a partir do ciclo de vida do biodiesel originado do óleo residual, foram consideradas cinco etapas: 3 de transporte, 1 de produção do biocombustível e uma de combustão no motor do ônibus. Esse ciclo de vida completo é observado na Figura 15.

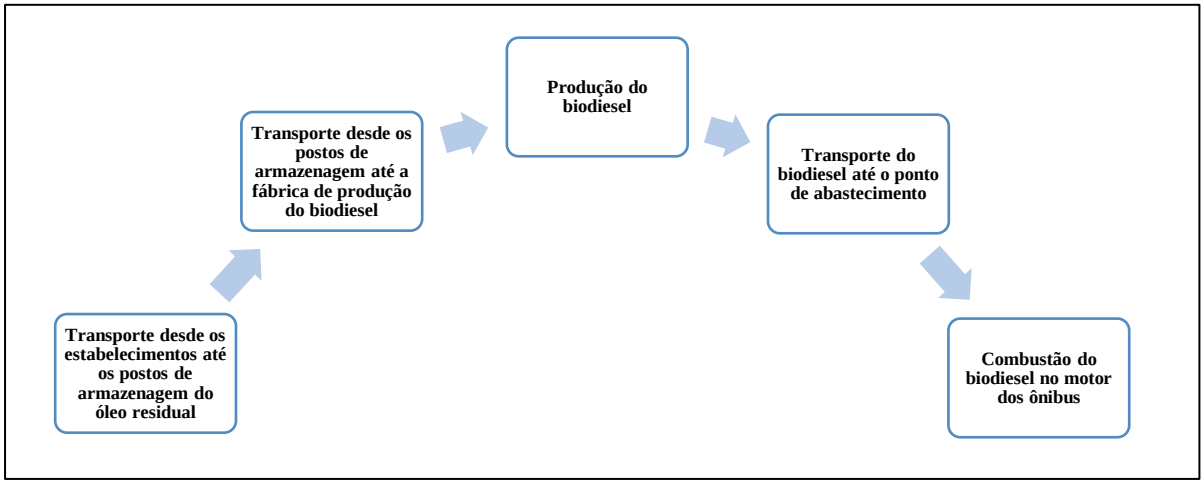


Figura 15 - Ciclo de vida do biodiesel a partir do óleo residual.

O cálculo do CO_{2eq} será calculado separadamente para cada uma das cinco etapas e todas as equações dessas etapas foram construídas a partir da Equação 4.

6.2.1 Transporte desde estabelecimentos que coletam o óleo residual até os postos de armazenagem

Foi considerado que as empresas responsáveis pela coleta do óleo residual em Volta Redonda são a Óleo Local e a Ecoóleo. Essas empresas utilizam veículos do tipo utilitário, que são os mais indicados para o transporte desse tipo de material, que é armazenado em bombinas. O carro escolhido para o cálculo foi o *Strada Hard Working CS 1.4* da *Ford*, já que foi o modelo mais vendido em 2018, segundo o site do Quatro Rodas (2018). Ainda, segundo o site da montadora, esse carro tem um consumo de 10,30 km/l. Assim, para calcular a quantidade de gasolina consumida, multiplicou-se a distancia total percorrida pelos veículos e o consumo dos mesmos.

Com relação a Óleo Local, as informações para a realização dos cálculos foram obtidas através de contato por email com a empresa, que relatou que os principais estabelecimentos da onde são recolhidos o óleo residual são indústrias, bares, restaurantes e lanchonetes; que são 3 veículos que realizam a coleta do óleo; e que são percorridos 2.700 kilometros durante um mês.

Devido à falta de informações concretas, a distância percorrida pelos utilitários da empresa Ecoóleo foram estimadas, considerando que a coleta de óleo residual ocorre uma vez por semana em cada estabelecimento. Para efeito de cálculo, foram utilizadas informações contidas no site da prefeitura de Volta Redonda, que especificavam quais escolas do município que coletaram o óleo residual no período considerado para o estudo, que é o ano de 2018 (VOLTA REDONDA, 2018). Ainda foi descoberto, através de entrevista do presidente e sócio fundador da Ecoóleo, publicada no site *YouTube* (YOUTUBE, 2019) que essa empresa também coleta óleo residual de supermercados e da CINBAL, que é uma empresa especializada em serviços de corte, envernizamento, litografia e transporte de folhas metálicas (CINBAL, 2019).

Para o cálculo das distâncias percorridas desde os estabelecimentos que coletam o óleo residual até os postos de armazenagem, foi considerado que o percurso de ida e volta tem a mesma distância.

Foi considerado o período de um ano para análise das emissões de CO_{2eq}. Sendo assim, as distâncias percorridas pelos utilitários das empresas foram multiplicadas pelo número de semanas presentes no período considerado (48 semanas). Essas distâncias foram

calculadas através da ferramenta *Google Maps* e podem ser melhor visualizadas no Quadro 22 e 18, que também apresenta o cálculo da quantidade de gasolina utilizada por cada empresa, considerando o consumo dos utilitários.

Quadro 22 – Distância percorrida e quantidade de gasolina utilizada pelos utilitários da Ecoóleo.

Estabelecimentos	**Distância percorrida pelos veículos da Ecoóleo até o posto de armazenagem**			**Quantidade de gasolina utilizada em um ano**
	Distância (em Km/semana) – Ida	**Distância (em Km/semana) – Ida e volta**	**Distância (em Km/ano)**	
Escola Paulo Basílio	16,10	32,20	1545,60	150,06
CEI (Centro de Educação Integrada)	11,90	23,80	1142,40	110,91
Escola Humberto Quinto Chiesse	8,20	16,40	787,20	76,43
Escola Marcelo Drable	11,90	23,80	1142,40	110,91
Ciep Professora Jandyra Reis de Oliveira	5,50	11,00	528,00	51,26
Escola Independência e Luz	5,30	10,60	508,80	49,40
Escola Jayme Oscar Pinho de Carvalho Junior	6,90	13,80	662,40	64,31
Escola Henrique Zamith	16,00	32,00	1536,00	149,13
Ciep 485	14,30	28,60	1372,80	133,28
Supermarket Floresta Loja 2	4,90	9,80	470,40	45,67
Supermarket Floresta Loja 3	1,30	2,60	124,80	12,12
Supermarket Floresta Loja 5	6,00	12,00	576,00	55,92
Supermarket Floresta Loja 10	8,50	17,00	816,00	79,22
Supermarket Floresta Loja 12	13,00	26,00	1248,00	121,17
Supermarket Floresta Loja 24	4,50	9,00	432,00	41,94
Supermarket Floresta Loja 31	7,60	15,20	729,60	70,83
Spani Atacadista	7,50	15,00	720,00	69,90
Cinbal	8,60	17,20	825,60	80,16
Total:				**15.168,00**

Fonte: Elaboração Própria

O maior consumo de gasolina ocorreu no transporte do óleo residual recolhido pelas escolas, devido principalmente às maiores distâncias percorridas nesses percursos pelos utilitários das empresas. Ainda, a orientação e conscientização de alunos e profissionais, além da possibilidade de remuneração das escolas municipais explicam também porque essas correspondem a 50 % dos estabelecimentos atendidos pela Ecoóleo.

Quadro 23 - Distância percorrida e quantidade de gasolina utilizada pelos utilitários da Óleo Local.

Estabelecimentos	**Distância percorrida pelos veículos da Óleo Local até o posto de armazenagem**		**Quantidade de gasolina utilizada em um ano**
	Distância (em Km/mês)	**Distância (em Km/ano)**	
Indústrias, bares, restaurantes e lanchonetes	2.700	32.400	3145,63

Fica claro, portanto que a Óleo Local percorre aproximadamente 68% da distância total percorrida pelas duas empresas. As emissões consideradas nessa etapa correspondem à queima de gasolina utilizada pelos veículos que coletaram o óleo residual nos estabelecimentos. A gasolina foi escolhida para essa análise uma vez que foi o combustível mais utilizado em 2018 (ANP, 2019a).

O cálculo dessas emissões está explicitado na Equação 13.

$$E_{gasolina\text{-}postos} = \sum (Q_{gasolina\text{-}postos} * FE_{gasolina\,i}) \quad (13)$$

onde:

$E_{gasolina\text{-}postos}$ = Emissões do transporte do óleo residual até os postos de coleta, em t CO_{2e};

$Q_{gasolina\text{-}postos}$ = Quantidade de gasolina utilizada no transporte do óleo residual até os postos de armazenagem, em t de gasolina;

$FE_{gasolina\,i}$ = Fator de emissão da gasolina para o gás *i*, em t gás *i*/ t gasolina

6.2.2 Transporte desde os postos de armazenagem até a fábrica de produção do biodiesel

O cálculo das emissões nessa etapa segue o mesmo parâmetro do subitem acima, conforme a Equação 14:

$$E_{gasolina\text{-}fábrica} = \sum (Q_{gasolina\text{-}fábrica} * FE_{gasolina\,i}) \quad (14)$$

onde:

$E_{gasolina\text{-}fábrica}$ = Emissões do transporte do óleo residual desde os postos de armazenagem até a fábrica de produção do biodiesel, em t CO_{2e};

$Q_{gasolina\text{-}fábrica}$ = Quantidade de gasolina utilizada no transporte do óleo residual até a fábrica de produção do biodiesel, em t de gasolina;

$FE_{gasolina\,i}$ = Fator de emissão da gasolina para o gás *i*, em t gás *i*/t gasolina.

No Quadro 24, observa-se o cálculo das distâncias percorridas pelos veículos desde os postos de armazenagem do óleo residual até a fábrica de produção do biodiesel, utilizando também a ferramenta *Google Maps*, ou seja, a distância das sedes da Óleo Local e Ecoóleo, que armazenam o óleo residual, até a CESBRA, que é a principal fábrica que produz biodiesel a partir do óleo residual em Volta Redonda (BIODIESELBR, 2018).

Quadro 24 - Distância dos postos de armazenagem até a CESBRA e a quantidade de gasolina utilizada pelos veículos utilitários.

Postos de armazenagem	**Distância percorrida por semana (ida e volta) até a CESBRA**	**Distância percorrida em um ano**	**Consumo do carro**	**Quantidade de gasolina utilizada por ano**
Ecoóleo	21,2	1017,6	10,30	98,80
Óleo Local	14,8	710,4	10,30	68,97

Para esse transporte, observa-se que a Ecoóleo gasta cerca de 58% do total de gasolina utilizada pelas duas empresas. Apesar da diferença entre as distâncias percorridas durante uma semana ser pequena, quando somada durante um ano, esse valor se torna apresenta uma diferença considerável de 307,2 km.

6.2.3 Produção do biodiesel

Nessa etapa foram consideradas as emissões da produção do biodiesel a partir da quantidade disponível de óleo residual. Assim, tem-se a Equação 15:

$$E_{prod\text{-}biodiesel} = Q_{diesel} \times FE_{diesel} + Q_{metanol} \times FE_{metanol} + Q_{catalisador} \times FE_{catalisador} + Q_{eletric} \times FE_{eletric} \quad (15)$$

onde $E_{prod\text{-}biodiesel}$ representa as emissões da produção do biodiesel; Q_{diesel}, a quantidade de diesel queimado para geração de eletricidade e/ou vapor na produção do biodiesel, em t diesel; FE_{diesel}, o fator de emissão da produção de diesel a partir do óleo residual, em t CO_{2eq}/t diesel; $Q_{metanol}$, a quantidade de metanol utilizada na produção do biodiesel, em t metanol; $FE_{metanol}$, o fator de emissão do metanol em t CO_{2eq} /t metanol; $Q_{catalisador}$, a quantidade de catalisador utilizado no processo de produção do biodiesel, em t de catalisador; $FE_{catalisador}$, o fator de emissão da produção de catalisador, em t CO_{2e}/t de catalisador; $Q_{eletric}$; a quantidade de eletricidade da rede brasileira utilizada em processos na usina de extração de óleo vegetal, em kWh; $FE_{eletric}$, o fator de emissão da produção de eletricidade da rede brasileira, em t CO_{2eq} / kWh.

Assim, para essa etapa as quantidades de cada item foi considerado que:

- 0,053 ton de diesel por tonelada de óleo utilizada (CAVALETT & ORTEGA, 2010);
- 0,11 ton de metanol por tonelada de biodiesel produzida (CASTRO et al, 2010);
- 0,0055 ton de catalisador por tonelada de biodiesel produzida (CASTRO et al, 2010);
- 0,000882 tWh de energia elétrica por tonelada de óleo utilizada (CAVALLET & ORTEGA, 2010).

A massa de biodiesel produzida a partir do óleo residual foi calculada adaptando a equação usada pelo estudo de PHAN & PHAN (2008):

$$m_{ester} = \text{conversão}(\%) * 3 * \frac{m_{wco}}{MW_{wco}} * MW_{ester} \quad (16)$$

onde:

m_{ester}= massa do biodiesel (g);

m_{wco}= massa do óleo residual (g);

MW_{wco}= massa molar do óleo residual (g/mol);

MW_{ester}= massa molar do ácido graxo presente no biodiesel (g/mol).

A massa molar do óleo residual pode ser calculado por (PHAN & PHAN,2008):

$$MW_{wco} = 3 * \sum_i (MW_k * \%m_k) + 38 \quad (17A)$$

onde:

MW_k= massa molar do molecular do ácido graxo k (g/mol);

% m_k= percentual de ácido graxo no material k.

A massa molar do ácido graxo presente no biodiesel pode ser calculada através da Equação 9B (PHAN & PHAN, 2008):

$$MW_{ester} = \sum_i (MW_k * \% m_k) + 14 \quad (17B)$$

Adota-se para o cálculo da produção de biodiesel, a partir das Equações 17A e 17B, uma taxa de conversão igual a 90%, $MW_{wco} = 868{,}0852$ g/mol e a $MW_{ester} = 285{,}5897$ g/mol (PHAN e PHAN, 2008). Os parâmetros para o cálculo da produção de biodiesel produzido a partir do óleo residual e a massa e volume de biodiesel encontrada estão no Quadro 25.

Quadro 25 - Parâmetros para o cálculo de produção de biodiesel

Parâmetros	Quantidade	Unidade
Óleo residual coletado em 2018	720.000	l
Massa de biodiesel produzida	580,714	t
Massa específica do biodiesel	879,1*	kg/m³
Volume de biodiesel	660.577,86	l

Fonte: *PHAN e PHAN (2008)

6.2.4 Transporte do biodiesel até o posto de abastecimento

Assim como explicado no transporte do biometano, foi considerado que o biodiesel produzido na CESBRA será transportado até um ponto de abastecimento pré determinado. Essa distância foi calculada utilizando o *Google Maps* e foi considerado que o biodiesel gerado será transportado para os pontos de distribuição de combustíveis através de caminhão tanque de capacidade de 50.000 l (GESTRAN, 2018) e consumo médio de 4 km/l (MENDONÇA, 2007).

O cálculo dessas emissões nessa etapa é realizado através da Equação 18:

$$E_{\text{gasolina-garagem ônibus}} = \sum (Q_{\text{gasolina-garagem ônibus}} * FE_{\text{gasolina}i}) \qquad (18)$$

onde:

$E_{\text{gasolina-fábrica}}$ = Emissões do transporte do biodiesel desde os postos de armazenagem até a garagem dos ônibus, em t CO_{2eq} ;
$Q_{\text{gasolina-fábrica}}$ = Quantidade de gasolina utilizada no transporte do óleo residual até a fábrica de produção do biodiesel, em t de gasolina;
$FE_{\text{gasolina}i}$ = Fator de emissão da gasolina para o gás *i*, em t gás *i*/t gasolina.

6.2.5 Combustão do biodiesel no motor dos ônibus

As emissões consideradas nessa última etapa estão relacionadas a utilização do biodiesel como biocombustível nos ônibus, obedecendo a Equação 19:

$$E_{\text{biodiesel}} = \sum (Q_{\text{biodiesel}} * FE_{\text{biodiesel}i}) \qquad (19)$$

onde:
$E_{\text{biodiesel}}$ = Emissões da combustão do biodiesel no motor dos ônibus, em t de GEE;
$Q_{\text{biodiesel}}$ = Quantidade de biodiesel utilizada pelos ônibus, em t de biodiesel;
$FE_{\text{biodiesel}i}$ = Fator de emissão do biodiesel para o gás *i*, em t gás *i*/t bioodiesel

Assim como na etapa de combustão do biometano nos ônibus, vale ressaltar que para essa etapa, não serão considerados as emissões de CO_{2eq}, já que a maioria das pesquisas

ecnontradas na literatura, calculam as emissões de combustão do biometano considerando as emissões de NOx, HC e CO, não encontrados valores para o N_2O e CH_4.

6.3 ACV para o diesel

Para comparação com as emissões do diesel, que é o derivado do petróleo utilizado pelos ônibus, é necessário o conhecimento do ciclo de vida desse combustível. O diesel é uma fração do petróleo obtida a partir da destilação fracionária e serve principalmente como combustível para motores à combustão. A destilação do petróleo é realizada em uma refinaria, onde o petróleo cru sofre os processos químicos de limpeza e processamento necessários para a separação de suas frações. O óleo diesel é obtido nesse processo entre as temperaturas de 163 a 357°C. No Brasil, o óleo diesel é o combustível mais utilizado, predominantemente no setor rodoviário, principalmente no transporte urbano. Uma das principais desvantagens desse tipo de transporte é a poluição causada pelos motores (FERREIRA E CARVAS, 2014).

