

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ – UNIFEI
MESTRADO EM MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS**

**Avaliação Técnica e Econômica da Utilização de Biometano Proveniente de Aterro
Sanitário da Região Sudeste do Brasil para Abastecimento Veicular**

Sara Talita Sales Silva

Itajubá - Minas Gerais

2022

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ – UNIFEI
MESTRADO EM MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS**

Sara Talita Sales Silva

**Avaliação Técnica e Econômica da Utilização de Biometano Proveniente de Aterro
Sanitário da Região Sudeste do Brasil para Abastecimento Veicular**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciências Ambientais e Recursos Hídricos.

Área de Concentração: Meio Ambiente e Recursos Hídricos

Orientadora: Profa. Dra. Regina Mambeli Barros

Coorientador: Prof. Dr. Ivan Felipe Santos

Itajubá – Minas Gerais

2022

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ – UNIFEI
MESTRADO EM MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS**

Sara Talita Sales Silva

**Avaliação Técnica e Econômica da Utilização de Biometano Proveniente de Aterro
Sanitário da Região Sudeste do Brasil para Abastecimento Veicular**

Banca Examinadora

Profa. Dra. Regina Mambeli Barros (Orientadora)
Universidade Federal de Itajubá

Prof. Dr. Ivan Felipe Santos (Coorientador)
Universidade Federal de Itajubá

Prof. Dr. Geraldo Lúcio Tiago Filho
Universidade Federal de Itajubá

Profa. Dra. Maria Claudia Costa de Oliveira Botan
Universidade Federal do Sul da Bahia

Itajubá - Minas Gerais

2022

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Rita e Benedito, que desde que sei por mim, me incentivaram a buscar nos estudos um propósito, ao qual sigo no processo.

Aos meus irmãos, por compartilharem comigo as lembranças de nossa infância e me mostrarem o significado de “retorno”. A vida, que me trouxe pessoas as quais pude compartilhar momentos que me retificaram como pessoa. Por toda oportunidade e caminhos as quais segui com proteção e fé.

A minha orientadora, Profa. Dra. Regina Mambeli Barros, que me guiou, com paciência e respeito, nessa nova trajetória.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Ivan Felipe Silva dos Santos, responsável pela geração de questionamentos essenciais na elaboração deste trabalho.

A UNIFEI, e a todos os seus funcionários, que proporcionaram esta oportunidade de aprendizado e evolução profissional e pessoal.

RESUMO

O Brasil apresenta potencial subaproveitado para geração de biogás e biometano. O biogás pode ser utilizado para geração de energia elétrica, para aquecimento ou quando purificado em níveis adequados à legislação, dando origem ao biometano, como combustível para abastecimento veicular. A substituição de combustíveis fósseis por este tipo de combustível reduz consideravelmente as emissões de gases de efeito estufa (GEEs). Pesquisas científicas nesta área são essenciais para o desenvolvimento e ampliação do uso deste combustível no País frente as contribuições do seu uso para a qualidade ambiental e para o retardamento do aquecimento global e das mudanças climáticas, além da necessidade econômica de encontrar fontes substitutas para fontes não renováveis. O uso de biogás para geração de eletricidade é uma prática mais difundida no Brasil, entretanto, o uso do biometano como combustível veicular é uma prática mais recente e, portanto, menos estudada. Este trabalho propôs analisar a viabilidade econômica do uso de biometano produzido a partir dos consórcios de aterros sanitários existentes na Região Sudeste do Brasil, considerando o seu uso para abastecimento veicular. Foram analisadas 508 cidades distribuídas em 50 consórcios de aterros sanitários dos Estados de São Paulo, Minas Gerais, Espírito Santo e Rio de Janeiro. A viabilidade econômica foi verificada utilizando o Valor Presente Líquido (VPL) e a Taxa Interna de Retorno (TIR). Para fins de comparação, foram utilizadas duas formas distintas de cálculo para a precificação da venda do biometano; a primeira delas considerou a venda direta aos postos de abastecimento, enquanto que a segunda, considerou a venda por contrato aos mercados não térmicos. Para a primeira metodologia de precificação, dos 50 consórcios estudados, 6 não apresentaram viabilidade econômica para a comercialização de biometano veicular. Os consórcios com capacidade instalada inferior a 5.500 m³/dia foram àqueles inviáveis economicamente. A relação entre capacidade instalada e VPL encontrada foi de ordem linear, ou seja, quanto maior a capacidade instalada maior é o VPL dos projetos. Entretanto, a TIR dos projetos, a partir de um CAPEX (*Capital Expenditure*) de R\$ 20 milhões se mantém constante, cerca de 35%, independente do aumento do CAPEX. Já para a segunda metodologia de precificação, 14 dos consórcios não apresentaram viabilidade econômica para este fim, a TIR para esta precificação, se manteve constante a partir de um CAPEX de R\$ 30 milhões cerca de 20%. Verificou-se também a redução de GEEs com a substituição do volume de biometano produzido pelos consórcios de aterros, ao longo dos 20 anos adotados neste trabalho, por óleo diesel; evita-se a emissão de 29,14 trilhões de toneladas de CO₂eq.

Palavras Chave: Biometano. Abastecimento Veicular. Viabilidade Econômica.

ABSTRACT

Brazil has an underused potential for the generation of biogas and biomethane. Biogas can be used to generate electricity, for heating or, when purified at legislation's appropriate levels giving rise to biomethane, as a fuel for vehicle supply. Replacing fossil fuels with this type of fuel considerably reduces greenhouse gas (GHG) emissions. Scientific research in this area are essential for the development and expansion of the utilization of this fuel in the country in face of the contributions it brings to environmental quality and to the delay of global warming and climate change, adding also the economic need to find substitute sources for the non-renewable ones. The use of biogas for electricity generation is a more widespread practice in Brazil, however, the use of biomethane as vehicular fuel is a more recent practice and, therefore, less studied. This research proposed to analyze the economic viability of the use of biomethane produced from consortia of existing sanitary landfills in the Southeast Region of Brazil, considering its use as vehicular fuel. A total of 508 cities distributed in 50 consortia of sanitary landfills in the States of São Paulo, Minas Gerais, Espírito Santo and Rio de Janeiro were analyzed. The economic viability was verified using the Net Present Value (NPV) and the Internal Rate of Return (IRR). For comparison purposes, two different forms of calculation were used for the pricing of biomethane sales: the first one considered direct sales to gas stations, while the second considered contract sales to non-thermal markets. For the first pricing methodology, of the 50 consortia studied, seven did not present economic viability for the commercialization of vehicular biomethane. Consortia with an installed capacity of less than 5,500 m³/day were those economically unviable. The relationship between the installed capacity and NPV found is of the linear type, that is, the greater the installed capacity is, the greater the NPV of the projects. However, the IRR of the projects, starting from a CAPEX (Capital Expenditure) of R\$ 20 million, remains constant, around 35%, regardless of the increase in CAPEX. As for the second pricing methodology, 14 of the consortia did not show economic viability for this purpose, the IRR for this pricing remained constant from a CAPEX of R\$ 30 million, around 20%. There was also a reduction in GHG, over the 20 years adopted in this research, with the replacement of the volume of biomethane produced by the landfill consortia for diesel oil: the emission of 29.14 trillion tons of CO₂eq is avoided.