O ciclo de vida do óleo diesel pode ser dividido em 3 etapas, que serão discutidas abaixo.

6.3.1 Extração do petróleo

Compreende a etapa de obtenção do petróleo em suas reservas naturais, sejam elas nacionais ou internacionais. O petróleo brasileiro é caracterizado como de médio a pesado (inclusive as novas reservas do pré-sal) e dessa forma não é possível obter algumas frações leves na quantidade demandada pelo mercado nacional. Isso é solucionado pela importação de petróleo estrangeiro, mais leve que o brasileiro e, portanto com maiores frações de compostos leves, entre eles gasolina e diesel (FERREIRA E CARVAS, 2014).

6.3.2 Transporte de petróleo estrangeiro

É a etapa na qual todo o petróleo importado para fim de obtenção de diesel muda de espaço geográfico por meio do transporte em via marítima. A distância média utilizada na análise foi de 13.300 km, uma combinação ponderada das distâncias médias entre Brasil e África e Brasil e Oriente Médio, principais fornecedores do petróleo leve Brasileiro (FERREIRA E CARVAS, 2014).

6.3.3 Refino do petróleo e geração de energia para destilação fracionada

Nessa etapa, ocorrem as separações das frações por meio de destilação fracionada. Essa etapa ainda tem um grande consumo de energia. No Brasil, grande parte da energia elétrica é obtida a partir de hidrelétricas e, portanto tem um perfil único no mundo (FERREIRA E CARVAS, 2014).

Assim, as emissões de CO_{2eq} de cada etapa do ciclo de vida do diesel se encontram no Quadro 26.

Quadro 26 - Emissões para o ciclo de vida do diesel

Etapas do ciclo de vida do diesel	Emissões (t CO_{2eq}/t diesel)
Extração do petróleo	0,50
Transporte do petróleo importado	0,23
Refino do petróleo	0,32
Geração de energia elétrica para produção do diesel	0,55
Emissões Totais para o ciclo de vida do Diesel	1,60

Fonte: FERREIRA E CARVAS (2014)

7. Resultados e Discussão

Neste capítulo serão discutidos, primeiramente os resultados obtidos do cálculo das emissões de CO_{2eq} associadas aos ciclos de vida do biodiesel e do biometano. Vale ressaltar que essas emissões correspondem à soma de emissões de CO_2, N_2O e CH_4. Depois, será feita uma comparação entre as emissões totais dos ACV dos biocombustíveis.

Depois, será discutido o consumo desses biocombustíveis, bem como o do diesel nos ônibus.

7.1 Emissões de CO_{2eq} no ciclo de vida do biometano

Para cálculo das emissões na etapa de produção do biometano, foram consideradas as emissões envolvidas nas etapas de transporte e produção do biometano.

7.1.1 Transporte do RSU até o CTR

Segundo informações da Secretaria de infra-estrutura da prefeitura de Volta Redonda, a coleta de RSU é dividida por 12 setores e realizada por 15 caminhões compactadores que percorrem 710,9 km/semana, conforme visto no Capítulo 6. Sendo assim, para efeito de cálculo foi considerado que o caminhão compactador tem consumo de 2 km/l. A partir desses dados, foi possível calcular a quantidade de diesel consumida e, consequentemente, de acordo com a Equação 10, a emissão de cada GEE e, finalmente a emissão de CO_{2e}. Esses dados podem ser melhor visualizados no Quadro 27.

Quadro 27 - Emissão de CO_2 no transporte do RSU

GEE	Distancia percorrida pelos caminhões considerando ida e volta (em km) em um ano	Consumo dos caminhões (km/l)	Quantidade de diesel utilizada por ano (l)	Fator de emissão para o diesel (kg/l)	GEE (t)	Fator GWP	t CO_{2eq}
CO_2	34.123,20	2	1.7061,6	2,603	44,41	1	44,41
N_2O	34.123,20	2	1.7061,6	0,000108	0,0018	310	0,571
CH_4	34.123,20	2	1.7061,6	0,000216	0,0037	21	0,0136
CO_{2eq}							**44,99**

Dessa forma, a quantidade de CO_{2eq} gerada pela queima do diesel nos caminhões compactadores é de aproximadamente 45 t CO_{2e}/ano. A emissão de CO_2 corresponde a 98% das emissões totais, devido principalmente ao fator de emissão do dióxido de carbono possuir

um valor mais elevado que o óxido nitroso e o metano, que respondem a 1,27% e 0,3% respectivamente, do total de emissão do CO_{2eq}. O Quadro 28 traz a quantidade de CO_{2eq} relacionada à massa de biometano produzida no CTR de Barra Mansa.

Quadro 28 - Quantidade de CO_{2eq} em função de biometano gerado

CO_{2eq} em função da massa de biometano produzido em 2018	CO_2 equivalente (t)	Massa de biometano (t/ano)	**t CO_{2eq}/ t biometano**
	44,99	6.455,43	**0,007**

Dado que a quantidade de biometano gerada a partir do RSU é de 6.455 t, 44,99 t/ano, então, temos a relação de 0,007 t CO_{2e}/ t biometano produzido.

7.1.2 Produção do biometano a partir da matéria orgânica presente no RSU

A quantidade de biometano foi calculada com base no estudo de Borba et al (2019), conforme visto no Capítulo 6. Assim, nessa segunda etapa, a produção do biometano a partir das 70.338,90 toneladas de RSU emitiu 13.839,03 t CO_{2eq}.

Para calcular na unidade funcional, que é tCO_{2eq} / t combustível produzido, divide-se os valor encontrado de CO_{2eq} pela a quantidade de biometano produzida no CTR, que é de 6.455,43t. Assim, o valor para a emissão de CO_{2eq} na produção de uma tonelada de biometano é de 2,14 t.

7.1.3 Transporte do biometano até o ponto de abastecimento

Para essa etapa, foi considerado que os ônibus serão abastecidos com o biometano em um único posto de abastecimento. Considerando que o consumo de um caminhão-tanque é de 4,01 km/l e que esse tipo de caminhão pode transportar até 4 mil m³ de gás, então para o transporte dos 9.003.379.200 l de biometano serão necessários 2.250,85 caminhões-tanque.

Assim, foi possível calcular as emissões de GEE nessa etapa. O cálculo da distância do CTR foi calculada conforme explicado no Capítulo 6 e, assim, obtido a quantidade de diesel necessária para transportar o biometano produzido no CTR até o ponto no qual os ônibus serão alimentados, como pode ser observado no Quadro 29.

Quadro 29 – Quantidade de diesel utilizada para transporte do biometano

Distância do CTR até o ponto de abastecimento (km)	**Caminhão tanque necessário**	**Distância percorrida pelos caminhões-tanque (km)**	**Consumo do caminhão tanque (km/l)**	**Quantidade de diesel utilizada por ano (em l)**
14,00	2.250	31.514	4,01	7.858,5

A partir da quantidade de diesel foi possível calcular a emissão de CO_{2eq}, que está descrita no Quadro 30.

Quadro 30 - Emissão de CO_{2eq} no transporte do biometano

GEE	**Quantidade de diesel utilizada por ano (l)**	**Fator de emissão para o diesel (kg/l)**	**GEE (t)**	**Fator GWP**	**t CO_{2eq}**
CO_2	7.858,31	2,603	20,51	1	20,51
N_2O	7.858,31	0,000108	0,0009	310	0,2638
CH_4	7.858,31	0,000216	0,0017	21	0,0357
Total					**20,81**

Portanto, essa etapa acaba por gerar 20,81 t de CO_{2eq} . A partir da quantidade de biometano gerada , tem-se que 0,0032 t de CO_{2eq} são emitidas durante um ano para transportar o biometano até o posto de abastecimento, conforme pode ser melhor observado no Quadro 31.

Quadro 31 - Quantidade de CO_{2eq} em função de biometano gerado

CO_2 equivalente em função da massa de biometano produzido	CO_2 equivalente	Massa de biometano em t/ano	**t CO_{2eq}/ t biometano**
	20,807	6.455,43	**0,0032**

7.1.4 Comparação das emissões totais no ACV completa do biometano

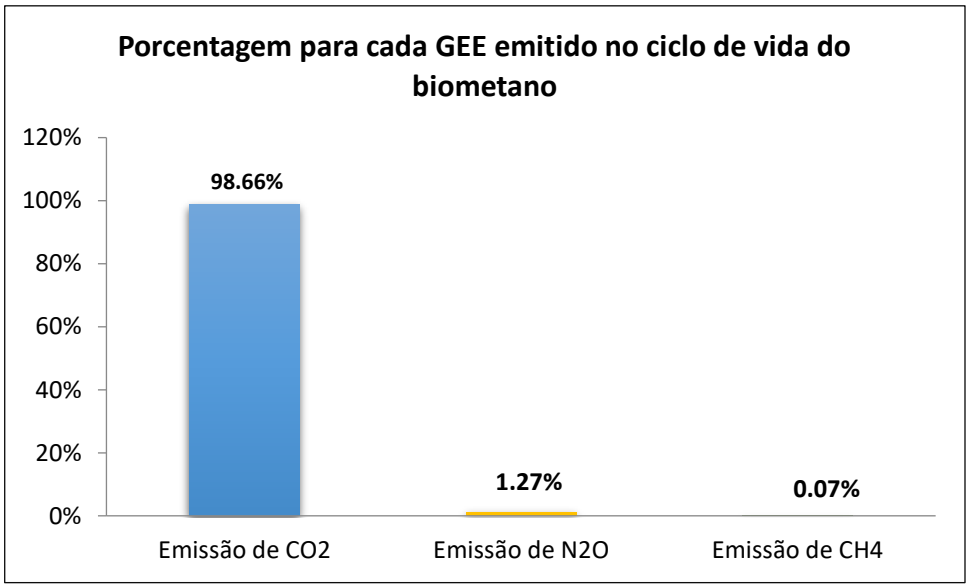
A soma das emissões de CO_{2eq} para todo o ciclo de vida do biometano encontra-se no Quadro 32.

Quadro 32 - Emissões totais na ACV do biometano

Emissões totais (em t)	**Transporte do RSU ate o CTR**	**Produção do biometano**	**Transporte até as garagens dos ônibus**	**Total**
	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3	
Emissão de CO_2	44,411	-	20,508	64,919
Emissão de N_2O	0,571	-	0,264	0,835
Emissão de CH_4	0,014	-	0,036	0,049
Emissão de CO_2 equivalente	44,996	13.839,02583	20,81	13.904,829
Massa de biometano (t)	6.455,43	6.455,43	6.455,43	6.455,43
t CO_{2eq} / t biometano	0,0070	2,1438	0,0032	**2,154**

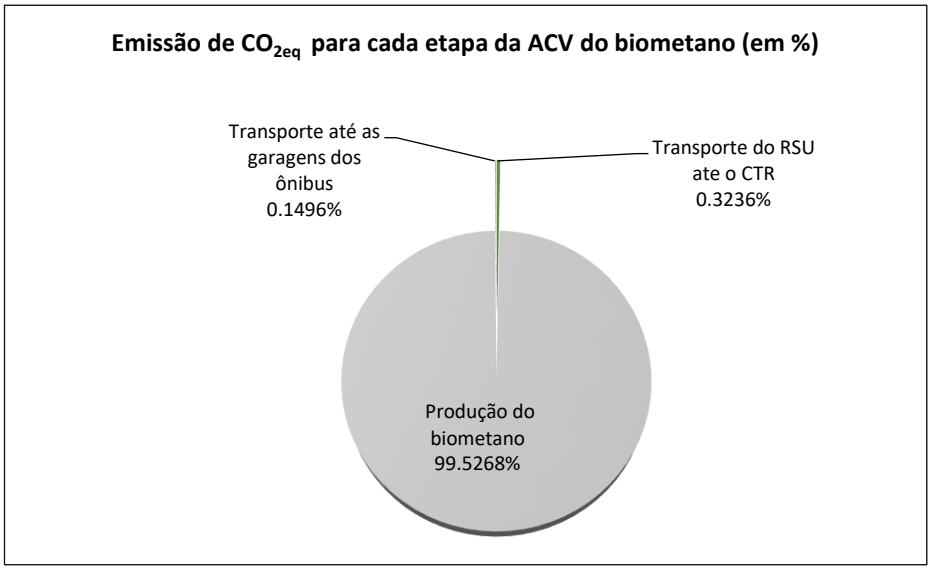
Analisando a emissão total de cada gás nas etapas 1 e 3 (já que na etapa 2 só foi possível obter o resultado total conforme explicado no item 6.1.2), percebe-se que a emissão de CO_2 contribui com 98,66% das emissões totais, reforçando a ideia de que é necessário a utilização de fontes alternativas que emitam menos GEE, principalmente o CO_2, já que esse gás é 20% responsável pelo Efeito Estufa, contribuindo diretamente para o Aquecimento Global e causando inúmeros efeitos ambientais, econômicos e sociais. A contribuição de cada gás para o somatório de CO_{2eq} pode ser melhor visualizado no Gráfico 3.

Gráfico 3 - Contribuição em porcentagem para cada GEE do somatório de CO_{2eq}



Analisando cada uma das três etapas, percebeu-se que a produção do biometano é a principal responsável pelas emissões de CO_{2eq} e esse alto valor pode ser justificado pela grande quantidade de RSU que o CTR recebe durante um ano. Essas emissões merecem destaque, demonstrando que é necessária uma melhor escolha para as técnicas e equipamentos, principalmente no tocante à escolha do biodigestor, que transformam a biomassa em biometano. O Gráfico 4 demonstra essas emissões nas três etapas do ciclo de vida do biometano.

Gráfico 4 - Percentual das emissões de CO_{2eq} para o ciclo de vida do biometano



Assim, a análise do ciclo de vida da produção do biometano a partir do RSU permitiu avaliar que 2,154 toneladas de CO_{2eq} são emitidas para produzir 1 tonelada de biometano.

A seguir, será analisado o ciclo de vida da produção do biodiesel.

7.2 Balanço de emissão de CO_{2eq} no ciclo de vida do biodiesel

As emissões de dióxido de carbono equivalente quantificadas são consideradas um fator importante para o balanço das emissões dos GEE no ciclo de vida do biodiesel, biocombustível que pode ser utilizado em diversas aplicações, seja em motores de combustão interna para geração de energia descentralizada ou para alimentar frotas de ônibus urbanos. Por tanto, obter valores de emissões de dióxido de carbono equivalente baixos é fundamental

para reduzir o impacto ambiental destes gases no meio ambiente. Estas emissões foram determinadas considerando a cadeia produtiva do biodiesel a partir do óleo vegetal residual.

7.2.1 Transporte desde os estabelecimentos até os postos de armazenagem do óleo residual

Nessa etapa, foram consideradas as emissões provenientes da queima da gasolina que abasteceu os utilitários das empresas Ecoóleo e Óleo Local, que coletaram as bombinas de óleo residual dos estabelecimentos. Os resultados encontrados de CO_{2eq} para cada empresa encontram-se nas Quadros 33, 34 e 35 nas quais são apresentados os resultados para as emissões de CO_2 , N_2O e CH_4 para essa primeira etapa do ciclo de vida do biodiesel.

Quadro 33 - Emissão de CO_2 para primeira etapa do ACV do biodiesel

Empresa	**Distância percorrida por ano (Km)**	**Consumo do carro (km/l)**	**Quantidade de gasolina utilizada por ano (l)**	**Fator de emissão da gasolina (kg/l)**	**CO_2 (t)**	**Fator GWP**	CO_{2eq} (t)
Ecoóleo	15.168	10,3	1.472,62	2,202	3,24	1	3,24
Óleo Local	32.400	10,3	3.145,63	2,202	6,93	1	6,93
Total	47.568				10,17		**10,17**

Nota-se que a empresa Óleo Local percorreu uma maior distância (32.400 km/ano) em comparação com a Ecolóleo, o que consequentemente, acarretou maior emissão do CO_2 na etapa de coleta do óleo residual por essa empresa. As emissões de CO_2 da Óleo Local são aproximadamente o dobro das emissões da Ecóoleo .

Essa maior distância percorrida pela Óleo Local indica que a empresa atinge mais estabelecimentos e pode ser justificado principalmente às ações promovidas pela empresa, que visam a sustentabilidade e a gestão de resíduos, como por exemplo:

- Eventos: participação em eventos gastronômicos, educativos e empresariais na região Sul Fluminense, com serviço de coleta seletiva, apoio a causas ambientais, através de palestras e exposições (ÓLEO LOCAL, 2019);

- Hortas comunitárias: realiza a implantação de hortas comunitárias em escolas, condomínios e espaços coletivos, estimulando o contato direto com a terra e a produção do próprio alimento (ÓLEO LOCAL, 2019);

- Treinamento e palestra: atende condomínios, empresas, escolas, universidades promovendo treinamentos e palestras voltados para a coleta seletiva, abordando temas como saneamento ambiental, gestão de resíduos e educação ambiental (ÓLEO LOCAL, 2019).