Keywords: Biomethane. Vehicle Supply. Economic viability.

LISTA DE SIGLAS

4 AMBIENTAL Consórcio Intermunicipal para o Desenvolvimento Ambiental

ABIOGAS Associação Brasileira do Biogás

ABNT Associação Brasileira De Normas Técnicas

ABM Biometano Adsorvido

ABRELPE Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

AMVAPA Consórcio Intermunicipal do Alto Vale do Paranapanema

ANEEL Agência Nacional de Energia Elétrica

ANP Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

BRS Bactérias Redutoras de Sulfato

CAPEX Capital Expenditure

CBM compressed biomethane

CEGÁS Companhia de Gás do Ceará

CETESB Companhia Ambiental Do Estado De São Paulo

CH₄ Metano

CIAMESF Consórcio Intermunicipal de Desenvolvimento Socioeconômico da Microrregião do Alto Médio São Francisco

CIAS CENTRO OESTE Consórcio Intermunicipal de Aterro Sanitário do Centro Oeste Mineiro

CIAS Consórcio Intermunicipal do Aterro Sanitário

CIBIOGÁS Centro Internacional de Energias Renováveis

CIBRAS Consórcio Intermunicipal de Saneamento Básico para Região do Circuito das Águas

CICANASTRA Consórcio Intermunicipal da Serra da Canastra, Alto São Francisco d Médio Rio Grande

CIDAS Consórcio Intermunicipal de Desenvolvimento Ambiental Sustentável

CIDES Consórcio Intermunicipal de Desenvolvimento Sustentável do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba

CIDSEEA Consórcio Intermunicipal Para o Desenvolvimento Socioambiental dos Municípios da Microrregião de São Lourenço

CIGEDAS Consórcio Intermunicipal de Gestão e Desenvolvimento Ambiental Sustentável das Vertentes

CIGRES Consorcio Intermunicipal Público para Gestão Integrada dos Resíduos Sólidos

CIMAJE Consórcio Intermunicipal Multifinalitário do Alto Jequitinhonha

CIMASAS Consórcio Intermunicipal dos Municípios da Microrregião do Alto Sapucaí para Aterro Sanitário

CIMFAS Consórcio Intermunicipal dos Municípios da Microrregião de Frutal para Aterro Sanitário

CIPP Consorcio Intermunicipal do Pontal do Paranapanema

CIR CENTRO SUL Consórcio Público de Gestão de Resíduos Sólidos Centro Sul

CIR NOROESTE 1 Consórcio Público de Gestão Associada e Integrada do Serviço de Limpeza Urbana e Manejo de Resíduos Sólidos – Noroeste

CIR SERRANA 1 Consórcio Público de Gestão de Resíduos Sólidos Serrana 1

CIR SERRANA 2 Consórcio Publico para Gestão Integrada e Associada de Manejo de Resíduos Sólidos Serrana 2

CIRSU VALE DO MUCURI Consórcio Intermunicipal de Resíduos Sólidos Urbanos

CISBRA Consórcio Intermunicipal de Saneamento Básico para Região do Circuito das Águas

CNM Confederação Nacional De Municípios

CO₂ Dióxido de Carbono

CODANORTE Consórcio Intermunicipal de Desenvolvimento Ambiental Sustentável do Norte de Minas

COMPARESOLURB Consórcio Médio Paraoepibano de Resíduos Sólidos Urbanos

CONCASS Consórcio Intermunicipal Para Gestão dos Resíduos Sólidos Urbanos

CONDEMAT Consórcio de Desenvolvimento dos Municípios do Alto Tietê

CONDOESTE Consórcio Público para Tratamento e Destinação Final Adequada de Resíduos Sólidos da Região Oeste do Estado do Espírito Santo

CONISUD Consórcio Intermunicipal da Região Sudoeste da Grande São Paulo

CONORTE Consórcio Público Para Tratamento e Destinação Final de Resíduos Sólidos da Região Norte do Estado do Espírito Santo

CONRESOL Consórcio Intermunicipal para Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos

CONSIMARES Consórcio Intermunicipal de Manejo de Resíduos Sólidos da Região Metropolitana de Campinas

CONSUL Consórcio Público para Tratamento e destinação Final Adequada de Resíduos Sólidos da Região Sul Serrana do Espírito Santo

COPERGÁS Companhia Pernambucana de Gás

CNTP condições normais de temperatura e pressão

CONVALE Consórcio Intermunicipal de Desenvolvimento Regional do Vale do Rio Grande

CONVALES NOROESTE DE MINAS Consórcio Intermunicipal de Saúde e Desenvolvimento dos Vales do Noroeste de Minas

COP Conferência das Partes

CORESAB BOA VISTA Consórcio Regional de Saneamento Básico

CORESAB CENTRAL DE MINAS Consórcio Regional de Saneamento Básico Central de Minas

CONTRALIX Consórcio Intermunicipal para Tratamento e Disposição Final do Lixo

CPGIRS Consórcio Público para Gestão Integrada de Resíduos Sólidos e Iluminação Pública

CPGRS Consórcio Público de Gestão de Resíduos Sólidos

DEA Dietanolamina

ECOTRES Consórcio Público Intermunicipal de Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos

EPE Empresa de Pesquisa Energética

ETE Estação de Tratamento de Esgoto

FUNASA Fundação Nacional da Saúde

GEE Gases de Efeito Estufa

GN Gás Natural

GNL Gás Natural Liquefeito

GNV Gás Natural Veicular

H₂ Hidrogênio

H₂O Água

H₂S Sulfeto de Hidrogênio

HFO Óleo de Combustível Marinho

IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ICCT International Council On Clean Transportation