As emissões para o óxido nitroso são apresentadas no Quadro 34, a seguir.

Quadro 34 - Emissão de N_2O para primeira etapa do ACV do biodiesel

Empresa	**Distância percorrida por ano (Km)**	**Consumo do carro (km/l)**	**Quantidade de gasolina utilizada por ano (l)**	**Fator de emissão do N_2O para gasolina (kg/l)**	**N_2O (t)**	**Fator GWP**	**CO_{2eq} (t)**
Ecoóleo	15.168	10,3	1472,64	0,00024	0,00035	310	0,11
Óleo Local	32.400	10,3	3145,63	0,00024	0,00075	310	0,23
Total	47.568				0,0011		**0,34**

Há uma menor emissão de N_2O quando comparado ao CO_2, o que se deve principalmente pelo menor valor do fator de emissão para esse GEE. Ainda, a mesma situação das emissões do CO_2 se repete para os gases óxido nitroso e metano, com uma maior emissão desses gases pela Óleo Local, conforme Quadro 35.

Quadro 35 - Emissão de CH_4 para primeira etapa do ACV do biodiesel

Empresa	**Distância percorrida por ano (Km)**	**Consumo do carro (km/l)**	**Quantidade de gasolina utilizada por ano (l)**	**Fator de emissão do CH_4 para gasolina (kg/l)**	**CH_4 (t)**	**Fator GWP**	**CO_{2eq} (t)**
Ecoóleo	15.168	10,3	1.472,64	0,000033	0,000049	21	0,0010205
Óleo Local	32.400	10,3	3.145,63	0,000033	0,00010	21	0,00218
Total	47.568				0,00015		**0,0032**

O metano possui uma menor emissão quando comparado com os outros gases. Isso se deve principalmente ao seu baixo fator de emissão para gasolina e ao seu GWP ser menor do que o do N_2O. Analisado por empresa, a Óleo Local é a que mais emitiu CO_2 equivalente, contribuindo com aproximadamente 68% das emissões totais de CO_{2eq} para essa primeira etapa da produção de biodiesel, devido principalmente à maior distância percorrida por essa empresa. O resumo para as emissões dessa primeira etapa de transporte, por empresa, pode ser melhor visualizado no Quadro 36.

Quadro 36 - Emissões de CO_{2eq} por empresa para a etapa de transporte

Empresa	**Emissão por GEE (t)**			**Emissão de CO_{2eq}**	**Percentual de emissão**
	CO_2	N_2O	CH_4		
Ecoóleo	3,24	0,11	0,0010	3,35	32%
Óleo Local	6,93	0,23	0,0022	7,16	68%
Total	10,17	0,34	0,0032	10,51	100%

Analisando as emissões de cada GEE, percebeu-se que do total de 10,51 t CO_{2eq}, o CO_2 contribui com cerca de 97% das emissões totais, o que é explicado pelo maior valor do fator de emissão para esse GEE.

Considerando as emissões de CO_{2eq} das duas empresas e que a massa de biodiesel disponível para o ano de 2018 é de 580,714 t tem-se que nessa etapa há uma emissão de 0,018 t CO2eq/ t biodiesel produzido, conforme pode ser observado no Quadro 37.

Quadro 37 - Emissões de CO_{2eq} no transporte do óleo residual até os postos de armazenagem

CO_{eq} em função da massa de biodiesel produzida	CO_2 equivalente	Massa de biodiesel em t/ano	**t CO_{2eq}/ t biodiesel**
	10,51	580,714	**0,018**

A seguir, será discutida a emissão de CO_{2eq} para a segunda etapa de transporte desse ciclo de vida.

7.2.2 Transporte desde os postos de armazenagem até a fábrica de produção do biodiesel

Nessa etapa, as emissões estão envolvidas com a queima da gasolina utilizada pelos utilitários no transporte do óleo residual até a CEBRA. Nas Quadros 38, 39 e 40 observam-se as emissões do CO_2, N_2O e CH_4.

Quadro 38 - Emissão de CO_2 para segunda etapa do ACV do biodiesel

Empresa	Distância percorrida por ano (Km)	Consumo do carro (km/l)	Quantidade de gasolina utilizada por ano (l)	Fator de emissão da gasolina (kg/l)	CO_2 (t)	Fator GWP	CO_{2eq} (t)
Ecoóleo	1.017,6	10,3	98,79	2,202	0,2175	1	0,2175
Óleo Local	710,4	10,3	68,97	2,202	0,1518	1	0,1518
Total	1.728				0,3694		**0,3694**

Diferentemente da etapa anterior, a empresa Ecoóleo percorreu maior distância (21,2 km/semana) quando comparado com a empresa Óleo Local, que percorre 14,8 km/semana. Isso se deve ao fato da primeira empresa se localizar mais distante da CESBRA do que a segunda. Essa diferença de distância anual percorrida está presente também nos valores emitidos de CO_2 e dos outros gases.

Quadro 39 - Emissão de N_2O para segunda etapa do ACV do biodiesel

Empresa	Distância percorrida por ano (Km)	Consumo do carro (km/l)	Quantidade de gasolina utilizada por ano (l)	Fator de emissão da gasolina (kg/l)	N_2O (t)	Fator GWP	CO_{2eq} (t)
Ecoóleo	1.017,6	10,3	98,79	0,0002398	0,00002369	310	0,0073
Óleo Local	710,4	10,3	68,97	0,0002398	0,0000165	310	0,00513
Total	1.728				0,0000402		0,0124

Contudo, as emissões de CO_2 permanecem sendo as maiores quando comparada aos outros GEE. Isso é explicado pelo fator de emissão do CO_2 ter um maior valor.

Quadro 40 - Emissões de CH_4 no transporte do óleo residual para a CESBRA

Empresa	Distância percorrida por ano (Km)	Consumo do carro (km/l)	Quantidade de gasolina utilizada por ano (l)	Fator de emissão da gasolina (kg/l)	CH_4 (t)	Fator GWP	CO_{2eq} (t)
Ecoóleo	1.017,6	10,3	98,79	0,000033	0,00000326	21	0,000068
Óleo Local	710,4	10,3	68,97	0,000033	0,0000023	21	0,0000478
Total	1.728				0,0000055		0,000116

A análise das emissões por empresa, conforme pode ser observado no Quadro 41, permitiu observar que para essa segunda etapa de transporte, a Ecoóleo foi responsável por 59% das emissões de CO_{2eq}. Já analisando por emissão de GEE, observou-se que o CO_2 continua sendo o gás que mais contribui para aumentar o valor total do CO_{2eq}, com o N_2O e CH_4 contribuindo com apenas 3,25% e 0,03%, respectivamente.

Quadro 41 - Análise das emissões totais por empresa para a segunda etapa de transporte

Empresa	**Emissão por GEE (t)**			**Emissão de CO_{2eq}**	**Percentual de emissão**
	CO_2	**N_2O**	**CH_4**		
Ecoóleo	0,2175	0,0073	0,000068	0,2248	59%
Óleo Local	0,1518	0,00513	0,0000478	0,1569	41%
Total	0,3694	0,0124	0,000116	0,3819	100%

A soma das emissões dos GEE resulta em total de 0,3820 t CO_{2eq}, com o CO_2 contribuindo com aproximadamente 97% das emissões totais.

Considerando que a massa de biodiesel disponível para o ano de 2018 é de 580,714 t, tem-se que nessa etapa há uma emissão de 0,00066 t CO_{2eq}/ t biodiesel produzido, conforme pode ser observado no Quadro 42.

Quadro 42 - Emissões de CO_{2eq} no transporte do óleo residual até os postos de armazenagem

CO_{eq} em função da massa de biodiesel produzida	CO_2 equivalente	Massa de biodiesel em t/ano	**t CO_{2eq}/ t biodiesel**
	0,3820	580,714	**0,00066**

A seguir será discutido a emissão de CO_{2eq} na produção do biodiesel.

7.2.3 Produção do biodiesel

Essa etapa considera as emissões na produção do biodiesel a partir do óleo residual. Utilizando a Equação 8 e as informações contidas no Quadro 43, obteve-se a quantidade de

CO_2 equivalente gerada nesse processo. Os fatores de emissão para essa etapa foram os mesmos utilizados por Cavalett e Ortega (2010);

Quadro 43 - Total das emissões de CO_{2eq} na produção do biodiesel

Produtos utilizados na produção do biodiesel	**Quantidade (to)**	**Fator de emissão (em CO_{2e} /t produto)**	**Resultado (em t CO_{2e})**
Diesel queimado em boilers ou caldeiras para geração in situ de eletricidade e/ou vapor	0,053	0,32017	0,01697
Metanol	0,11	1,375	0,15125
Catalisador	0,0055	1,2	0,0066
Emissões pelo consumo de eletricidade	0,000882	0,000000068	5,9976 * E(11)
Total			0,175

Fonte: Cavalett e Ortega (2010)

Os fatores de emissão foram encontrados já na forma de t CO_2 equivalente. O metanol apresenta maior fator de emissão do que os outros produtos, garantindo assim uma maior emissão de CO_{2e} quando esse produto é utilizado na produção do biodiesel. Assim, o total de CO_{2eq} emitido nessa etapa foi de 0,175 toneladas. Considerando que a massa de biodiesel produzida a partir do óleo residual foi de aproximadamente 580,714 toneladas de biodiesel/ano, tem se o resultado de 0,000301 ton de CO_{2e}/ t biodiesel.

O próximo item tratará do transporte do biodiesel produzido até o ponto de abastecimento no qual os ônibus serão alimentados.

7.2.4 Transporte do biodiesel até o ponto de abastecimento

Seguindo o mesmo padrão do transporte do biometano, as emissões de CO_2 geradas nessa etapa obedecem a Equação 13. Para essa etapa, foi considerado que os caminhões-tanques transportarão o biodiesel até um único posto de abastecimento. Foi considerado que o biodiesel gerado será transportado para os pontos de distribuição através de caminhões tanque (GESTRAN, 2018) e consumo médio de 4,01 km/l (MENDONÇA, 2007).

Assim, foi possível calcular as emissões de GEE nessa etapa. A distância percorrida pelos caminhões foi calculada conforme explicado no item 6.2.4 e, assim, obtido a quantidade de diesel necessária para transportar o biodiesel produzido na CESBRA até o ponto no qual os ônibus serão alimentados, conforme pode ser observado no Quadro 44.

Quadro 44 - Quantidade de diesel utilizada no transporte do biodiesel

Distância até o ponto de abastecimento (km)	**Caminhão tanque necessário**	**Distância percorrida em um ano pelos caminhões-tanque (km)**	**Consumo do caminhão tanque (km/l)**	**Quantidade de diesel utilizada por ano (em l)**
14,00	14	196	4,01	48,88

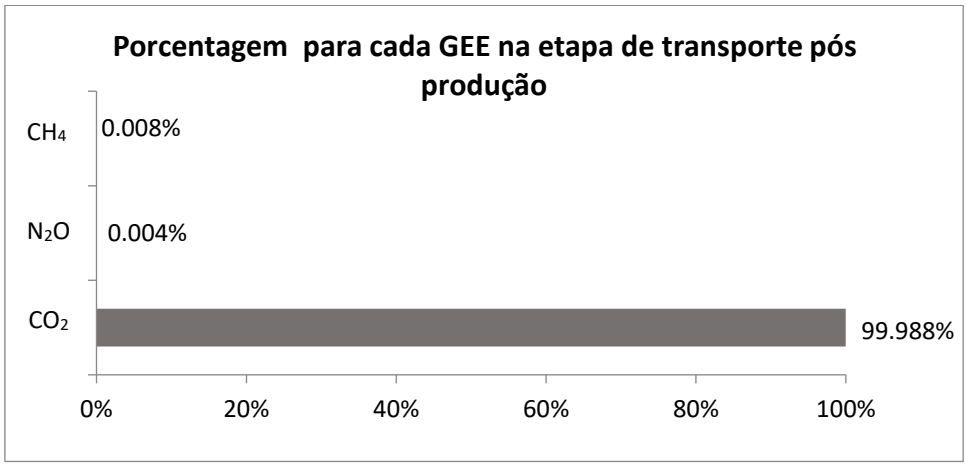
A partir da quantidade de diesel, foi possível calcular a emissão de CO_{2eq}, como observado no Quadro 45, que apresenta as emissões por cada gás.

Quadro 45 - Emissão de CO_{2eq} no transporte do biodiesel

GEE	**Quantidade de diesel utilizada por ano (em l)**	**Fator de emissão para o diesel (kg/l)**	**GEE (t)**	**Fator GWP**	**t CO_{2eq}**
CO_2	48,88	2,603	0,1272	1	0,1272
N_2O	48,88	0,000108	0,0000053	310	0,00164
CH_4	48,88	0,000216	0,0000105	21	0,000222
Total	-	-	0,127	-	0,129

Mais uma vez, as emissões de CO_2 contribuíram exorbitantemente na soma total de CO_{2eq}, seguida pelas emissões de N_2O e CH_4. Esses resultados reforçam a ideia de que o fator de emissão do GEE influencia no cálculo final do dióxido de carbono equivalente. As emissões em porcentagem para cada etapa encontram-se no Gráfico 5.

Gráfico 5 - Percentual de emissão para cada GEE analisado



Portanto, essa etapa acaba por gerar 0,129 t de CO_{2eq} . A partir da quantidade de biodiesel gerado (580,714 t), tem-se que 0,00023 t de CO_{2eq} são emitidas durante um ano para transportar o biodiesel até o posto de abastecimento.

7.2.5 Comparação das emissões totais no ACV completa do biodiesel

Avaliando todas as etapas do ciclo de vida do biodiesel produzido a partir do óleo residual, nota-se que as etapas que mais emitem CO_{2eq} são as de transporte, principalmente porque os combustíveis utilizados nessa etapa possuem elevados valores de fatores de emissão. O Quadro 46 traz o resumo de todo as emissões para o ciclo de vida do biodiesel.

Quadro 46 - Resumo para as emissões de GEE e CO_{2eq} para o ciclo de vida do biodiesel

Etapas	**Transporte até posto de armazenagem do óleo residual**	**Transporte do posto de armazenagem até a CESBRA**	**Produção do biodiesel**	**Transporte até o ponto de abastecimento**	**Total**
Emissão de CO_2	10,17	0,3694	-	0,1272	10,67
Emissão de N_2O	0,34	0,0124	-	0,00164	0,354
Emissão de CH_4	0,0032	0,000116	-	0,000222	0,004
Emissões totais de CO_2 equivalente	10,5132	0,382	0,175	0,129	11,2
Massa de biodiesel (t)	580,714	580,714	580,714	580,714	-
t CO_{eq} / t biodiesel	**0,018**	**0,00066**	**0,0003014**	**0,00023**	**0,019**

As duas primeiras etapas de transporte consideram as emissões conjuntas das duas empresas que coletam o óleo residual dos estabelecimentos. O Quadro 47 apresenta as emissões de dióxido de carbono equivalente por tonelada de biodiesel produzida, obtidas nas etapas associadas com o transporte do óleo residual desde a coleta até a planta de produção de biodiesel. Observa-se um comparativo dos valores alcançados nas etapas, sendo que a etapa que considera o transporte desde o estabelecimento até os postos de armazenagem do óleo residual impacta em 96,50% as emissões de dióxido de carbono equivalente obtidas na etapa de transporte, já a etapa vinculada com o transporte desde os postos de coleta até a planta de produção do biodiesel impacta em 3,50% as emissões de dióxido de carbono equivalente obtidas na etapa de transporte.

Quadro 47 - Balanço de emissões de CO_2eq nas duas primeiras etapas de transporte do óleo residual

Etapas de transporte do óleo residual	**Quantidade emitida (t CO_2e / t biodiesel)**	**Percentual (%)**
Transporte desde os estabelecimentos até os postos de armazenagem do óleo residual	0,018	96,50%
Transporte desde os postos de armazenagem até a fábrica de produção do biodiesel	0,0006	3,5%
Total	0,0186	100

Ainda, analisando somente o valor das emissões de t CO_{2eq} por etapa, observou-se que o transporte desde os estabelecimentos até os postos de armazenagem foi responsável por cerca de 94% das emissões, justificado pela maior kilometragem percorrida e, consequentemente, pela maior queima de gasolina. O percentual de emissão de CO_{2eq} para cada do ciclo de vida do biodiesel é apresentado no Gráfico abaixo.

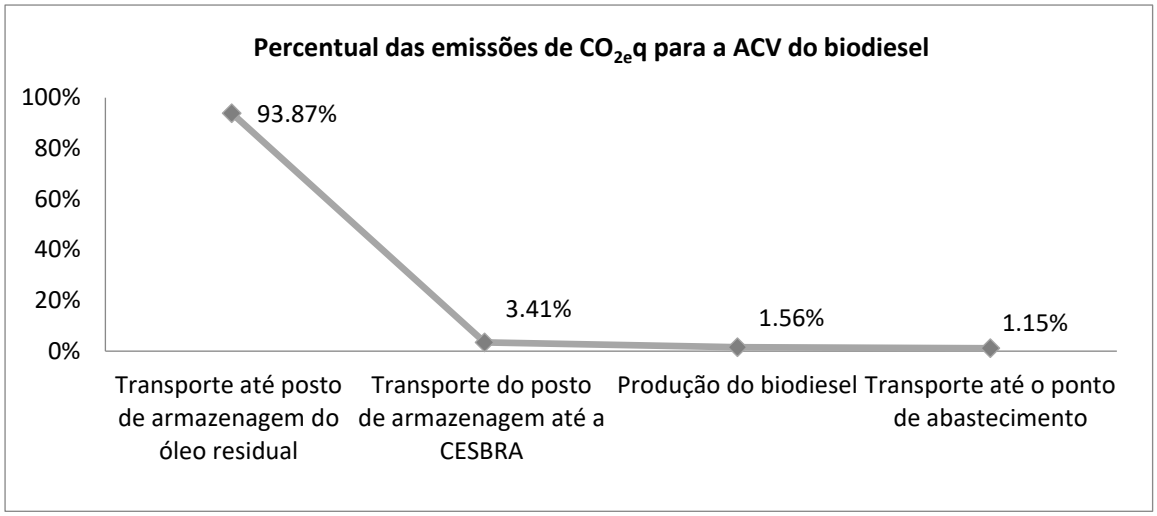


Gráfico 6 - Emissões de CO_{2eq} para o ciclo de vida de produção do biodiesel

Isso mostra que é necessário então criar um melhor processo de logística para coleta do óleo residual nos estabelecimentos, para que os carros utilitários percorram uma menor distância e, assim, ocorra uma menor emissão de CO_{2eq}, principalmente de CO_2.

Então, pode-se dizer que nas etapas analisadas do transporte do óleo residual, o maior impacto das emissões de dióxido de carbono equivalente, deve-se a maior distância percorrida em kilometros pelos utilitários, que são alimentados com gasolina, cujo fator de emissão é prejudicial ao meio ambiente, promovendo maior impacto ambiental.

Analisando as emissões de cada GEE, percebeu-se que, assim como na produção do biometano, há uma maior concentração de CO_2 quando comparado com o N_2O e CH_4, principalmente porque o fator de emissão desse gás para a gasolina é muito maior que o dos outros gases.

Assim, considerando as 4 etapas do ciclo de vida, a emissão total de CO_{2eq} para a produção de 1 tonelada de biodiesel é de 0,019 t CO_{2eq} / t biodiesel, conforme pode ser observado no Quadro 46.

Depois da análise individual, será realizado um comparativo entre o ciclo de vida do biometano e do biodiesel. Ainda, esses ciclos de vida serão comparados com o ciclo de vida de produção do diesel, para que se analise qual combustível, pelo ponto de vista das emissões de CO_{2eq}, tem maior impacto ambiental.

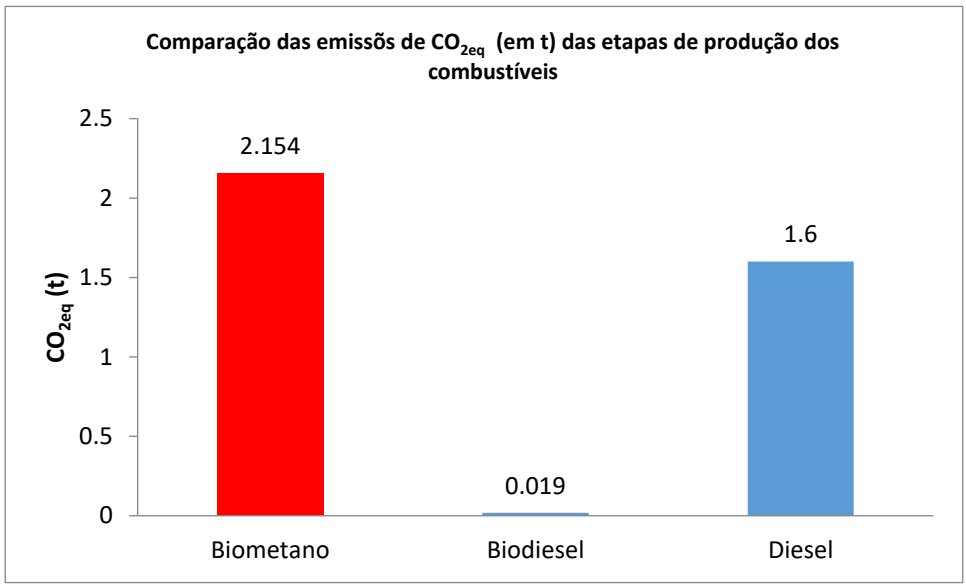
7.3 Comparação das emissões anuais da ACV do biometano, biodiesel e diesel

As emissões para as cadeias produtivas do biometano, biodiesel e diesel foram de 2,154 t $CO_{2eq/}$ t biometano, 0,019 t CO_{2eq}/t biodiesel e 1,6 t CO_{2eq}/ t diesel, respectivamente. Ao analisar esses valores, percebeu-se que a produção do biometano a partir do RSU foi a que mais emitiu GEE, principalmente na segunda etapa do ciclo de vida onde ocorre a conversão da biomassa do RSU com a formação do biometano. Esse valor está de acordo com a emissão de CO_{2eq} proposta por BORBA et al (2018), no qual um aterro sanitário controlado emite cerca de 0,2 t CO_{2eq} / RSU recebida.

A questão das emissões para os GEE, principalmente para o CH_4 e CO_2, nos aterros sanitários vem sendo estudada por pesquisadores de diversos países, principalmente porque as emissões nesses espaços contribuem exorbitantemente para a poluição do ar nos locais aonde o aterro é instalado (BORBA et al (2018); OTTO e LOPES (2017); Assim, criar mecanismos para gerenciar os aterros sanitários, com o objetivo de mitigar essas emissões, se faz necessário para gerar um melhor aproveitamento do metano e reduzir as emissões de $CO_{2eq.}$ Ainda, uma gestão eficaz do RSU gerado nas cidades, permite não só ganhos ambientais, mas também sociais e econômicos, com o trabalho dos catadores de reciclagem, que devem ser capacitados, com o incentivo à criação e desenvolvimento de cooperativas ou associações, mediadas pelo poder público (GOUVEIA, 2012). Assim, se faz necessário a criação de políticas públicas que articulem aspectos sociais, como saúde e segurança dos catadores, cidadania, inclusão; econômicos, com geração de renda e redução de custos; e ambientais (GOUVEIA, 2012).

Comparada com a produção do biodiesel, a geração de biometano apresenta uma exorbitante diferença nas emissões de CO_{2eq}, conforme observado no Gráfico 7. Essa situação é explicada pelo fato de ocorrer uma maior produção de biometano, além da quantidade de RSU que é superior a quantidade coletada de óleo residual.

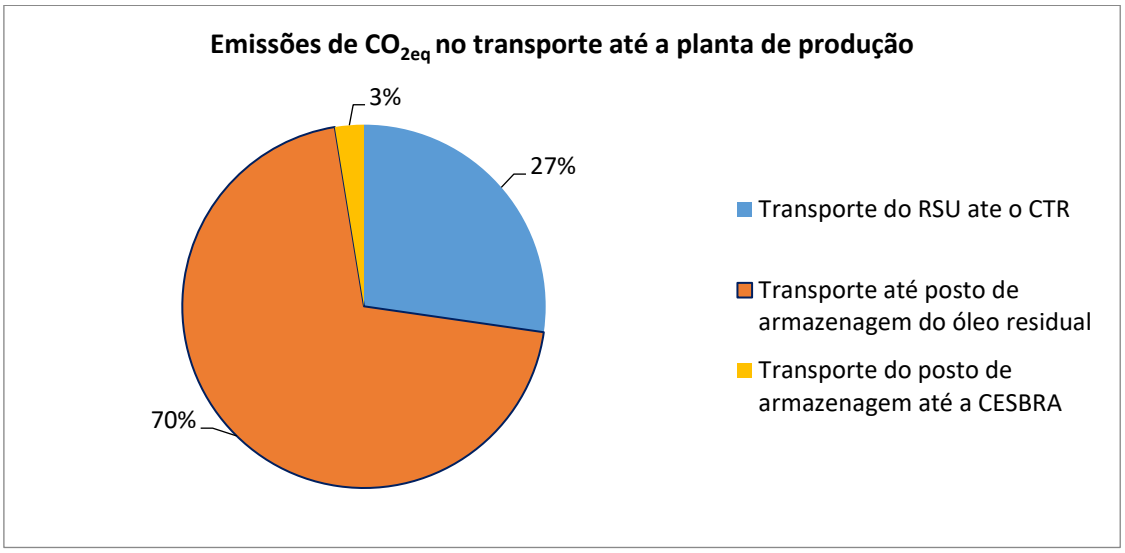
Gráfico 7 - Comparação das emissõs de CO_{2eq} (em t) das etapas de produção dos combustíveis



Comparado com o diesel, o biometano emite mais CO_{2eq}, demonstrando que apesar de apresentar um fator de emissão menor, ao se avaliar o ciclo de vida do biometano, percebe-se que esse biocombustível não é ambientalmente eficaz, evidenciando a importância da avaliação do ciclo de vida para combustíveis.

Com relação às etapas de transporte das matérias-primas até o local de produção, o transporte do óleo residual emitiu mais GEE do que o transporte do RSU (Gráfico 8), devido principalmente à uma falta de logística para a coleta do óleo residual nos estabelecimentos. Fica evidente portanto que há uma necessidade de se avaliar qual a melhor rota para a coleta, com o intuito de diminuir o gasto com a gasolina que abastece os carros, o que acarreterá em menor emissão de CO_{2eq}, obtendo assim ganhos econômicos e ambientais.

Gráfico 8 - Comparação das emissões na produção dos combustíveis



O Gráfico 9 apresenta a comparação final das emissões para todas as etapas dos 3 combustíveis analisados.

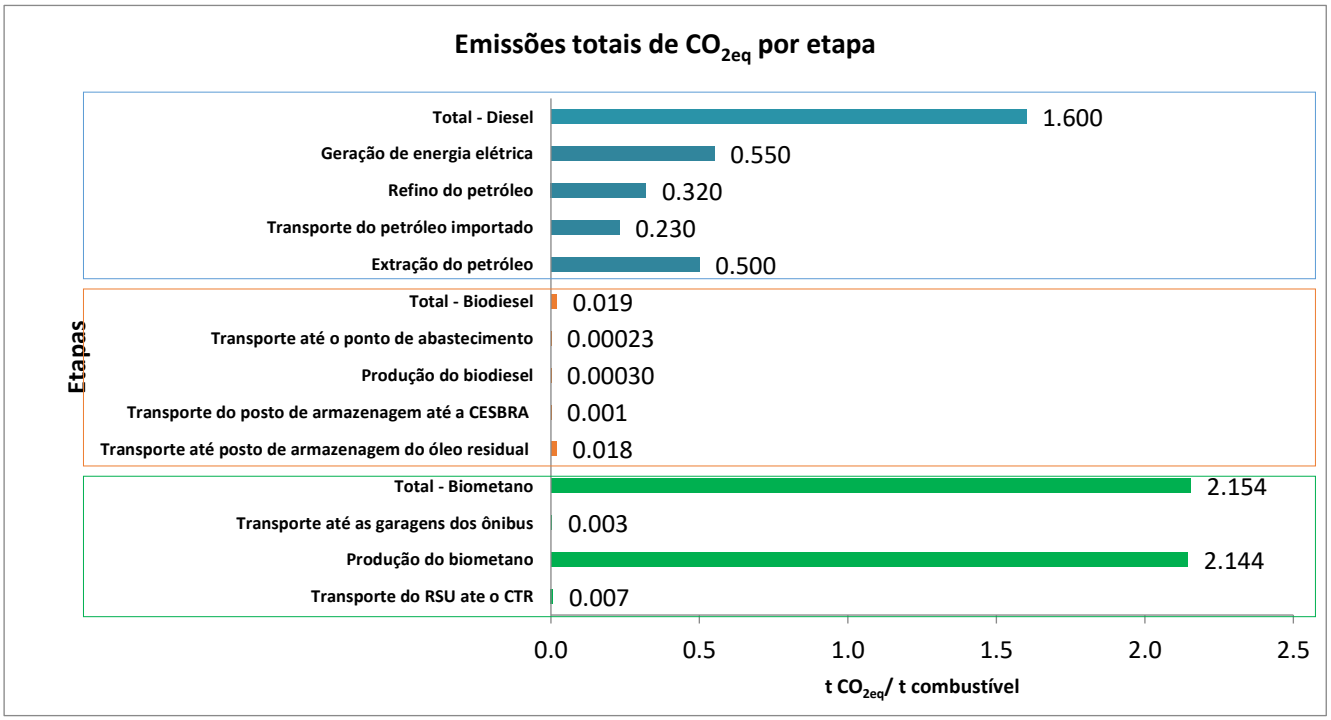


Gráfico 9 - Comparação das emissões nas etapas de transporte dos biocombustíveis

Em estudo semelhante a esse, GOMES et al (2015) também verificaram que o aspecto significativo mais relevante foram as emissões atmosféricas geradas nos processos de coleta e transporte de resíduos.

O biodiesel se destaca, então, como o combustível que emite uma menor quantidade de CO_{2eq} quando comparado com o biometano e diesel. Diversos estudos também avaliaram a ACV de biocombustíveis, conforme pode ser observado no Quadro 48.

Quadro 48 - Emissão de CO_{2eq} em diversos estudos

Matéria - prima	t CO_{2eq}/t biocombustível	Autores	Ano
Soja	0,001136	MENDONÇA, R. M. L.(2007)	2007
Soja	0,685	ALTAMIRANO (2013)	2013
Óleo residual	0,1458	ORLANDIN, F. (2013)	2013
Soja	1,113	DÉCIO, L. G (2014)	2014
Dendê	0,868	DÉCIO, L. G (2014)	2014
Sebo	0,512	DÉCIO, L. G (2014)	2014
Dendê	0,79	CASSOL et al (2016)	2016

O biodiesel, então, se apresenta como alternativa para substituir o diesel, já que a avaliação do seu ciclo de vida permitiu observar que a produção desse biocombustível emite uma pequena quantidade de CO_{2eq} para a atmosfera.

Finalizada essa primera parte da análise das emissões de CO_{2eq} da produção do biometano, biodiesel e diesel, será apresentado a seguir, as emissões de GEE na utilização desses combustíveis nos ônibus urbanos da cidade de Volta Redonda. Vale ressalar que, conforme explicado no Capítulo 4, as emissões para o CO_{2eq} não foram encontradas na literatura, principalmente para o biometano, uma vez que grande parte dos estudos calcula as emissões de gases consideradas prejudiciais à saúde humana. Assim, para combustão do biometano, biodiesel e diesel no motor de combustão dos ônibus, serão considerados os gases CO_2, CO, NOx, HC, MP.

8. Consumo e emissão dos biocombustíveis nos ônibus

Após avaliar o ciclo de vida de cada biocombustível, a análise dos seus consumos para os ônibus de Volta Redonda foi realizada. A partir desse consumo, foi possível calcular as emissões dos gases CO_2, CO, NOx, HC, MP do biometano e do biodiesel para então, compará-los com o combustível de origem fóssil, nesse caso, o diesel, utilizado pelas frotas do município em questão.

Para uma análise mais completa, a discussão da utilização dos combustíveis foi dividida em 6 cenários, que serão discutidos separadamente e se encontram no Quadro 49. Esses cenários contemplam as principais combinações que poderiam ocorrer no motor dual dos ônibus: o cenário 1 é o cenário real, no qual os ônibus utilizam o diesel como combustível; o cenário 2 contempla a utilização do biodiesel, enquanto o 3 faz uso do biometano; já os cenários 4, 5, 6 contemplam a mistura de dois combustíveis, diesel e biometano, diesel e biodiesel e biometano e biodiesel, respectivamente.

Ainda, o consumo do motor foi calculado para cada cenário a partir das Equações 1 e 2, obtendo como resultado a vazão do motor, em l/h.

Quadro 49 - Vazão do motor dual para os cenários analisados

Cenários	Combustíveis utilizados	Vazão (em l/h)	Tecnologia do Motor de Combustão Interna
1	Diesel	60,41	Convencional
2	Biodiesel	56,68	Convencional
3	Biometano	128.992,45	Convencional adaptado a biogás
4	Diesel	63,54	*Dual Fuel*
	Biometano	254,16	
5	Diesel	80,47	*Dual Fuel*
	Biodiesel	84,83	
6	Biometano	299,88	*Dual Fuel*
	Biodiesel	74,97	

Com esses valores, foi possível calcular a demanda do motor do ônibus para cada cenário, a partir da Equação 3. Os valores encontram-se no Quadro 50.