IEA International Energy Agency

IMO International Maritime Organization

IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change

IRENA International Renewable Energy Agency

LBM Armazenamento Liquefeito

LGE Litros De Gasolina Equivalente

MDEA Metildietanolamina

MEA Monoetanolamina

MGO Gás Marinho

MINFRA Ministério Da Infraestrutura

MME Ministério De Minas E Energia

MP Material Particulado

Mt CO_{2eq} Milhões de Toneladas de Dióxido de Carbono Equivalente

N₂ Nitrogênio

NDC Contribuição Nacionalmente Determinada

NH₃ Amônia

O₂ Oxigênio

O&M Operação e Manutenção

OPEX Operational Expenditures

PCI Poder Calorífico Inferior

PEMAT Plano Decenal de Expansão da Malha de Transporte Dutoviário

RIDES Consórcio Intermunicipal da Região Integrada de Desenvolvimento Sustentável

RSU Resíduos Sólidos Urbanos

SIGEINRES Consórcio Intermunicipal para Gestão Integrada de Resíduos Sólidos

SINIS Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento

SLA Sistema de Lodo Ativado

SLP Sistema de Levantamento de Preços

SiO₂ sílica

TIR Taxa Interna de Retorno

UASB Upflow Anaerobic Sludge Blanket

UNIÃO DA SERRA GERAL Consórcio Intermunicipal de Desenvolvimento Sustentável da Microrregião Da Serra Geral De Minas

USEPA United States Environmental Protection Agency

VOCs Compostos Orgânicos Voláteis

VPL Valor Presente Líquido

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processos de hidrólise, acidogênese, acetogênese, metanogênese e sulfetogênese.....	22
Figura 2 - Participação no mercado de 2012 das diferentes tecnologias utilizadas para purificação do biogás.....	26
Figura 3 - Participação na geração de biogás no Brasil em 2019 por substrato.....	27
Figura 4: Evolução das plantas de biogás no Brasil.....	28
Figura 5: Disposição final de RSU por tipo e destinação em 2018 no Brasil.....	29
Figura 6 - Infraestrutura de oferta e transporte de gás natural existente, em construção e prevista.	31
Figura 7 - Mapa da Infraestrutura de Gasodutos de Transporte.	32
Figura 8: Custos de capital para plantas de produção e purificação de biogás, por tipo de matéria prima e capacidade instalada.....	38
Figura 9: Custos de capital de uma planta de biogás por capacidade instalada e tipo de matéria prima.....	39
Figura 10: Custos de produção de biometano e gás natural para o ano de 2018.....	40
Figura 11: Custos operacionais para produção de biogás por matéria-prima e capacidade da Instalada.....	41
Figura 12: Custos operacionais para purificação de biogás por tipo de tecnologia utilizada e capacidade instalada.....	42
Figura 13: Sede dos Consórcios de Aterros Sanitários Da Região Sudeste do Brasil.....	48
Figura 14: Sede dos Consórcios de Aterros Dos Estados Espírito Santo e Rio de Janeiro.....	48
Figura 15: Sede dos Consórcios de Aterros Do Estado de Minas Gerais.....	49
Figura 16: Sede dos Consórcios de Aterros Do Estado de São Paulo.....	49
Figura 17: Participação da Frota Brasileira por região em 2020.....	50
Figura 18: Frota de veículos na região sudeste em 2020.....	51
Figura 19: Participação da Frota na região sudeste em 2020.....	51
Figura 20: Fluxograma da Metodologia utilizada neste trabalho.....	52
Figura 21: Valores de investimento para conversão e tratamento de biometano.....	56
Figura 22: Projeção populacional dos consórcios de aterros do Estado de São Paulo.....	65
Figura 23: Projeção populacional dos consórcios de aterros do Estado de Espírito Santo.....	65
Figura 24: Projeção populacional dos consórcios de aterros do Estado Do Rio de Janeiro.....	66
Figura 25: Projeção populacional dos consórcios de aterros do Estado de Minas Gerais.....	66

Figura 26: Projeção populacional das cidades analisadas por Estado da Região Sudeste.....	67
Figura 27: Vazão de metano (m ³) dos consórcios de aterros do Estado de São Paulo.....	68
Figura 28: Vazão de metano (m ³) dos consórcios de aterros do Estado de Espírito Santo.....	69
Figura 29: Vazão de metano (m ³) dos consórcios de aterros do Estado Do Rio de Janeiro.....	69
Figura 30: Vazão de metano (m ³) dos consórcios de aterros do Estado de Minas Gerais.....	70
Figura 31: VPL e Capacidade Instalada dos Consórcios de Aterros Sanitários – 1º Cenário.....	71
Figura 32: VPL e Capacidade Instalada dos Consórcios de Aterros Sanitários com Capacidade Instalada Igual ou inferior a 500.000 m ³ /dia – 1º Cenário.....	72
Figura 33: Relação entre VPL e TIR com o CAPEX dos projetos das usinas de produção de biometano - 1º Cenário.....	72
Figura 34: Relação entre População do ano 2040 com o VPL e com a capacidade instalada dos projetos das usinas de produção de biometano – 1º Cenário.....	73
Figura 35: VPL e Capacidade Instalada dos Consórcios de Aterros Sanitários – 2º Cenário.....	74
Figura 36: VPL e Capacidade Instalada dos Consórcios de Aterros Sanitários com Capacidade Instalada Igual ou inferior a 500.000 m ³ /dia – 2º Cenário.....	75
Figura 37: Relação entre VPL e TIR com o CAPEX dos projetos das usinas de produção de biometano – 2º Cenário.....	75
Figura 38: Relação entre População do ano 2040 com o VPL e com a capacidade instalada dos projetos das usinas de produção de biometano – 2º Cenário.....	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Plantas de biometano em operação em 2019 no Brasil.....	28
Tabela 2: Disposição final de RSU, por tipo de destinação para os estados brasileiros.....	30
Tabela 3: Especificação do Biometano oriundo de aterros e estações de tratamento de esgoto.....	46
Tabela 4: Preço ao consumidor final (com tributos) junho, 2021.....	58
Tabela 5: Preço ao consumidor final (com tributos) do segmento automotivo dos meses de janeiro à junho do ano de 2021.....	59
Tabela 6: Série Histórica dos Preços, em R\$/MMBtu, da média ponderada dos Contratos Firmados da venda de GN por Regiões Agregadas.....	60
Tabela 7: Fatores de Conversão de alguns combustíveis para o gás natural.....	62
Tabela 8: Valores do volume produzido de biometano e sua equivalência energética em óleo diesel e das emissões de GEEs.....	77
Tabela 9: Consórcios Intermunicipais de RSU do Estado de São Paulo.....	90
Tabela 10: Consórcios Intermunicipais de RSU do Estado do Rio de Janeiro.....	92
Tabela 11: Consórcios Intermunicipais de RSU do Estado de Minas Gerais.....	93
Tabela 12: Consórcios Intermunicipais de Resíduos Sólidos Urbanos do Estado do Espírito Santo.....	97
Tabela 13: Valores encontrados para os Aterros do Estado de São Paulo para a primeira metodologia de Precificação.....	98
Tabela 14: Valores encontrados para os Aterros do Estado do Rio de Janeiro para a primeira metodologia de Precificação.....	99
Tabela 15: Valores encontrados para os Aterros do Estado do Espírito Santo para a primeira metodologia de Precificação.....	100
Tabela 16: Valores encontrados para os Aterros do Estado de Minas Gerais para a primeira metodologia de Precificação.....	100
Tabela 17: Valores encontrados para os Aterros do Estado de São Paulo para a segunda metodologia de Precificação.....	102
Tabela 18: Valores encontrados para os Aterros do Estado do Rio de Janeiro para a segunda metodologia de Precificação.....	103
Tabela 19: Valores encontrados para os Aterros do Estado do Espírito Santo para a segunda metodologia de Precificação.....	103