Quadro 50 - Demanda anual dos ônibus de Volta Redonda

Cenários	Combustíveis utilizados	Demanda diária (em l/dia)	Demanda anual (em l/ano)
1	Diesel	242.078,53	88.358.663,42
2	Biodiesel	227.118,54	82.898.268,33
3	Biometano	516.880.354,55	188.661.329.410,34
4	Diesel	254.608,52	18.586.421,79
	Biometano	1.018.434,07	371.728.435,76
5	Diesel	322.448,02	117.693.528,59
	Biodiesel	339.918,80	124.070.362,00
6	Biometano	1.201.636,80	438.597.432,00
	Biodiesel	109.649.358,00	21.929.871,60

Conforme apresentado no Capítulo 6, o potencial de produção em 2018 para o biometano foi de 9.003.379.200 l e o de biodiesel foi de 660.577,86 l. Assim, analisando os cenários, observa-se que o 2, 3 e 6 são inviáveis. Os cenários 2 e 3 consideram o motor sendo alimentado somente com biodiesel e biometano, respectivamente. Ambos são inviáveis, uma vez que no primeiro, o volume gerado em um ano não abasteceria nem 20% da frota, enquanto que para o segundo, o volume de biometano gerado no CTR não atinge a quantidade necessária para abastecer os 655 ônibus durante um ano.

Para o cenário 5 e 6, o município não recolhe óleo residual suficiente para produzir a quantidade de biodiesel necessária para abastecer os 655 ônibus durante um ano. Contudo, no cenário 6, a quantidade gerada de biometano seria capaz de abastecer a frota de ônibus não somente durante um ano, mas por cerca de 30 anos; ademais, o volume de biometano não utilizado em um ano poderia ser canalizado e utilizado como gás de cozinha nas residências próximas ao CTR ou abastecer as próprias instalações do aterro.

Assim, o cenário 4 é o único que se mostra viável, com a utilização de diesel e biometano no motor dual. Os resultados encontrados são favoráveis para essa combinação, na medida que o volume de biometano produzido abasteceria a frota durante um ano e ainda restaria quantidade suficiente para abastecer a frota do município por mais 25 anos, além de ter a possibilidade de outras utilizações como por exemplo, geração de energia elétrica para funcionamento do próprio CTR ou para regiões vizinhas ao aterro.

Dito isto, as emissões de CO_2, CO, NOx, HC, MP foram calculadas para o cenário 4, já que esse é o único que pode ser realizado de fato, e comparado com o cenário real, no qual

utiliza-se diesel nos ônibus, representado aqui pelo cenário 1, o que será discutido no item a seguir.

8.1 Emissão para os cenários 1 e 4

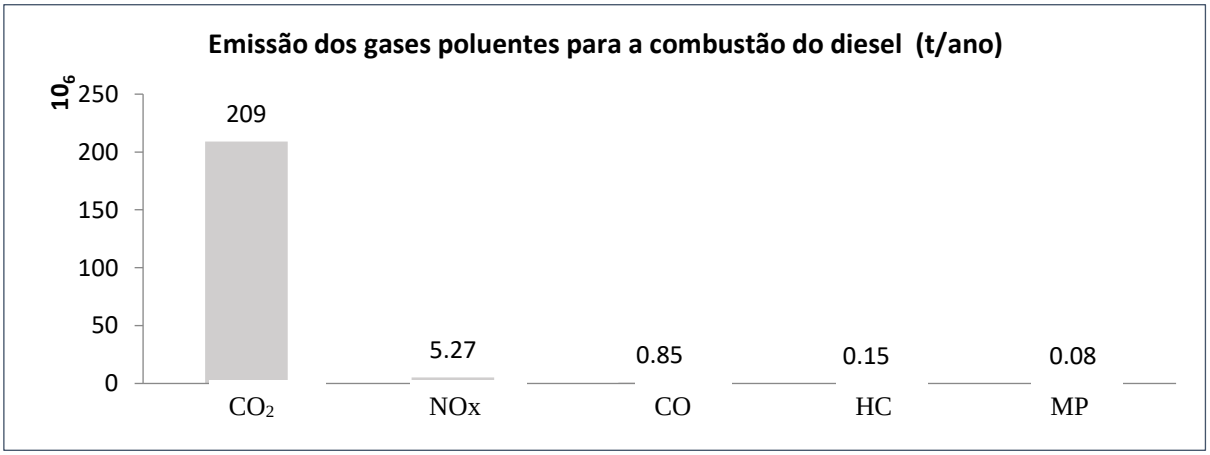
Como dito anteriormente, as emissões de CO_2, CO, NOx, HC, MP foram calculadas para o cenário 4 e comparado com o cenário real e os resultados para essas emissões estão explícitos no Quadro 51.

Quadro 51 - Emissões totais dos gases poluentes para cada cenário

Cenário	Combustível	Emissão total de gases poluente CO_2, CO, NOx, HC e MOP (t/ano)
1	Diesel	**215.488,41**
4	Diesel e biometano	**747.518,25**

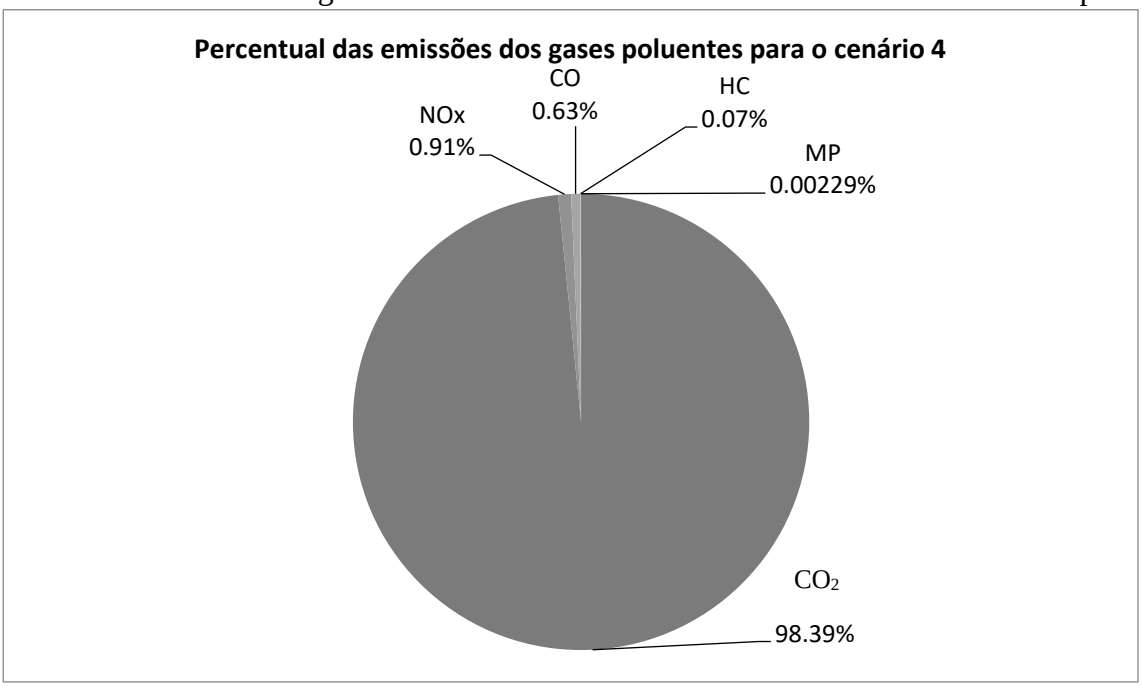
Para o ano de 2018, a frota de 655 ônibus da cidade de Volta Redonda abastecida com diesel, é responsável por emitir um total de 215.488,41 t de gases poluentes, incluindo CO_2, CO, NOx, HC, MP. Desses, percebeu-se que há uma maior emissão de CO_2 e de NOx, principalmente porque esses gases apresentam um fator de emissão maior quando comparado aos outros gases, conforme pode ser observado no Gráfico 10.

Gráfico 10 - Emissão total de gases na utilização de diesel nos ônibus para 2018



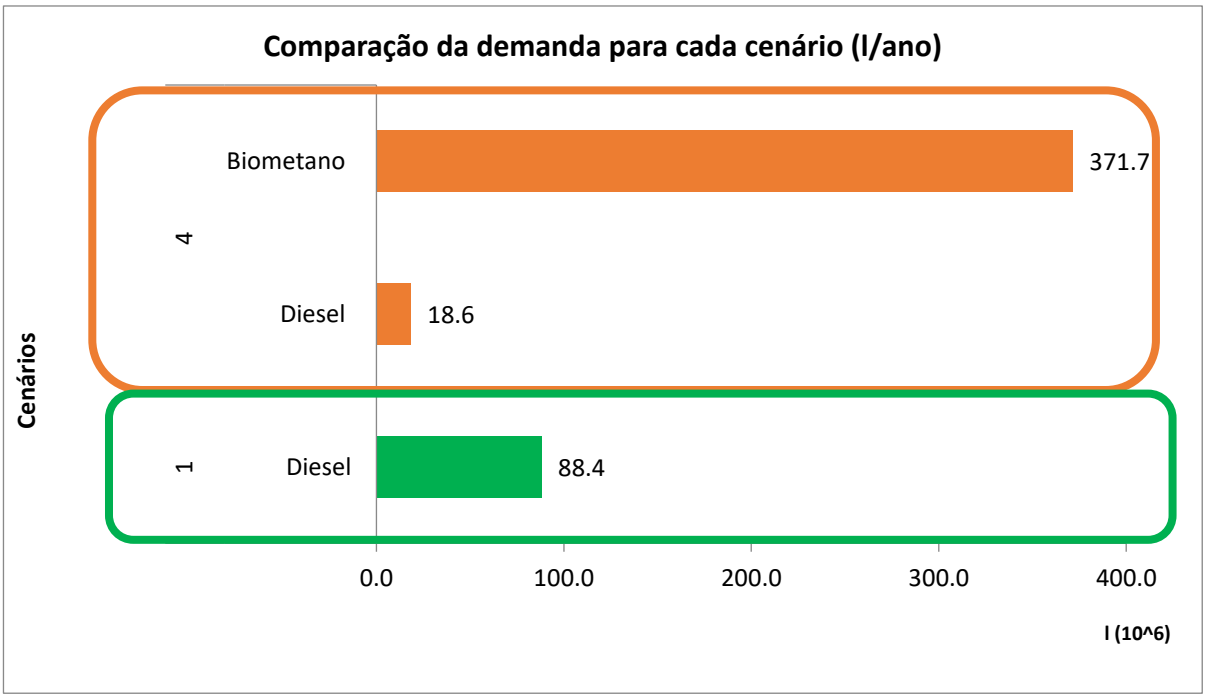
Para o cenário 4, ao abastecer os ônibus com diesel e biometano, há uma emissão de 747.518,25 t de gases poluentes, com o CO_2 sendo responsável por cerca de 98 % das emissões, seguido pelo NOx, CO, HC e MP, como pode ser analisado no Gráfico abaixo.

Gráfico 11 - Porcentagem das emissões no uso de biometano e diesel nos ônibus para 2018



Ao comparar os dois cenários, percebe-se que por mais que o biometano apresente um menor fator de emissão para o CO_2, CO, NOx, HC e MP, quando comparado ao diesel ambientalmente o cenário 4 não é favorável, na medida que ocorre uma maior emissão de gases poluentes quando comparado ao cenário que utiliza somente o diesel. Essa ocorrência deve-se principalmente ao fato da necessidade de um elevado volume de biometano, em litros, para abastecer o motor dual dos ônibus, o que conseqüentemente, acarraterá numa maior emissão desses gases. Essa análise comparativa apresenta-se no Gráfico abaixo.

Gráfico 12 - Comparação entre as demandas exigidas para abastecer o motor



As diferenças entre as emissões são exorbitantes, principalmente quando se considera o CO_2, CO, HC e NOx, indicando que ao se utilizar biometano e diesel no motor, há uma emissão de mais de 75%, 85%, 77% e 56%, respectivamente, para esses gases, quando comparado à utilização somente de diesel. Contudo, a emissão de MP é menor para o cenário 4.

Assim, percebe-se que a combinação de biometano-diesel como combustíveis para abastecer a frota de ônibus durante um ano acaba por emitir mais gases poluentes, principalmente o CO_2.

A seguir, será apresentada uma análise das emissões para os cenários 2, 3, 5 e 6.

8.2 Emissão hipotética para os cenários 2, 3, 5 e 6

Em complementação a esse estudo e na hipótese da viabilidade da produção do biometano e biodiesel que satisfizessem a quantidade necessária para abastecer os 655 ônibus, conforme as demandas observadas no Quadro 52, calculou-se as emissões de CO_2, CO, NOx, HC e MP para os demais cenários, i.e., o motor dual utilizando biodiesel (cenário2); biometano (cenário 3); diesel e biodiesel (cenário 5); e biometano e biodiesel (cenário 6). Os valores encontrados são apresentados no Quadro 52.

Vale ressaltar que esses cálculos para esses cenários (2,3,5 e 6) foram realizados à título de investigação e interesse científico, pois a demanda necessária para abastecimento da frota de ônibus mostrou-se inviável.

Quadro 52 - Emissão total dos gases poluentes (CO_2, CO, NOx, HC e MP) para todos os cenários

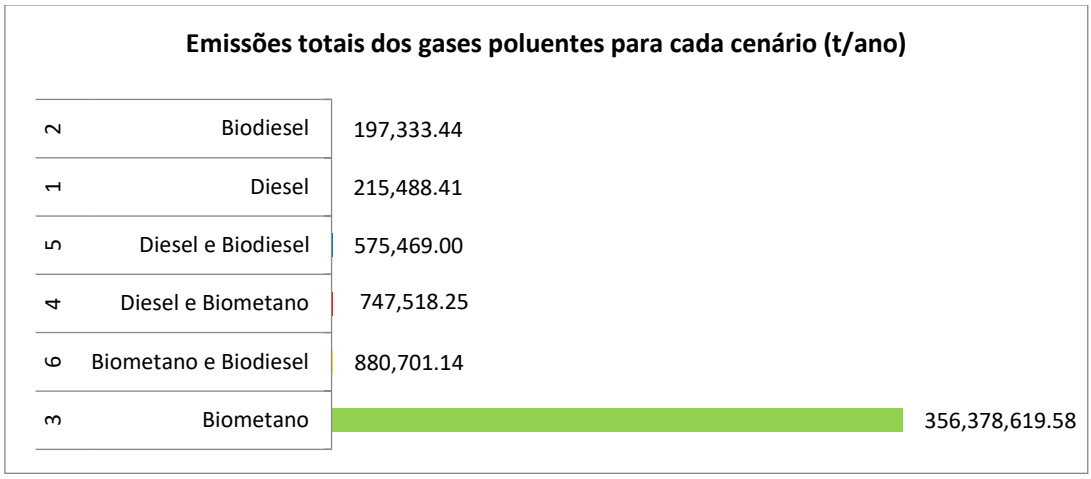
Cenários	Combustíveis utilizados	Emissões totais dos gases poluentes (t/ano)
1	Diesel	215.488,41
2	Biodiesel	197.333,44
3	Biometano	356.378.619,58
4	Diesel e Biometano	747.518,25
5	Diesel e Biodiesel	575.469,00
6	Biometano e Biodiesel	880.701,14

Assim, caso fosse factível essa realidade, a combustão do biodiesel nos ônibus (cenário 2) emitiria uma menor quantidade de gases poluentes quando comparado aos demais cenários. A utilização do biodiesel como combustível em ônibus também foi estudada por Pian et al (2009), que através da metodologia *bottom-up*, calcularam as emissões de biodiesel e concluíram que essas são menores que as do diesel para o uso como combustível em ônibus. Já Coronado et al (2009) calculou a eficiência ecológica considerando as emissões de CO_{2eq} e demonstrou que, do ponto de visa ecológico, o uso do biodiesel é uma alternativa favorável à substituir o diesel, apresentando valores mais altos de eficiência ecológica, enquanto que GUIMARÃES et al (2018) verificaram que as emissões de MP decresceram a medida que o teor de biodiesel aumentava na mistura com o diesel. CAMARGO (2017) também calculou as emissões de gases poluentes quando se utiliza o biodiesel oriundo da soja adicionado ao diesel e também percebeu que as emissões de NOx diminuem com o aumento de biodiesel na mistura no motor. Utilizando o biodiesel oriundo do óleo residual, HIRKUDE E PADALKAR (2014) observaram que o aumento nas taxas de compressão na eficiência térmica aperfeiçoa a eficiência do motor e reduz as emissões de CO e de MP.

Com relação à possibilidade do uso somente do biometano no motor (cenário 3), constatou-se que a queima desse biocombustível emitiria cerca de 99% a mais do que o biodiesel, além de se apresentar como o cenário que mais emitiu os gases poluentes quando comparado aos demais. Ainda, os cenários que apresentaram um alto valor de emissão,

comparado ao cenário real (diesel), são os que envolvem a utilização de biometano como combustível, o que ser observado no Gráfico 13.

Gráfico 13- Emissão total por poluente para cada cenário



Kliucininkas et al. (2012) também encontraram condições semelhantes para a utilização do biometano como combustível para ônibus e suas estimativas apontaram que o consumo de biogás é maior que o do diesel para um ônibus, o que aumenta consideravelmente as emissões de CO_2. Para esse autor, os valores das emissões de CO_2 do ônibus foram estimados em 1,0 e 1,6 kg/km de viagem para diesel e biogás, respectivamente. Maior emissão de HC pela combustão do biometano também foi encontrada por JÚNIOR (2014).

O cenário que utilizaria o biometano e biodiesel no motor dual aparece como o segundo cenário que mais emitiria gases poluentes, quando comparado aos demais cenários. Há uma maior emissão de CO_2 por esse cenário principalmente porque as emissões de CO_2 aumentam devido à grande massa desse gás presente na mistura gasosa que não participa do processo de combustão e deixa o motor com excesso de emissão (KALSI E SUBRAMANIAN (2017).

Diversas pesquisas corroboram os valores encontrados. Em seu estudo, KALSI e SUBRAMANIAN (2017) consideraram a utilização do biodiesel e biogás no motor dual com o intuito de medir conceitos mecânicos do motor, como a eficiência térmica, e registrou que as emissões de HC, CO_2 e NOx foram maiores para o caso da utilização conjunta de biodiesel e biometano no motor. BORA e SAHA (2015) submeteram um motor à diferentes taxas de eficiência térmica e verificaram que na combinação de biodiesel com biometano há uma maior emissão de NOx e CO_2 do que o diesel. KHAYUM, ANBARASU E MURUGAN

(2020) em seus estudos verificaram que a mistura biometano-biodiesel também emite mais NOx e CO_2 quando comparado ao diesel.

Na mistura de diesel e biogás em motor dual, JAGADISH E GUMTAPURE (2019), obervaram que a tendência de emissão de CO para o modo dual é maior que o diesel em todas as cargas a que foi submetido o motor. A justificativa encontrada pelos autores foi que para o diesel puro, a emissão de CO é menor, porque o diesel possui uma velocidade de chama estequiométrica mais alta do que biogás, ao passo que este apresenta menor velocidade estequiométrica da chama que o diesel.

Segundo Papagiannakis e Hountalas (2003), geralmente os valores de emissão de CO sob operação de forma dual, com biodiesel e diesel são consideravelmente mais altos quando comparados ao diesel. Os mesmo autores realizaram o mesmo experimento para mistura de gás natural e diesel e também constataram que os níveis das emissões de CO e HC são mais elevados do que o do diesel (PAPAGIANNAKIS E HOUNTALAS, 2004).

Contudo, alguns estudos também apontaram que as emissões desses gases, dependendo das condições do motor dual, da eficiência térmica, diminuem com o uso do biometano puro e do biometano com biodiesel. Grande parte desses estudos foram realizados em laboratório (JAGADISH E GUMTAPURE, 2019; AKLOUCHE et al,2017; BARIK et al, 2017), ou investigaram as emissões em um curto período de tempo (FILHO et al, 2017); ou estimaram as emissões com base em cálculos estequiométricos (KOZERSKI e HESS, 2006).

Isso demonstra que os valores para as emissões de gases poluentes dependem da forma como se avalia o motor, o local de estudo e as condições a que foram submetidos os combustíveis estudados.

O Quadro 53 traz um resumo de alguns estudos que analisaram as emissões de gases poluentes para a mistura de biogás-diesel.

Quadro 53 - Estudos que analisaram as emissões da mistura biogás-diesel

	Emissão verificada				
Autores	CO_2	CO	HC	NOx	Status das emissões do gases
AMBARITA (2017)		X	X		Aumento
BARIK AND SIVALINGAM (2017)		X	X		Aumento
BORA E SAHA (2015B, 2016)	X	X	X	X	Aumento
CHINTALA AND SUBRAMANIAN (2014)		X	X		Aumento
IBRAHIM, NARASIMHAN E RAMESH (2015)		X	X	X	Redução
KARAGOZ et al (2016)		X		X	Aumento de CO / Redução de NOx
LOUNICI et al (2014)		X	X	X	Aumento de CO e HC / Redução de NOx
MAHLA et al (2018)		X	X	X	Aumento de CO e HC / Redução de NOx
MUSTAFI, RAINE, VERHELST (2013)		X		X	Aumento de CO / Redução de NOx
SANDALCI et al (2019)		X		X	Aumento
SARKAR AND SAHA (2018)	X	X	X	X	Aumento de CO_2/ Redução de CO, HC, NOx
DEHERI et al (2020)		X	X	X	Aumento de HC, CO/ Redução de NOx
AKLOUCHE et al (2017)	X				Aumento de CO_2
MAKAREVICIENE et al (2013)		X	X	X	Aumento de Nox/Redução de HC, CO
YOON E LEE (2011)		X			Aumento

Vale ressaltar que a disseminação de dados e resultados de ACV e tecnologias de motores é importante, na medida que a avaliação das emissões de gases em um ciclo de vida, principalmente de combustíveis, pode ser realizada de diferentes maneiras e, assim, obter resultados e valores diferenciados para cada estudo (LYNG e BREKKE, 2019).

Entretanto, para os cenários levantados por esse trabalho, o biodiesel apresentou-se como melhor alternativa para substituir o diesel.

Considerações finais

O uso dos combustíveis fósseis modificou a economia, a sociedade e o meio ambiente, acelerando o desenvolvimento urbano, principalmente através da expansão dos meios de transporte. Entretanto, essa intensa utilização desse tipo de combustível atingiu não só as esferas econômica e social, mas também a ambiental, que merece destaque, uma vez que o uso desenfreado dos recursos desse combustível fóssil, principalmente nos veículos automotores vem causando inúmeros impactos ambientais, principalmente no tocante ao aumento das emissões de gases poluentes oriundos da queima dos combustíveis oriundos do petróleo.

Assim, métodos estão sendo criados na tentativa de diminuir esse impacto, seja através de políticas, de pesquisas e desenvolvimento de novas fontes de energia limpa. Estudos demonstram que apoiar o investimento em novas fontes de energia, bem como isenções de impostos têm sido fundamentais para a utilização e desenvolvimento de novos biocombustíveis, como biodiesel e biometano, principalmente no setor de transporte, na tentativa de mitigar as emissões de GEE, principalmente o CO_2, CH_4 e NO_x.

Dessa forma, esse trabalho buscou analisar as emissões de CO_{2eq}, para o ano de 2018, de dois biocombustíveis que poderiam ser utilizados em substituição ao óleo diesel nos ônibus da cidade de Volta Redonda. Assim, inicialmente, analisou-se o ciclo de vida do biometano oriundo do RSU de Barra Mansa e do biodiesel oriundo de óleo residual coletado em Volta Redonda, já que essas duas cidades se destacam na gestão municipal de sustentabilidade. A ACV do biometano demonstrou que aproximadamente 2,15 CO_{2eq} são emitidos na produção anual desse biocombustivel, enquanto que para produzir o biodiesel são emitidos cerca de 0,019 t CO_{2eq}/ano.

Ao comparar esses resultados com a emissão na produção de diesel, percebeu-se que a produção do biodiesel emitiu uma menor quantidade de CO_{2eq} quando comparado ao biometano e diesel. Entretanto, a produção do biometano emitiu uma quantidade superior à produção de biodiesel e diesel, demonstrando que a avaliação do ciclo de vida dos combustíveis é uma importante ferramenta complementar na análise das emissões de GEE, na medida que ao se avaliar somente o fator de emissão, o biometano é vantajoso quando comparado ao diesel, criando uma falsa ideia de que esse biocombustível é ambientalmente eficaz na utilização em ônibus urbano.

Posteriormente às análises dos ciclos de vida, realizou-se a análise de 6 cenários para o consumo dos combustíveis, calculado a partir da vazão do motor dual presente nos ônibus. Nesses cálculos, observou-se que o único cenário possível seria a utilização de biometano e diesel para abastecer a frota de ônibus durante um ano. Assim, foram calculadas as emissões para esse cenário, comparando-os com o cenário real, no qual os ônibus utilizam somente diesel e os resultados encontrados demonstraram que por mais que o biometano apresente um menor fator de emissão quando comparado ao diesel, ambientalmente esse cenário não é favorável, na medida que ocorre uma maior emissão de gases poluentes quando comparado ao uso do diesel. Isso acontece devido à grande quantidade de litros de biometano necessária para abastecer o motor dual.

Assim, os valores encontrados demonstram que a produção do biodiesel a partir do óleo residual é uma iniciativa com mais caráter social e ambiental do que econômico, visto que o volume deste material é muito pequeno quando comparado à demanda dos ônibus. Já com relação ao biometano, a utilização desse biocombustível mostrou-se inviável, uma vez que este, por mais que possua um fator de emissão menor do que o do diesel, é necessário um grande volume de biometano para abastecer a frota, o que acaba descaracterizando esse biocombustível como fonte de energia limpa, para o caso de sua utilização em ônibus urbanos na cidade de Volta Redonda.

Portanto, esse trabalho demonstrou que, com relação a emissão de CO_2, CO, HC, e NOx, a utilização do biodiesel e do biometano é inviável para o abastecimento dos 655 ônibus da frota de Volta Redonda. Contudo, é importante analisar também o impacto social e econômico do uso desses biocombustíveis. Para o biodiesel, seria interessante avaliar o impacto da geração de empregos em Volta Redonda, a partir da coleta do óleo residual, bem como a importância de incentivos em escolas que valorizem e exemplifiquem a reciclagem desse óleo, além de estudos para outros tipos de uso do biodiesel. Com relação ao biometano, seria instigante também analisar o impacto social, demonstrando a importância não só da possibilidade de geração de energia a partir desse biocombustível, mas também a necessidade de se estabelecer uma política mais forte de sustentabilidade que promova uma coleta seletiva de RSU mais abrangente. Economicamente, trabalhos futuros poderiam realizar uma análise econômica da produção desses dois biocombustíveis, analisando questões econômicas desde a sua produção até a geração de energia. Ainda, também cabe destacar que estudos acadêmicos que demonstrem a viabilidade do biometano e do biodiesel para outros usos, como geração de energia elétrica, também são interessantes para promover e incentivar a sustentabilidade nas cidades.

Referências Bibliográficas

ABNT, ISO 14040:2009 - Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2009. Disponível em: https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=316462. Acesso em: 08/07/2019

AHRENS T., WEILAND P. Biomethane for future mobility. Landbauforschung Völkenrode, n 1,71-79, 2007.

AKLOUCHE F. Z. , et al. Experimental investigation of the equivalence ratio influence on combustion, performance and exhaust emissions of a dual fuel diesel engine operating on synthetic biogas fuel. Energy Convers Manage, 2017, dói: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.09.050.

AMBARITA H. Performance and emission characteristics of a small diesel engine run in dual-fuel (diesel-biogas) mode. Case Stud Thermal Eng 2017; 10:179–91. https:// doi.org/10.1016/j.csite.2017.06.003

ALMEIDA, I. R. O. L., OLIVEIRA, C. M., D'AGOSTO M. A. Avaliação de desempenho ambiental da racionalização das linhas de ônibus do município do Rio de Janeiro. Revista dos Transportes Públicos – ANTP, ano 39, 2017/2º quadrimestre.

ALTAMIRANO, C. A. A. Análise de Ciclo de Vida do Biodiesel de Soja: Uma Comparação Entre as Rotas Metílica e Etílica.Dissertação Apresentada Ao Corpo Docente Do Curso De Pós-Graduação Em Tecnologia De Processos Químicos E Bioquímicos Como Parte Dos Requisitos Necessarios Para A Obtenção Do Grau De Mestre Em Ciências. 2013

ANP. Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Rio de Janeiro, 2019a. Disponível:

http://www.anp.gov.br/publicacoes/anuario-estatistico/5237-anuario-estatistico-2019, Acesso em: 30/09/2019.

ANP. Ponto de abastecimento, 2019b. Disponível em: http://www.anp.gov.br/distribuicao-e-revenda/ponto-de-abastecimento. Acesso em: 24/11/2019.

APROBRIO. Aumento da Mistura de Biodiesel Estimula Investimentos. 2019. Disponível em:https://aprobio.com.br/2019/08/28/aumento-da-mistura-de-biodiesel-estimula-investimentos/. Acesso em: 01/09/2019.

ARAÚJO, A. P. C. Produção De Biogás A Partir De Resíduos Orgânicos Utilizando Biodigestor Anaeróbico. Trabalho de Conclusão de Curso. (Faculdade de Engenharia Química), Universidade Federal de Uberlândia. 2017.

BAI et al. Technical and environmental effects of biodiesel use in local public transport Transportation Research Part D, n 47, 323–335, 2016.

BARBOSA et al. Desempenho comparativo de um motor de ciclo diesel utilizando diesel e misturas de Biodiesel. Ciência e Agrotecnologia, Lavras, v. 32, n. 5, p. 1588-1593, set/out., 2008.

BARIK D., et al. Experimental investigation on the behavior of a direct injection diesel engine fueled with Karanja methyl ester biogas dual fuel at different injection timings. Energy vol. 118, pp. 127–138,. doi: https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.12.025. 2017

Barik D, Sivalingam M. Performance and emission characteristics of a biogas fueled DI diesel engine. SAE Technical Paper 2013; doi: 10.4271/2013-01-2507.

BARRA MANSA. História de Barra Mansa.
Disponível em: http://www.barramansa.rj.gov.br/historia/. Acesso em: 18/09/2018

BARRA MANSA. Barra Mansa dá destinação ambientalmente correta para resíduos sólidos. Disponível em: https://www.barramansa.rj.gov.br/index.php/imprensa/noticias/1040-barra-mansa-da-destinacao-ambientalmente-correta-para-residuos-solidos. Acesso em: 05/07/2019.

EPE, Balanço Energético Nacional 2019: Ano base 2018, Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro, 2019.

BERGHOUT, N.A. Technological Learning in the German Biodiesel Industry: an Experience Curve Approach to Quantify Reductions in Production Costs, Energy Use and Greenhouse Gas Emissions. Master thesis, Utrecht University, Copernicus Institute, The Netherlands, 2008.

BREITENMOSER L., GROSS T., HUESCH R.,, RAU J., DHA H. R, KUMAR S., HUGI C., WINTGENS T., Anaerobic digestion of biowastes in India: Opportunities, challenges and research needs" Journal Of Environmental Management, vol. 236, pp. 396-412, Apr 2019, DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.12.014

BIODIESELBR. CESBRA. Disponível em: https://www.biodieselbr.com/usinas_brasil/fabrica/cesbra. Acesso em: 18/10/2018.

BNDES Set., Aquecimento global: acordos internacionais, emissões de CO_2 e o surgimento dos mercados de carbono no mundo. Rio de Janeiro, v. 24, n. 48, p. 167-244, set. 2018.

BOEY, P. L.; MANIAM, G. P.; HAMID, S. A. Performance of calcium oxide as a heterogeneous catalyst in biodiesel. Chemical Engineering Journal, v. 168, n. 1, p. 15-22, Mar. 2011.

BORBA et al. Emissão de gases do efeito estufa de um aterro sanitário no Rio de Janeiro. Engenharia Sanitária Ambiental, v.23, p. 101-11, jan/fev 2018. DOI: 10.1590/S1413-41522018167438

BORA B. J, SAHA, U, K. Improving the Performance of a Biogas Powered Dual Fuel Diesel Engine Using Emulsified Rice Bran Biodiesel as Pilot Fuel Through Adjustment of Compression Ratio and Injection Timing. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, vol. 137, 2015.

BORA BJ, SAHA UK. Optimisation of injection timing and compression ratio of a raw

biogas powered dual fuel diesel engine. Appl Therm Eng 2016; 92:111–21. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015a.08.111.

BORA BJ, SAHA UK. Comparative assessment of a biogas run dual fuel diesel engine with rice bran oil methyl ester, pongamia oil methyl ester and palm oil methyl ester as pilot fuels. Renewable Energy 2015b; 81:490–8. https://doi.org/10.1016/j.renene.

CAMARGO, K. C. C. Análise Experimental Do Desempenho E Emissão De Poluentes De Um Motor A Diesel Utilizando Biodiesel De Soja. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação. Engenharia de Energia. Universidade Federal da Grande Dourados.

CARNEIRO, M. L. N. M. Análise termoeconômica e ambiental de uma usina de aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos - Estudo de caso da planta de Zabalgarbi/Bilbao adaptada para a realidade brasileira. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – PUC, Rio de Janeiro. 2015.

CARVALHO, P.T. Balanço de Emissões de Gases de Efeito Estufa de Biodiesel Produzido a Partir de Soja e Dendê no Brasil. 153f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Planejamento Energético) - UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, 2012

CASSOL, H. L. G., et al Redução De Emissões De CO_2 Pela Produção De Biocombustíveis A Partir De Óleo De Dendê Na Amazônia Brasileira Floresta, Curitiba, PR, v. 46, n. 1, p. 135 - 144, jan. / mar. 2016.

CASTRO et al. Complexo Agroindustrial de Biodiesel no Brasil: Competitividade das Cadeias Produtivas de Matérias-Primas, Embrapa Agroenergia 1 ed., cap 4, , Brasília, DF, 2010.

CAVALETT, O.,ORTEGA, E. “Integrated environmental assessment of biodiesel production from soybean in Brazil”, Journal of Cleaner Production v. 18, pp. 55–70, 2010.