Tabela 20: Valores encontrados para os Aterros do Estado de Minas Gerais para a segunda metodologia de Precificação.....	104
--	-----

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
2. OBJETIVOS	20
2.1. Objetivo geral.....	20
2.2. Objetivos específico.....	20
3. REFERENCIAL TEÓRICO	21
3.1. Digestão anaeróbia.....	21
3.2. Tecnologia de produção de biogás.....	22
3.3. Tecnologias de purificação do biogás.....	24
3.3.1. Adsorção.....	25
3.3.2. Absorção.....	25
3.3.3 Permeação.....	26
3.3.4. Criogenia.....	26
3.3.5. Tecnologias mais empregadas.....	26
3.4. Potencial de biogás e biometano no Brasil em aterros sanitários de RSU.....	27
3.5. Barreiras e obstáculos para a produção e uso.....	30
3.6. Formas de armazenamento do biometano.....	33
3.6.1. Tecnologias de armazenamento subterrâneo.....	34
3.6.2. Armazenamento em tanques comprimidos.....	35
3.6.3. Armazenamento liquefeito (LBM).....	35
3.6.4. Engarrafamento.....	35
3.6.5. Biometano adsorvido (ABM).....	36
3.7. Emissões para combustíveis fósseis e biometano.....	36
3.8. Custos de produção.....	37
3.8.1. Custos de operação e manutenção.....	40
3.9. Uso do combustível em veículos terrestres e em embarcações.....	42
3.10. Legislação para produção, uso e comercialização.....	43
3.11. Cenário da região sudeste: aterros sanitários e frota de veículos.....	47
4. METODOLOGIA	52
4.1. Projeção Populacional e Geração de Biometano.....	53
4.2. Análise de viabilidade econômica.....	55
4.2.1. Investimento e Despesas.....	56

4.2.2. Receita.....	57
4.2.2.1. Precificação (1º Metodologia).....	58
4.2.2.2. Precificação (2º Metodologia).....	59
4.2.2.3. Volume útil	61
4.3. Emissões de GEEs evitadas.....	62
5. RESULTADOS.....	64
5.1 Projeção populacional.....	64
5.2. Geração de Metano.....	67
5.3. Análise de viabilidade econômica.....	70
5.1.1. 5.3.1. 1ª Metodologia de Precificação.....	70
5.1.2. 5.3.2. 2ª Metodologia de Precificação.....	73
5. 4. Emissões de GEEs evitadas.....	76
6. CONCLUSÃO.....	78
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS.....	81
APÊNDICE.....	90

1. INTRODUÇÃO

O Brasil apresenta um significativo potencial para geração de biogás e biometano, potencial este subaproveitado no país. O biogás é utilizado para geração de eletricidade, de energia térmica, energia mecânica, entre outras aplicações; já o biogás purificado (biometano) pode ser utilizado como substituto do gás natural veicular ou ser injetado diretamente na rede de gás natural (MIKI, 2018).

A limpeza do combustível consiste na remoção de impurezas, tais como, sulfeto de hidrogênio, siloxanos, água, oxigênio, nitrogênio e partículas em suspensão. Por sua vez, a purificação consiste na remoção de dióxido de carbono para aumentar o poder calorífico inferior (PCI) do combustível. O biogás em seu estado bruto apresenta uma concentração de metano entre 35 a 75% (ABATZOGLOU, 2008) e um PCI entre 5.500 a 6.500 Kcal/Nm³, o biometano apresenta um poder calorífico inferior entre 8.999 a 9.958 Kcal/Nm³ (CETESB, 2006).

No Brasil, as principais resoluções que tratam sobre o uso de biometano para abastecimento veicular são: Resolução ANP N° 8 de 2015 (BRASIL/ANP, 2015), que dispõe sobre regras de utilização e controle de qualidade do biometano oriundo de produtos e resíduos agrossilvopastoris para uso veicular, residencial e comercial; Resolução ANP N° 685 de 2017 (BRASIL/ANP, 2017), que estabelece regras para o controle dos padrões de qualidade do biometano necessárias para uso de abastecimento veicular; Resolução ANP n° 734, de 28 de junho de 2018 (BRASIL/ANP, 2018), que regulamenta a autorização para produção, operação e instalação de produtoras de biocombustíveis, dentre eles, o biometano.

Segundo informações da Associação Brasileira de Biogás (ABIOGÁS, 2019), até 2019 o Brasil possuía um potencial de geração de 84,6 bilhões de Nm³/ano, sendo que apenas 2% deste potencial eram aproveitados. Os substratos mais utilizados para obtenção de biogás são os resíduos sólidos urbanos (RSU), os efluentes de tratamento de esgoto, os resíduos agrossilvopastoris e resíduos agroindustriais. No Brasil, o substrato responsável pela maior produção de biogás é o de aterro sanitário, seguido pelo de indústria de alimentos e bebidas, suinocultura e lodo de esgoto (GARCILASSO, 2018).

Até 2021, segundo dados disponibilizados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2021), são 22 o número de usinas de geração de energia elétrica a partir de biogás de aterro sanitário, o que totaliza uma geração de 178.718,6 kW. Por sua vez, apenas 4 usinas de

geração de eletricidade são oriundas de biogás de resíduos agroindustriais, sendo responsáveis pela geração de 31. 867 kW, cerca de 15% do total gerado.

Apenas em 2017, por meio da Resolução ANP N° 685/2017 (BRASIL/ANP, 2017), que o Brasil passou a estabelecer regras para aprovação do controle da qualidade e a especificação do biometano oriundo de aterros sanitários e de estações de tratamento de esgoto (ETEs) destinado ao uso veicular. Em relação aos projetos desenvolvidos na área de biogás, há os projetos em que os RSUs são a matéria prima, os municípios são os principais desenvolvedores, enquanto que as agroindústrias são as principais desenvolvedoras de projetos rurais (OLIVEIRA et al., 2019).

No Brasil, desde a década de 1980, há a tentativa de se estimular o biometano no setor de transporte. Entretanto, ainda hoje o cenário do biometano neste setor é bem incipiente. Uma das razões para esta deficiência consiste na falta do desenvolvimento de políticas públicas, regulamentações e de incentivo ao uso de biometano, mecanismos estes que fortalecem o mercado e conseqüentemente atrai investidores (MACHADO, 2020).

No Brasil, os RSU são constituídos por aproximadamente de 52% em Matéria Orgânica (NASCIMENTO et al., 2019). Com este elevado percentual, o RSU se torna um excelente substrato para aproveitamento energético.

O Plano Nacional de Energia 2050 (BRASIL/MME/EPE, 2021), prevê a gradativa substituição do gás natural pelo biogás e biometano no cenário internacional; entretanto, no Brasil essa substituição será bem menos expressiva, dado os recursos energéticos abundantes no nosso país.

O referido plano destaca também, a necessidade da descarbonização do setor energético mundial para atendimento do Acordo de Paris 2015; para atingir tal objetivo, é necessária a criação de ferramentas que possibilite a competição de fontes renováveis com fontes não renováveis, assegurando assim, uma maior participação de fontes renováveis na matriz energética.

No tocante à questão ambiental, a substituição de combustíveis fósseis por este tipo de combustível reduz consideravelmente as emissões de gases de efeito estufa.

No Acordo de Paris, os países signatários apresentam sua Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC), O Brasil assumiu um compromisso de reduzir 37% das emissões de gases de efeito estufa em 2035 e em 43% até 2050, adotando como bases as emissões do ano de 2005 (BRASIL/MME/EPE, 2021). O referido acordo estabelece também, a expansão da participação das fontes renováveis, com exceção da hídrica, de 28% para 33%.

Considerando as contribuições do uso deste combustível para a qualidade ambiental e para o arrefecimento do aquecimento global e das mudanças climáticas, além da necessidade econômica de se encontrar fontes alternativas para fontes não renováveis, pesquisas científicas nesta área são essenciais para o desenvolvimento e ampliação deste combustível no País.

O uso de biogás para geração de eletricidade é uma prática mais difundida no Brasil; entretanto, o uso do biometano para abastecimento veicular é uma prática mais recente e, portanto, menos estudada. Nesse sentido, o presente estudo objetiva a obtenção do potencial energético pelo biometano para abastecimento veicular financeiramente viável na região Sudeste do Brasil.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

O objetivo geral da dissertação é analisar o potencial de geração de biogás dos aterros sanitários da Região Sudeste do Brasil, verificando a viabilidade econômica na utilização do combustível purificado (biometano) para abastecimento veicular, assim como os benefícios ambientais por meio da redução de emissões de GEE.

2.2. Objetivos Específico

- Calcular o potencial de geração de biogás de (consórcios para) aterros sanitários na região Sudeste do Brasil;
- Avaliar a viabilidade econômica de empreendimentos de venda de biometano para abastecimento (combustível) veicular, e quais são fatores determinantes para a viabilidade econômica;
- Calcular a redução da emissão dos GEE quando há a substituição de diesel por biometano;
- Avaliar as políticas energéticas existentes e entender o seu papel para o desenvolvimento deste combustível no País;
- Encontrar os principais obstáculos para a expansão do uso deste combustível.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. Digestão Anaeróbia

A digestão anaeróbia pode ser entendida como a degradação da matéria orgânica por microrganismos anaeróbios, podendo ocorrer por meio de processos de oxidação ou de fermentação. Na oxidação, os aceptores de elétrons são o dióxido de carbono e o sulfato (BARROS, 2013).

Os principais produtos gerados com a degradação da matéria orgânica são gás carbônico e metano. Divide-se o processo da digestão anaeróbia em cinco fases distintas: hidrólise, acidogênese, acetogênese, metanogênese e sulfetogênese (CHERNICHARO, 1997).

A hidrólise consiste na quebra de substâncias complexas, como lipídios, polissacarídeos e proteínas em substâncias solúveis e mais simples, monômeros (KUNZ et al., 2019). Conforme os autores, os microrganismos envolvidos nesta etapa são as bactérias hidrolíticas que excretam enzimas responsáveis pela quebra destas substâncias. A importância desta fase está relacionada à velocidade global da degradação, já que, com a transformação destas substâncias mais complexas em substâncias mais simples o processo tende a ocorrer mais rapidamente.

A acidogênese é a etapa posterior à hidrólise. Os produtos gerados na hidrólise são metabolizados no interior das células das bactérias fermentativas sendo transformados em ácidos orgânicos de cadeia curta, moléculas com 1 a 5 carbonos (ácidos butírico, propiônico e acético), alcoóis, óxidos de nitrogênio, sulfeto de hidrogênio, hidrogênio e dióxido de carbono. As bactérias responsáveis pela degradação nesta etapa são as anaeróbias facultativas (KUNZ et al., 2019).

Na acetogênese, os ácidos de cadeia longa são transformados em ácidos com apenas um ou dois átomos de carbono (fórmico e acético). Também, hidrogênio e dióxido de carbono são produzidos durante o processo (KUNZ et al., 2019). As bactérias responsáveis pelo processo são chamadas de bactérias acetogênicas.

Na etapa da metanogênese, os microrganismos atuantes são as arqueas metanogênicas. Elas são classificadas em arqueas metanogênicas acetoclásticas e em arqueas metanogênicas hidrogênotróficas. A primeira classe é responsável por converter acetato produzido em metano, e a segunda, por converter hidrogênio e dióxido de carbono em metano (KUNZ et al., 2019).