CETESB, EMISSÕES VEICULARES NO ESTADO DE SÃO PAULO 2018. São Paulo, 2019. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/veicular/wp-

content/uploads/sites/6/2020/02/Relat%C3%B3rio-Emiss%C3%B5es-Veiculares-no-Estado-de-S%C3%A3o-Paulo-2018.pdf

CHARITHA V. et al. Investigation on performance and emissions of RCCI dual fuel combustion on diesel - bio diesel in a light duty engine. Renewable Energy, 134, pp. 1081-1088, 2019

CHERNICHARO, C. A. DE L., Reatores anaeróbios. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. DESA/UFMG. Belo Horizonte – MG, v.5, 1997.

CHERUBINI F, BARGIGLI S., ULGIATI S. Life cycle assessment (LCA) of waste management strategies: Landfilling, sorting plant and incineration. Energy. vol 34, pp 2116-2123, 2009.

CHIN et al. Issues of social acceptance on biofuel development. Journal of Cleaner Production, n 71, 30-39, 2014.

CHINTALA V, SUBRAMANIAN KA. Hydrogen energy share improvement along with NOx (oxides of nitrogen) emission reduction in a hydrogen dual-fuel compression ignition engine using water injection. Energy Convers Manage 2014; 83:249–59. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.03.075.

CHRISTOFF, P. Produção de biodiesel a partir do óleo residual de fritura comercial estudo de caso: Guaratuba, Instituto de Engenharia do Paraná, Mestrado de Desenvolvimento e Tecnologias, Curitiba, 2006

CIDADE DO AÇO. Serviços. Disponível em: https://www.cidadedoaco.com.br/servicos/. Acesso em: 30/08/2019.

CINBAL. A empresa - Quem somos. Disponível em: http://www.cinbal.com.br/Quem-somos/. Acesso em: 20/07/2019.

CNM. Volta Redonda tem projeto de reciclagem de óleo de cozinha usado. Companhia Nacional dos Municípios. Disponível em:

https://www.cnm.org.br/index.php/areastecnicas/noticias/meio-ambiente/volta-redonda-tem-projeto-de-reciclagem-de-%C3%B3leo-de-cozinha-usado. Acesso em: 20/09/2018.

COELHO et al. A conversão da fonte renovável biogás em energia. V Congresso Brasileiro de Planejamento Energético. Brasília - DF 2006.

COIMBRA-ARAUJO C. H, Mariane l., Bley C., Frigo E. P.,. Frigo M. S, Araujo I. R. S., Alves H. J., "Brazilian case study for biogas energy: Production of electric power, heat and automotive energy in condominiums of agroenergy", Renewable & Sustainable Energy Reviews, vol. 40, pp. 826-839, Dec 2014, DOI: 10.1016/j.rser.2014.07.024

CONAB. BOLETIM DA SAFRA DE GRÃOS. Companhia Nacional de Abastecimento. Disponível em: https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos. Acesso em: 10/06/2019

CORONADO R. C. et al. Determination of ecological efficiency in internal combustion engines: The use of biodiesel. Applied Thermal Engineering 29, 1887–1892, 2009
CORSINI et al. Pollutant emissions in common-rail Diesel engines in extraurban cycle: rapeseed oils vs Diesel fuel. Energy Procedia, n 82, 141 – 148, 2015

D'AGOSTO M. A., RIBEIRO, S. K., SOUZA, C. D. R. S. Opportunity to reduce greenhouse gas by the use of alternative fuels and technologies in urban public transport in Brazil. Current Opinion in Environmental Sustainability . n. 5, 177–183, 2013

DE PAULO, A. A. Análise Das Emissões De Gases E Consumo Específico De Um Grupo Motor-Gerador Abastecido Com Misturas Diesel, Biodiesel E Etanol. Dissertação Para A Obtenção Do Título De Mestre Em Engenharia E Tecnologia De Materiais. PUCRS. Porto Alegre

DÉCIO, L. G. Balanço de emissões de CO_2 por biocombustíveis no Brasil: histórico e perspectivas, Embrapa Soja Londrina, PR, 2014

DEHERI C., et al. A review on performance of biogas and hydrogen on diesel engine in dual fuel mode. Fuel, 260, 2020

DIÁRIO DO VALE. Vendas de veículos novos crescem nos principais municípios da região. Disponível em: https://diariodovale.com.br/ultima-noticia/vendas-de-veiculos-novos-crescem-nos-principais-municipios-da-regiao/, 2020. Acesso em: 07/02/2020.

DIAS, F. R. F.; FERREIRA, V. F.; CUNHA, A. C. Uma visão geral dos diferentes tipos de catálise em síntese orgânica. Revista Virtual de Química, v. 4, n. 6, p. 840-871, Dez. 2012. ISSN ISSN 1984/6835.

DOS SANTOS I. F. S., Vieira N. B. D., Nobrega L. G. B. de, Barros R. M., Tiago G. L., Assessment of potential biogas production from multiple organic wastes in Brazil: Impact on energy generation, use, and emissions abatement, Resources Conservation and Recycling, vol. 131, pp. 54-63, Apr 2018, DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.12.012

DULLIUS et al, Urban Sustainability By Analysis Of Renewable Technologies In The Public Transport Of The City Of Curitiba. Journal of Environmental Management and Sustainability, vol. 6, n. , agosto 2017.

DURAISAMY G. , RANGASAMY M. e GOVINDAN N. A comparative study on methanol/diesel and methanol/PODE dual fuel RCCI combustion in an automotive diesel engine. Renewable Energy, 145 pp. 542 -556, 2020.

EL-ADAWY M., EL- KASABY M E Y. A. ELDRAINY. Performance characteristics of a supercharged variable compression ratio diesel engine fueled by biodiesel blends .Alexandria Engineering Journal , 57, pp.3473–3482, 2018.

ENERGIA E AMBIENTE. Inventário de Emissões Atmosféricas do Transporte Rodoviário de Passageiros no Município de São Paulo. Instituto de Energia e Meio Ambiente. Disponível em: http://emissoes.energiaeambiente.org.br/. Acesso em: 04/07/2019.

DIMITRIOU P., TSUJIMURA T., SUZUKI Y. Adopting biodiesel as an indirect way to reduce the NOx emission of a hydrogen fumigated dual-fuel engine.Fuel, 244, 324–334 , 2019

FALCO, D G. Avaliação do desempenho ambiental do transporte coletivo urbano no estado de São Paulo: uma abordagem de ciclo de vida do ônibus a diesel e elétrico à bateria. Dissertação de Mestrado. Curso de Engenharia Mecânica , UNICAMP, 2017.

FARIAS, A. F. F et al. Biodiesel obtained by ethylic transesterification using CuO, ZnO and CeO2 supported on bentonite. Fuel 2015, 160, 357-365.

FAETEC. Inaugurada nova faculdade de educação tecnógica, 2018. Disponível em: http://www.faetec.rj.gov.br/index.php/. Acesso em: 14/12/2019.

FERNANDES, M. R. Formulação de novos combustíveis base diesel: avaliação de desempenho e emissões. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte.. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Natal, 2011.

FERREIRA, B. O. Avaliação de um sistema de metanização de resíduos orgânicos alimentares com vistas ao aproveitamento energético do biogás. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais. 2015.

FERREIRA G. S.; CARVAS, R. N. Análise Comparativa do Ciclo de Vida do Biodiesel obtido a partir do óleo de Dendê e Etanol versus Diesel de Petróleo. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Química da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção de bacharelado em Engenharia Química. São Paulo, 2014.

FROEHNER S. LEITHOLD J., JÚNIOR, L. F. L. Transesterificação de óleos vegetais: caracterização por cromotografia e densidade. Quim. Nova, vol. 30, n. 8, pp. 2016-2019, 2007.

GESTRAN. O que é caminhão tanque e como é sua legislação? Disponível em: https://www.gestran.com.br/blog/o-que-e-caminhao-tanque-e-como-e-sua-legislacao, 2018. Acesso em: 20/11/2019

G1. Volta Redonda tem quase 1 carro para cada dois habitantes, aponta Detran. Disponível em: https://g1.globo.com/rj/sul-do-rio-costa-verde/noticia/2018/10/25/volta-redonda-tem-quase-1-carro-para-cada-dois-habitantes-aponta-detran.ghtml, 2018. Acesso em: 10/08/2018.

GOMES L.P. et al Avaliação ambiental de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos precedidos ou não por unidades de compostagem. 449-462, v.20, n.3 , jul/set 2015.

GOUVEIA, N. Resíduos sólidos urbanos: impactos socioambientais e perspectiva de manejo sustentável com inclusão social. Ciência & Saúde Coletiva, 17(6):1503-1510, 2012

GRASMAN, S. E. & SADASHIVAM, S. Implementation policy considerations for achieving yearround operability of biodiesel programs. Biomass and bioenergy, n 39, 439-448, 2012.

GUABIROBA R. C. S., D'AGOSTO M. A.O impacto do custo de coleta do óleo residual de fritura disperso em áreas urbanas no custo total de produção de biodiesel – estudo de caso. Transportes. v.19, pp. 68–76, 2011.

FILHO, M G. et al. Análise das emissões atmosféricas, rendimento e nível de ruído em ônibus movido a biometano - um estudo de caso. Enciclopédia Biosfera, [s.l.], v. 14, n. 25, p.1352-1359, 5 dez. 2017.

GUIMARÃES C. C. Redução da emissão de material particulado em função da inserção de misturas do biodiesel de soja e mamona ao diesel. Eng Sanit Ambient, v.23, n.2, 355-362 mar/abr 2018.

GUIMARÃES, P. V. C. Transesterificação Etílica do Óleo de Soja Residual de Fritura utilizando CaO como catalisador. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal da Fronteira Sul, Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Cerro Largo, RS , 2019.

HALEWADIMATHA S., YALIWALB V. S. e BANAPURMATH, N. R. Fuel efficiency enhancement of modified diesel engine operated in dual fuel mode using renewable and sustainable fuels. international journal of sustainable engineering vol. 12, n. 4, pp. 248–261, 2019. https://doi.org/10.1080/19397038.2019.1608331

HAZTEC. Resíduos. Disponível em: http://haztec.com.br/solucoes-ambientais-completas/index.php/solucoes/centrais-de-tratamento-de-residuos

HILL J., NELSON E., TILMAN D., POLASKY S., TIFFANY D. Environmental, economic, and energetic costs and benefits of biodiesel and ethanol biofuels. Proceedings of the National Academy of Sciences of the Unites States of America (PNAS), 2006

HIRKUDE J., PADALKAR A. S. Experimental investigation of the effect of compression ratio on performance and emissions of CI engine operated with waste fried oil methyl ester blend. Fuel Processing Technology, 367–375, 128, 2014.

HOEFNAGELS, R., SMEETS, E., FAAIJ, A. "Greenhouse gas footprints of different biofuel production systems", Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 14, pp. 1661–1694, 2010

HOLANDA, A. Biodiesel e inclusão social. Câmara dos Deputados, coordenação de publicações, Brasília, p.200. Série caderno de altos estudos, n.1, 2004.

HOLM-NIELSEN J.B. et al. The future of anaerobic digestion and biogas utilization Bioresource Technology 100 (2009) 5478–5484

IBICT. Histórico da ACV. Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia. Disponível em: http://acv.ibict.br/acv/historico-da-acv/. Acesso em: 10/07/2018.

IBGE. Cidades – Volta redonda. Disponível em: https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rj/volta-redonda/pesquisa/30/30051. Acesso em: 28/03/2019.

IBRAHIM MM, NARASIMHAN JV, RAMESH A. Comparison of the predominantly premixed charge compression ignition and the dual fuel modes of operation with biogas and diesel as fuels. Energy 2015. https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.06.033.

ICLEI (International Council for Local Environmental Initiatives). CCP Members; CCP FiveMilestone Framework., 2009).

ILERI, E.; KOCAR, G. Experimental investigation of the effect of antioxidant additives on NOx emissions of a diesel engine using biodiesel. Fuel, 2014; 125:44e9.

IPCC. Climate Change 2014 - Syntesis Report. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland, 151, 2014.

ITURRI, E. A. Z. Uma proposta para a base de apoio dos drenos de gás. Trabalho apresentado no Simpósio Internacional de Tecnologias e Tratamentos de Resíduos Sólidos, Rio de Janeiro, 2006.

JAGADISH C. E GUMTAPURE V., Experimental investigation of methane-enriched biogas in a single cylinder diesel engine by the dual fuel mode . Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, And Environmental Effects. 2019

JÚNIOR, J. R. A., FERNANDES, T. S., SILVA, Y. R. S. P. O Uso do Diesel S 50 no Transporte Coletivo e sua Influência na Qualidade do Ar. Cadernos de Graduação - Ciências Exatas e Tecnológicas. Unit, Aracajú, vol. 2, n.1, p. 117-127, mar/2014.

KALSI S.S., SUBRAMANIAN K.A. Effect of simulated biogas on performance, combustion and emissions characteristics of a bio-diesel fueled diesel engine. Renewable Energy, 106, 78 – 90, 2017, Renewable Energy 106 (2017) 78e90

KALLAS Z., GIL, J.M. Do the Spanish want biodiesel? A case study in the Catalan transport sector. Renewable Energy, n 83, 398-406.2015.

KAMMUANG-LUE N., Bhudtiyatanee M., Optimum ratio of compressed biomethane gas as dual fuel in turbocharged common rail diesel engine, Journal of the Energy Institute, vol. 91, pp. 1113-1125, Dec 2018, DOI: 10.1016/j.joei.2017.06.012

KHAYUM N., ANBARASU S., e MURUGAN S. (2020). Combined effect of fuel injecting timing and nozzle opening pressure of a biogas-biodiesel fuelled diesel engine.
Journal Fuel. Vol. 262. 2020

KARAGOZ Y etal.. Effects of hydrogen and methane addition on combustion characteristics, emissions, and performance of a CI engine. Int J Hydrogen Energy 2016; 41:1313–25. https://doi.org/
10.1016/j.ijhydene.2015.11.112.

KLIUCININKAS et al, The life cycle assessment of alternative fuel chains for urban buses and Trolleybuses, Journal of Environmental Management, n 99, 98-103, 2012.

KOZERSKI, G. R.; HESS, S. C. Estimativa dos poluentes emitidos pelos ônibus e microônibus de campo grande/ms, empregando como combustível diesel, biodiesel ou gás natural. . Engenharia Sanitaria e Ambiental, v. 11, p. 113–117, 2006.

KURIEN B. T, DORRI Y., D'SOUZA A., SCOFIELD R. H., Four men in a space station - To say nothing of the cow! The quest for finding respite and work in the ultimate frontier, Medical Hypotheses, vol. 68, pp. 1195-1199, 2007,DOI: 10.1016/j.mehy.2006.12.023

KUWAHARA N., BERNI M. D., BAJAY S. V., Energy supply from municipal wastes: The potential of biogas-fuelled buses in Brazil, Renewable Energy, vol. 16, pp. 1000-1003, Jan 1999, DOI: 10.1016/S0960-1481(98)00353-X

LANDIM, A. P. R., AZEVEDO L. P.O Aproveitamento Energético do Biogás em aterros sanitários: unindo o inútil ao Sustentável. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 27, mar. 2008

LARSSON, GRÖNKVIST & ALVFORS, Upgraded biogas for transport in Sweden e effects of policy instruments on production, infrastructure deployment and vehicle, Sales Journal of Cleaner Production, n 112, 3774-3784, 2016.

LÖNNQVIST T, GRÖNKVIST S., SANDBERG T. Forest-derived methane in the Swedish transport sector: A closing window? Energy Policy, n 105, 440–450, 2017.

LIU W. H., Hashim H., Lim J. S., Ho C. S., Klemes J. J., Zamhuri M. I., Ho W. S., "Techno-economic assessment of different cooling systems for office buildings in tropical large city considering on-site biogas utilization", Journal of Cleaner Production, vol. 184, pp. 774-787, May 2018, DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.02.180

LOUNICI M, LOUBAR K, TAZEROUT M, BALISTROU M. Experimental investigation on the performance and exhaust emission of biogas-diesel dual-fuel combustion in a Ci engine. SAE Technical Paper 2014; doi: 10.4271/2014-01-2689

LYNG K A. BREKKE, A. Environmental Life Cycle Assessment of Biogas as a Fuel for Transport Compared with Alternative Fuels. Energies, 12, 532; 2019doi:10.3390/en12030532

MAHLA S. K., et al. Studies on biogas-fuelled compression ignition engine under dual fuel mode. Environ Sci Pollut Res, 2018, https://doi.org/10.1007/s11356-018-1247-4.

MAKAREVICIENE V et al. Performance and emission characteristics of biogas used in diesel engine operation. Energy Convers Manage 2013; 75:224–33. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.06.012.

MANDALHO, L. G. H. Emissões de Gases de Efeito Estufa de Veículos Automotores no Deslocamento Casa-Trabalho e em Deslocamentos a Serviço, de Servidores do Ministério do Meio Ambiente, nos anos-base 2012 e 2013. Trabalho de conclusão de curso Especialização em Projetos Sustentáveis, Mudanças Climáticas e Gestão Corporativa de Carbono, Universidade Federal do Paraná, 2014

MATTOS, L. B. R. A Importância do Setor de Transportes na Emissão de Gases do Efeito Estufa – O Caso do Município do Rio de Janeiro, COPPE, Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2001.