As arqueas metanogênicas acetoclásticas são responsáveis pela produção de 50 – 70% do total de metano gerado na degradação (IRENA, 2018).

A sulfetogênese é a produção de sulfetos por meio da redução de sulfato, sulfito e outras substâncias sulfuradas. As bactérias responsáveis por este processo são denominadas bactérias redutoras de sulfato (BRS), ou bactérias sulforedutoras. O problema é que na presença de sulfato, as BRS começam a competir com os microrganismos fermentativos, acetogênicos e metanogênicos pelos substratos disponíveis (VILELA, 2012).

A figura 1 ilustra as etapas da digestão anaeróbia supra citadas.

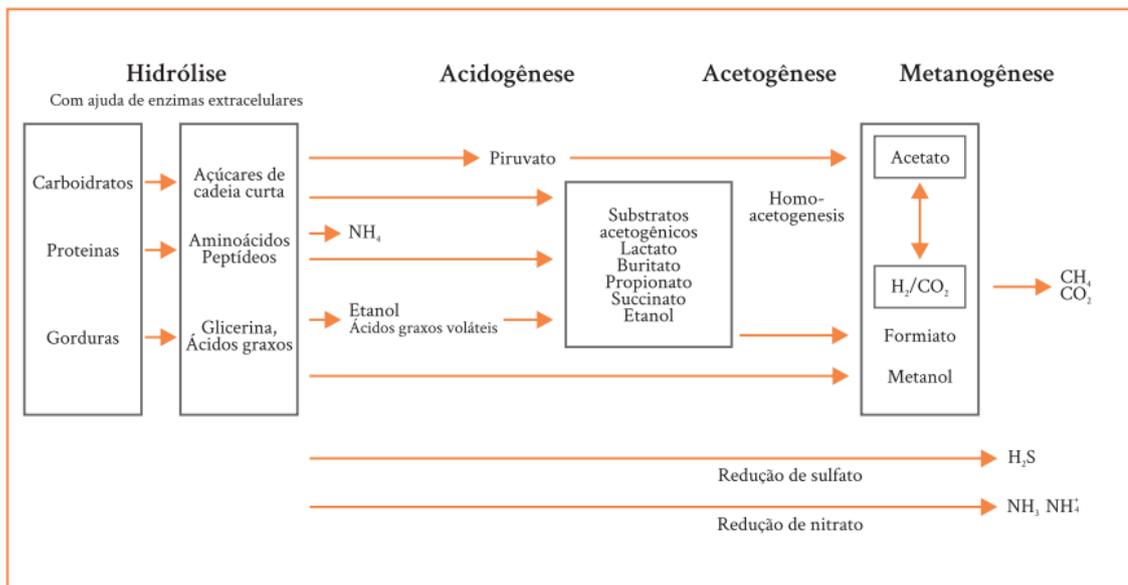


Figura 1: Processos de hidrólise, acidogênese, acetogênese, metanogênese e sulfetogênese.
Fonte: KUNZ et al., 2019.

3.2. Tecnologia de Produção de Biogás

Dependendo do tipo de substrato utilizado para obtenção de biogás, a tecnologia utilizada para a sua produção será diferenciada. Os substratos mais comumente utilizados são os efluentes líquidos urbanos, RSU, os resíduos rurais e os resíduos agroindustriais.

As tecnologias mais encontradas para obtenção do biogás são os biodigestores. Na literatura, os mais encontrados são do tipo Indiano, Chinês, Canadense e por Batelada. Os biodigestores consistem em uma câmara fechada, alimentado por um efluente, geralmente doméstico, onde os microrganismos anaeróbios são responsáveis pela degradação da matéria orgânica existente no efluente. Esse processo de digestão gera dois subprodutos: o biogás é o biofertilizante. O biodigestor por batelada é constituído por um reservatório que armazena a

biomassa por um determinado tempo, e por uma câmara (gasômetro) que armazena o biogás produzido.

Outra forma de obtenção de biogás dá-se com os aterros sanitários. Geralmente, os aterros sanitários são impermeabilizados com o uso de camadas de argila e geomembranas de polietileno de alta densidade para que não ocorra a contaminação do lençol freático pelo chorume e como requisitos normativos e de legislação ambiental.

No projeto e operação de aterros sanitários, ainda que sem o aproveitamento energético de biogás, segundo as normas NBR 8419 (ABNT, 1992) que dispõe sobre a Apresentação de Projetos de Aterros Sanitários de Resíduos Sólidos Urbanos e NBR 13.896 (ABNT, 1997), que dispõe sobre Aterros de Resíduos Não Perigosos - Critérios para Projeto, Implantação e Operação, deve haver a previsão e instalação de drenos para o biogás a ser queimado.

Em aterros sanitários com aproveitamento energético do biogás, algumas alterações devem ser feitas. Para extração de biogás em aterros sanitários, utilizam-se os seguintes dispositivos: drenos horizontais e verticais, sopradores, filtros e tanques separadores de condensado (desumificador). O tipo de dreno escolhido para remoção do biogás depende das especificidades do aterro. O método mais comum é o dreno vertical (TERRAZA e WILLMUMSEN, 2009). Conforme supracitado, a norma vigente nacional já estabelece a necessidade de instalação de tubulação para coleta do gás, cada tubulação lateral é conectada a um coletor principal.

Segundo Garcilasso (2018), o processo de extração do biogás em aterros sanitários apresenta uma eficiência entre 40 a 60% do gás. Segundo publicações da United States Environmental Protection Agency (USEPA), a eficiência pode chegar a 75% (USEPA, 2008). Para Silva et al (2013), a eficiência de captação para os aterros estudados em seu trabalho chegou a 56 e 63%. O principal motivo para estas variações é a fuga de metano pela superfície do aterro (SILVA et al., 2013).

As ETEs também possibilitam a produção de biogás. Os modelos de tratamento mais utilizados são: as lagoas anaeróbias, onde o tratamento é realizado predominantemente por processos de fermentação anaeróbia e por meio do *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB), sendo este o modelo mais difundido no Brasil. (GARCILASSO, 2018). Ou ainda, pela digestão anaeróbia de lodos oriundos de Sistemas de Lodos Ativados (SLA).

O biogás e o biometano são utilizados como recurso energético devido à sua composição química, em especial pela sua elevada concentração de metano. Nurhadia (2013) estabeleceu uma relação entre o volume necessário de combustível para cada quilometro percorrido. O valor

estipulado foi de 0,57 Nm³/km. Para fins de comparação, a autora também fornece valores para o diesel e biodiesel, sendo 0,45 litros/km e 0,5 litros/km, respectivamente.

A escolha da tecnologia adotada para geração de biogás/biometano depende dos seguintes fatores: densidade geográfica, quantidade e disponibilidade da matéria prima utilizada. Estes fatores interferem também na escala de produção do combustível (OLIVEIRA et al., 2019).

A utilização de resíduos agrosilvopastoris geralmente está associada a uma pequena ou escala de produção, enquanto que a de resíduos industriais a escalas maiores (OLIVEIRA et al., 2019).

Já a geração de biogás por meio de RSUs depende do número de habitantes, das concentrações de resíduos e da infraestrutura disponível, como os projetos de saneamento e resíduos (OLIVEIRA et al., 2019).

Entretanto, devido à composição do biogás proveniente de aterros sanitários, como a presença de nitrogênio de difícil separação, a utilização deste gás para abastecimento veicular é menos favorável em relação ao biometano formado a partir de outros substratos (AHMAN, 2010).

3.3. Tecnologias de Purificação do Biogás

A limpeza do biogás consiste na remoção das impurezas presentes no combustível, tais como: sulfeto de hidrogênio, siloxanos, água, oxigênio, nitrogênio e partículas em suspensão. A concentração e presença destas substâncias dependem do tipo de matéria prima utilizada para produção de biogás e também, do processo e tecnologia utilizada para a sua geração. Já a purificação do combustível, consiste na remoção do dióxido de carbono presente a fim de aumentar o PCI do biogás.

O biogás é constituído em média de 35-65% de metano (CH₄), em 15-40% de dióxido de carbono (CO₂) e em menores concentrações, cerca de 5 ppm, por outras substâncias, como água, nitrogênio e compostos aromáticos, como sulfeto de hidrogênio (BARROS et al., 2018). O combustível apresenta em sua constituição impurezas como sulfeto de hidrogênio (H₂S), amônia (NH₃), siloxanos, oxigênio (O₂), nitrogênio (N₂), compostos orgânicos voláteis (VOCs, em inglês), água (H₂O) e hidrogênio(H₂). O nível de limpeza e purificação destas impurezas dependerá do uso final do combustível. A importância de remoção destas impurezas consiste em aumentar o PCI do biogás, e conseqüentemente, aumentar a sua densidade energética (AXELSSON et al., 2012).

A presença destas impurezas também pode danificar e corroer, no caso da utilização deste combustível para geração de energia, os equipamentos, máquinas e motores essenciais para a geração de energia elétrica.

As tecnologias de purificação do biogás incluem absorção física e química, adsorção, separação por membrana e separação criogênica. Podem ser incluídos também, processos biológicos; entretanto, o nível de desenvolvimento no mercado é inferior para estas outras tecnologias (BUDZIANOWSKI et al., 2017).

Dentre as tecnologias de purificação do biogás, podem ser citados como processos consolidados os de adsorção e de absorção. Como processos não consolidados, podem ser mencionados os de permeação e criogenia (BORSCHIVER et al, 2014).

3.3.1. Adsorção

A adsorção é uma tecnologia amplamente aplicada, que se fundamenta nas diferentes capacidades de equilíbrio das substâncias em uma superfície sólida a uma dada pressão (TUINIER et al., 2012). Os materiais adsorventes mais comumente utilizados são: carvão ativado e peneiras moleculares (zeólitas). Na adsorção, é necessário que ocorra um pré-tratamento do gás, como a dessulfurização, resfriamento e remoção de água (PRUSSI et al., 2019).

3.3.2. Absorção

Processo que se fundamenta na diferença de solubilidade entre o metano e dióxido de carbono. As tecnologias existentes que se utiliza deste princípio são (PRUSSI et al., 2019):

- Lavagem com água (*Water scrubbing*): consiste na utilização de água para absorção de dióxido de carbono em condições de baixas temperaturas e altas pressões. Neste processo, não é necessária realizar tratamentos prévios (BORSCHIVER et al., 2014).
- Lavagem física com solvente orgânico (*organic physical scrubbing*): consiste na utilização de um reagente orgânico, como por exemplo, polietileno glicol para a absorção de dióxido de carbono. Durante o processo, outras impurezas como H_2S , NH_3 e H_2O , também são removidas; porém, estas substâncias devem ser retiradas antes da extração do dióxido de carbono (BORSCHIVER et al, 2014).
- Lavagem química (*chemical scrubbing*): consiste na utilização de solventes baseados em aminas, como por exemplo, monoetanolamina (MEA), dietanolamina (DEA) e metildietanolamina (MDEA). Apresenta uma alta eficácia, mantendo a concentração de

metano no gás de saída de aproximadamente, 99% (PRUSSI et al., 2019, BORSCHIVER et al., 2014).

3.3.3 Permeação

Este processo consiste na utilização de membranas e nas diferentes permeabilidades das substâncias contidas no biogás. Desta forma, os elementos menos permeáveis ficam retidos na membrana. Existem duas tecnologias que se utilizam deste conceito: separação a alta pressão e a adsorção gás-líquido (KUNZ et al., 2019, BORSCHIVER et al., 2014).

3.3.4. Criogenia

Este processo se fundamenta na diferença entre o ponto de congelamento do metano (-161°C) e do dióxido de carbono ($-78,5^{\circ}\text{C}$), resfriando o biogás até a temperatura de congelamento do dióxido de carbono, condensando-o. O gás de saída apresenta uma concentração em 99% de metano, apresentando um custo elevado (BUDZIANOWSKI et al., 2017).

3.3.5. Tecnologias mais empregadas

Segundo informações disponibilizadas pela Agência Internacional de Energia (IEA, 2014) e como pode ser visto na figura 2, os processos de limpeza e purificação mais utilizados no mercado, até 2012, são os de lavagem por água, seguida pelo de lavagem química, pelo de adsorção, por membranas, por lavagem física com solvente orgânico e por último, pelo de criogenia. Assim sendo, cerca de 68% dos processos utilizados consistem em tecnologias de adsorção, 21% por absorção, 10% por membrana e apenas 0,4% por criogenia.