MEOTTI, B. Comparação entre métodos top-down e bottom-up na estimativa de emissões veiculares. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Florianópolis, 2019.

MENDONÇA, R. M. L. Avaliação de ciclo de vida do carbono na queima de biodiesel à base

de óleo de soja. Dissertação de mestrado. Departamento de Engenharia Mecânica. UNB. 2007.

MIGUEL, P. A. C. Estudo de caso na engenharia de produção: estruturação e recomendações para sua condução. Produção, v. 17, n. 1, p. 216-229, Jan./Abr. 2007.

MMA. Resolução Conama n° 403, de 11 de novembro de 2008. Disponível em: http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=591. Acesso em: 14/12/2018

MMA. Plano Nacional de Resíduos Sólidos. Governo federal. 2011

MMA. Segundo Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários. 2013.

MMA. Definições. Disponível em: https://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/qualidade-doar/defini%C3%A7%C3%B5es.html#:~:text=Os%20GEE%20emitidos%20por%20ve%C3%ADculos,de%20nitrog%C3%AAnio%20e%20os%20hidroflurocarbonos.&text=Opacidade%20%2D%20Medida%20da%20impenetrabilidade%20da,de%20outros%20tipos%20de%20radia%C3%A7%C3%A3o. Acesso em: 05/08/2018.

MME. Nota informativa – Síntese RenovaBio. 2017. Disponível em:http://www.mme.gov.br/documents/10584/135676503/RENOVABIO_breve+resumo.pdf/4cc8ffe5-c517-45db-adc4-a81acd138384. Acesso em: 10/08/2018.

MORTIMER N.D., CORMACK P., ELSAYED M.A., HOME R.E., Evaluation of the Comparative Energy, Global Warming, and Socio-Economic Costs and Benefits of Biodiesel, Resources Research Unit, School of Environment and Development, Sheffield Hallam University, UK, p. 132, 2003

MUSSGNUG J.H. et al. Microalgae as substrates for fermentative biogas production in a combined biorefinery concept. Journal of Biotechnology. vol. 150. pp 51-56. 2010

MUSTAFI NN, RAINE RR, VERHELST S. Combustion and emissions characteristics of a dual fuel engine operated on alternative gaseous fuels. Fuel 2013; 109:669–78.

MUYLAERT, M. S. Consumo de energia e aquecimento do planeta – Análise do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo – MDL – do Protocolo de Quioto – Estudos de Caso. Rio de Janeiro: Editora da Coppe, 2000

NADALETI, Willian Cézar APROVEITAMENTO DE BIOGÁS, HIDROGÊNIO E GÁS DE SÍNTESE NO SETOR DE TRANSPORTE PÚBLICO E AGROINDUSTRIAL DE ARROZ: ESTUDO DE POTENCIAL ENERGÉTICO DE RESÍDUOS E EMISSÕES DE POLUENTES. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental, Florianópolis, 2017a.

NADALETI et al, Methane-hydrogen fuel blends for SI engines in Brazilian public transport: Efficiency and pollutant Emissions, International Journal of hydrogen energy, n 42, 29585-29596, 2017b.

NILRIT S., Sampanpanish P., Bualert S., “Carbon dioxide and methane emission rates from taxi vehicles in Thailand”, Carbon Management, vol. 9, pp. 37-43, 2018, DOI: 10.1080/17583004.2017.1412232.

NOTICIAS AUTOMITIVAS. Gasolina Comum ou Aditivada? Disponível em: https://www.noticiasautomotivas.com.br/gasolina-comum-ou-aditivada/#:~:text=Gasolina%20Comum%3A%20%C3%89%20um%20combust%C3%ADvel,subst%C3%A2ncias%20que%20protegem%20o%20motor.&text=Gasolina%20Aditivada%3A%20%C3%89%20composta%20por,os%20dispersantes%20removem%20essa%20sujeira. Acesso em: 10/08/2018.

OISHI Y. et al. Performance, rate of heat release, and combustion stability of dual-fuel mode in a small diesel engine. Energy Sci Eng.; vol 7, pp. 1333–1351, 2019.

ÓLEO LOCAL. Treinamento e palestras. Disponível em: http://oleolocal.com.br/portfolio/treinamento-e-palestras/. Acesso em: 04/07/2019.

ORLANDIN, F. Avaliação Do Ciclo De Vida De Unidade Produtora De Biodiesel A Partir De Óleo De Fritura. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia de Materiais – Faculdade de Engenharia, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto

Alegre, 2013. Disponível em: https://tede2.pucrs.br/tede2/bitstream/tede/3236/1/448319.pdf. Acesso em: 21/09/2019.

OTTO, H. R, LOPES, J. C. J. Estimativa Das Emissões De Ch4 Em Aterro Sanitário: O Caso Do Aterro Sanitário De Municipal De Campo Grande – MS. VIII Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. Campo Grande, MS. 2017

OWCZUK M, Matuszewska A., Kruczynsk S., Kamela W., "Evaluation of Using Biogas to Supply the Dual Fuel Diesel Engine of an Agricultural Tractor", Energies, vol. 12, Mar 2019, DOI: 10.3390/en12061071

PALANEDI T. Avaliação Do Ciclo De Vida Na Produção De Biodiesel De Dendê. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2017. Disponível em:http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/8061/1/LD_COEAM_2017_1_23.pdf. Acesso em: 12/10/2019.

PAPAGIANNAKIS, R. G.; HOUNTALAS, D. T.; Experimental investigation concerning the effect of natural gas percentage on performance and emissions of a dual fuel diesel engine; Applied Thermal Engineering; 23; pp. 353 – 365, 2003.

PAPAGIANNAKIS, R.G. AND HOUNTALAS, D.T, Combustion and Exhaust Emissions Characteristics of a Dual Fuel Compression Ignition Engine Operated with Pilot Diesel Fuel and Natural Gas, Energy Conversion and Management, vol. 45, pp. 2971-2987, 2004

PECORA, V. Implementação de uma Unidade Demonstrativa de Geração de Energia Elétrica a partir do Biogás de Tratamento do Esgoto Residencial da USP : estudo de caso. USP-PIPGE. São Paulo, 2006.

PETROBRAS. Manual de Condução Econômica. Petrobras, 2018a. Dosponível em: https://www.br.com.br/wcm/connect/1277595d-ef46-48c7-b67d-b792812abe25/apostila-conducao-economica-2018-

final.pdf?MOD=AJPERES&CVID=mgtx1tt&CVID=mgtx1tt&CVID=mgtx1tt&CVID=mgtx1tt. Acesso em: 14/12/2018.

PETROBRAS. Ficha de Informações de Segurança de Produto Químico – FISPQ, Óleo Diesel S-10 B 15 X, 2018b. Disponível em: https://www.br.com.br/wcm/connect/1f8a9394-866e-436b-9323-bc8eb0ab5e97/fispq-comb-oleodiesel-auto-oleodiesel-s10-b15-ex.pdf?MOD=AJPERES&CVID=mbeXyNp&CVID=mbeXyNp. Acesso em: 14/12/2018.

PHAN T. M., P. PHAN H. N., Biodiesel Production From Waste Cooking Oils, Egypt Chem., vol. 55, No. 5, Pp. 437–452, 2008.

PERDIGUERO, J. & JIMÉNEZ, J. L. Sell or not sell biodiesel: Local competition and government measures. Renewable and Sustainable Energy Reviews, n 15, 1525–1532, 2011.

PIACENTINI R. D., VEGA M., Comparative Analysis of the Possibility to Use Urban Organic Waste for Compost or Biogas Productions. Application to Rosario City, Argentina, World Multidisciplinary Civil Engineering-Architecture-Urban Planning Symposium – Wmcaus, vol. 245, 2017, DOI: 10.1088/1757-899X/245/5/052029

PIAN, L. C., et al. Determinação da linha de base e adicionalidade de um projeto de MDL a partir da emissão de poluentes utilizando diferentes combustíveis. Estudos Tecnológicos, vol. 5, n° 3, pp. 270-283, set/dez. 2009, doi: 10.4013/ete.2009.53.01

PREFEITURA DE MUNICIPAL DE BARRA MANSA. Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS). Barra Mansa, 2017.

PROCLIMA. Gases do Efeito Estufa e Fontes de Emissão. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/proclima/gases-do-efeito-estufa/. Acesso em: 30/08/2019.

QIAN, X., KOERNER, R. M., GRAY, D. H., Geotechnical Aspects of Landfill Desig and Construction. 1 ed. United States of America, Prentice Hall, 2002.

QUATRO RODAS. Melhor compra 2018: os melhores utilitários e picapes, 2018.

Disponível em: https://quatrorodas.abril.com.br/guia-de-compras/melhor-compra-2018-os-melhores-utilitarios-e-picapes/https://quatrorodas.abril.com.br/guia-de-compras/melhor-compra-2018-os-melhores-utilitarios-e-picapes/, 2018. Acesso em: 02/03/2019.

RAMOS A, CONTRERAS R, ARMAS O. Performance, combustion timing and emissions from a light duty vehicle at different altitudes fueled with animal fat biodiesel, GTL and diesel fuels. Applied Energy 182 (2016) 507–517.

RAMOS, L. P. et al. Tecnologias de produção de biodiesel. Revista Virtual de Química, v. 3, n. 5, p. 385-405, Out. 2011. ISSN ISSN 1984-6835.

REVISTA DO TRANSPORTE. Viação Sul Fluminense tem intervenção determinada pela Justiça Disponível em: https://revistadoonibus.com/2019/06/06/viacao-sul-fluminense-tem-intervencao-determinada-pela-justica/, 2019. Acesso em: 08/05/2019.

RIBAS et al. Influência do combustível (diesel e biodiesel) e das características da frota de veículos do transporte coletivo de Curitiba, Paraná, nas emissões de NOx. Eng Sanit Ambient. v.21 n.3. Julho/Setembro 2016.

RIBEIRO, S. K. & ABREU, A. A.Brazilian transport initiatives with GHG reductions as a co-benefit, Climate Policy, 8:2, 220-240, 2008.

ROCHA, C. M., Proposta de Implantação de um Biodigestor Anaeróbio de Resíduos Alimentares. Trabalho Final de Curso - Engenharia Ambiental e Sanitária. Universidade Federal de Juiz de Fora, 2016.

SAIDI A, Trinkl C.,Conti F., Goldbrunner M., .Karl J., Partially Upgraded Biogas: Potential for Decentralized Utilization in Agricultural Machinery, Chemical Engineering & Technology, vol. 41, pp. 2111-2119, Nov 2018, DOI: 10.1002/ceat.201800100

SAMEK, R. Avaliação Do Potencial De Biometano De Residuos Sólidos Urbanos Para Uso Em Transporte Urbano: Caso De Foz Do Iguaçu. Dissertação de Mestrado; Programa de Pós-Graduação em Bioenergia; Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2017

SANDALCI T. et al. Effect of hythane enrichment on performance, emission and combustion characteristics of an ci engine. Int J Hydrogen Energy 2019; 44: 3208–20. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.12.069.

SARKAR A, SAHA U. K. Role of global fuel-air equivalence ratio and preheating on the behaviour of a biogas driven dual fuel diesel engine. Fuel 2018; 232:743–54. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.06.016.

SHANMUGAM K., Tysklind M., Upadhyayula V. K. K., Use of Liquefied Biomethane (LBM) as a Vehicle Fuel for Road Freight Transportation: A Case Study Evaluating Environmental Performance of Using LBM for Operation of Tractor Trailers, 5th Cirp Life Cycle Engineering (Lce) Conference, vol. 69, pp. 517-522, 2018, DOI: 10.1016/j.procir.2017.11.133

SEO, E. S. M.; KULAY, L. A. Avaliação do ciclo de vida: ferramenta gerencial para tomada de decisão. InterfacEHS - Revista de Gestão Integrada em Saude do Trabalho e Meio Ambiente, v. 1, n. 1, p. 23, agosto 2006.

SILVA, E. L.; MENEZES, E. M., Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação, 4° edição, Florianópolis, UFSC, 2005.

SILVA, T R. Metodologia para a determinação teórica da potência ótima conseguida a partir da combustão do biogás gerado em aterro sanitário: Estudo de caso do aterro sanitário de Itajubá-MG. Universidade Federal de Itajubá Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia. 2012.

SISTRAN ENGENHARIA. Tecnologias Veiculares Alternativas para o Transporte Coletivo, 2014. Série Cadernos Técnicos, vol. 15, 88p.

SOARES, E. L. S. F. Estudo da Caracterização Gravimétrica e Poder Calorífico dos Resíduos Sólidos Urbanos. Rio de Janeiro. COPPE/UFRJ, 2011.

SOTI, G. de. Biogás de Digestão Anaeróbia dos Resíduos Orgânicos de restaurante universitário com efluente sanitário. Trabalho de conclusão de curso de graduação. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2014.

SOUNDARARAJAN K., THOMSON E. Asia and European transport biofuels stalled at the same place?. Asia Eur J, n 11, 247–263, 2013.

SUZUKI et al. Uso de biogás em motores de combustão interna. Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias, Guarapuava-PR, v.4, n.1, p.221–237, 2011.

TARAZONA, C. F.Estimativa de Produção de Gás em Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos. Dissertação de mestrado. UFRL/COPPE, Rio de Janeiro, 2010.

TICA et al. Test run of biodiesel in public transport system in Belgrade.Energy Policy, n 38,7014–7020, 2010.

TOLMASQUIM, M. T. Fontes Renováveis de Energia no Brasil. Rio de Janeiro, Interciência, 2003.

TRANSPORTE MUNDIAL. R 500: comparamos o consumo dos modelos 2007 e 2018. Janeiro de 2019. Disponível em: https://transportemundial.com.br/scania-r-500-consumo/. Acesso em: 30/05/2019.

USP. Estudo compara as emissões de CO_2 entre Etanol e Gasolina. Portal Biossistmas. 2010. Disponível em: http://www.usp.br/portalbiossistemas/?p=557. Acesso em: 28/07/2019.

VASQUES, T. V.Inventário de emissões veiculares no estado de Santa Catarina. 2018. 99p. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

VAZ, L. M. O. Produção de biodiesel utilizando óxido de cálcio e zirconato de sódio livre e suportado em materiais poliméricos. Dissertação (Dissertação em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, SP, p. 102. 2015.

VIAÇÃO ELITE. Disponível em: http://viacaoelite.com.br/.2019. Acesso em: 20/07/2019.

VID. Veículos elétricos podem poluir mais do que os de biometano. Associação de Engenheiros Brasil – Alemanha. Disponível em: https://www.vdibrasil.com/veiculos-eletricos-podem-poluir-mais-do-que-os-de-biometano/#:~:text=Como%20combust%C3%ADvel%20automotivo%2C%20ele%20tem,o%20biometano%20%C3%A9%20100%25%20renov%C3%A1vel. Acesso em: 30/09/2018

VOLTA REDONDA EM DESTAQUE, 2019, https://new.voltaredonda.rj.gov.br/images/Documentos/VRDestaques/2019/2019-06-21_1527.pdf).

VOLPATO, et al. Desempenho de motor diesel quatro tempos alimentado com biodiesel de óleo de soja (B 100). Ciência e Agrotecnologia, Lavras, v. 33, n. 4, p. 1125-1130, 2009.

WANG X. N., Guo M., Koppelaar R. H. E. M., van Dam K. H., Triantafyllidis C. P.; Shah N., "A Nexus Approach for Sustainable Urban Energy-Water-Waste Systems Planning and Operation", Environmental Science & Technology, vol. 52, pp. 3257-3266, Mar 2018, DOI: 10.1021/acs.est.7b04659.

WASSELL C. S. JR., DITTMER T. P. Are subsidies for biodiesel economically efficient? Energy Policy. Vol. 34, pp 3993-4001, 2006.

WILLUMSEN, H. C. "Energy recovery from land fi ll gas in Denmark and worldwide". LG Consultant, 2001.

WINSLOW K. M., Laux S. J., Townsend T. G., An economic and environmental assessment on landfill gas to vehicle fuel conversion for waste hauling operations, Resources Conservation and Recycling, vol. 142, pp. 155-166, Mar 2019, DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.11.021

WORLD BANK. Handbook for the Preparation of Landfill Gas to Energy Projects in Latin America and the Caribbean. Conestoga-Rovers & Associates .The International Bank for Reconstruction and Development. 2004

Y. LI et al. Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste. Renewable and Sustainable Energy Reviews. vol. 15, pp 821–826, 2011.

YAN, X. & CROOKES, R.J. Life cycle analysis of energy use and greenhouse gas emissions for road transportation fuels in China, Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 13, pp. 2505–2514, 2009.

YOON S.H, LEE C. S. Experimental investigation on the combustion and exhaust emission characteristics of biogas–biodiesel dual-fuel combustion in a CI engine. Fuel Process Technol 2011; 92:992–1000. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2010. 12.021.

YOUTUBE. Giro 36 Sustentabilidade - ECOÓleo - De Bem com a Natureza. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=5xwNs9GkedA. Acesso em: 21/07/2019.

ZANOLLI, P. R. Avaliação dos impactos ambientais gerados pelos automóveis na cidade de Ilha Solteira – SP. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais, 2015