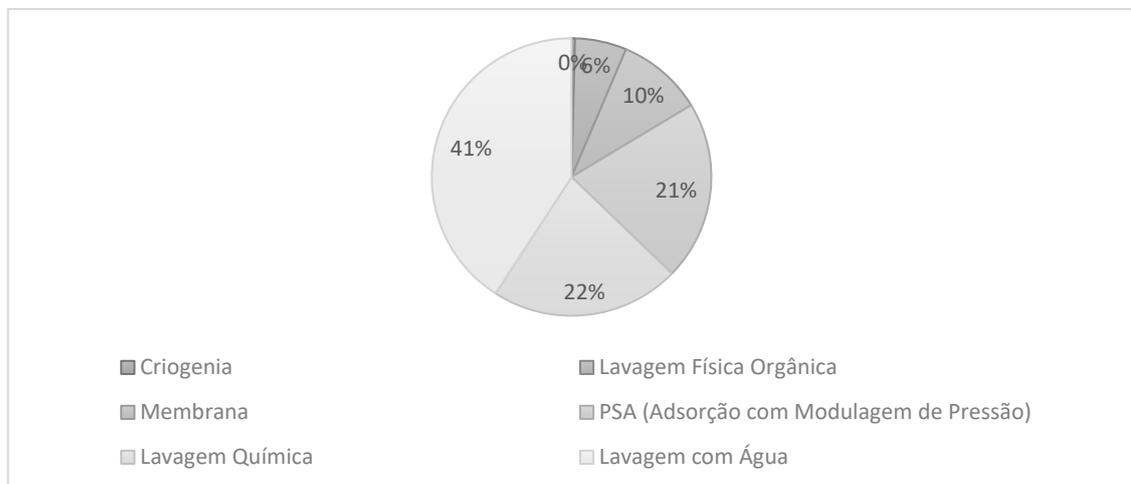


Figura 2: Participação no mercado de 2012 das diferentes tecnologias utilizadas para purificação do biogás.
Fonte: Adaptado de IEA, 2014.

3.4. Potencial de Biogás e Biometano no Brasil em Aterros Sanitários de RSU

Segundo informações do Centro Internacional de Energias Renováveis (CIBIOGÁS), em 2019 o número de usinas de biogás em operação, em implantação e em reformulação eram de 521, 15 e 12, respectivamente.

Das 521 unidades, 416 utilizam como substrato dejetos agropecuários; 43 utilizam RSU ou efluentes das ETEs e 62 utilizam efluentes industriais.

O total de produção foi de 1.345.498.670 Nm³/ano, sendo a geração por meio do aproveitamento energético de RSU e de ETEs as que mais contribuíram para este valor, cerca de 76,3% do total, seguida pelo setor de agropecuária, com 12,3% e por último, pelo setor industrial com 11,4%, o que correspondeu a uma produção de 1.026.527.529 Nm³/ano, 165.112.571 Nm³/ano, 153.858.569 Nm³/ano, respectivamente. Esta proporção pode ser vista na figura 3.

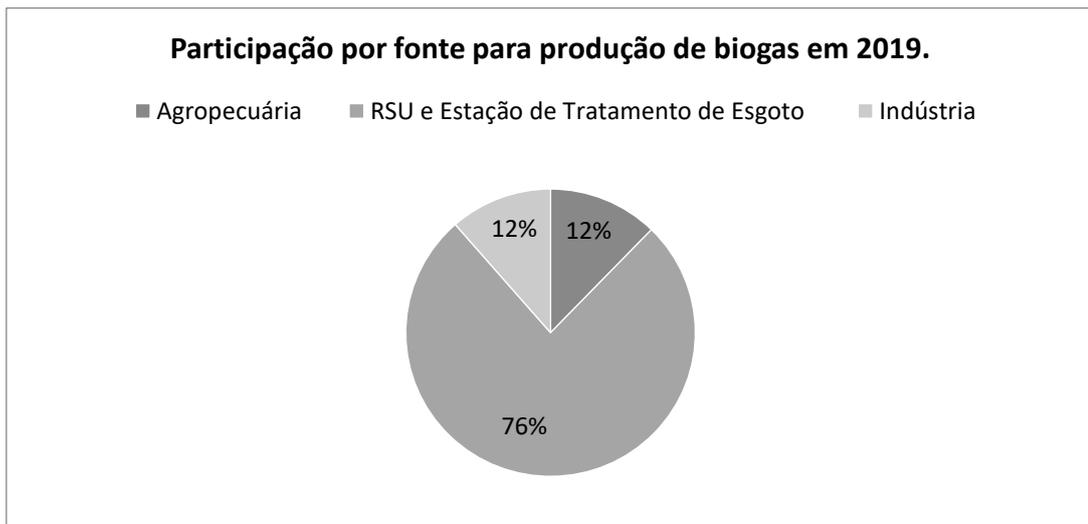


Figura 3: Participação na geração de biogás no Brasil em 2019 por substrato.
Fonte: CIBIOGÁS, 2020.

Deste volume de biogás gerado, 86% são utilizados para geração de eletricidade, 10% para geração de energia térmica, 3% na geração de biometano e 1% na geração de energia mecânica.

Existem 06 plantas de produção exclusiva de biometano e 03 plantas que utilizam o excedente de biogás gerado para produção de biometano (CIBIOGÁS, 2020). A tabela 1 fornece maiores informações sobre as plantas produtoras de biometano no país.

Tabela 1: Plantas de biometano em operação em 2019 no Brasil.

	Município	Estado	Fonte de Substrato	Ano de início da operação	Produção de biogás (Nm ³ /ano)
Plantas de biogás que produzem biometano como aplicação energética principal.	São Pedro da Aldeia	RJ	RSU	2015	5.840.000
	Patos de Minas	MG	Agropecuária	2016	127.750
	Foz do Iguaçu	PR	RSU	2017	189.800
	Fortaleza	CE	RSU	2017	31.025.000
	Concórdia	SC	Agropecuária	2018	9.125
	Franca	SP	ETE	2018	912.500
Plantas de biogás que produzem biometano como aplicação secundária.	Montenegro	RS	Indústria	2011	3.650.000
	Castro	PR	Agropecuária	2013	438.000
	Seropédica	RJ	RSU	2018	52.560.000

Fonte: Adaptado de CIBIOGÁS, 2020.

A figura 4, extraída de CIBIOGÁS (2020), demonstra a evolução expressiva na produção de biogás no Brasil nos últimos 15 anos. Nota-se que maiores crescimentos entre os anos de 2007 a 2008, de 2014 a 2015 e de 2018 a 2019. De 2014 para 2015, o crescimento foi de 65% no volume de biogás. Já entre 2018 para 2019, o índice de crescimento foi de 36%

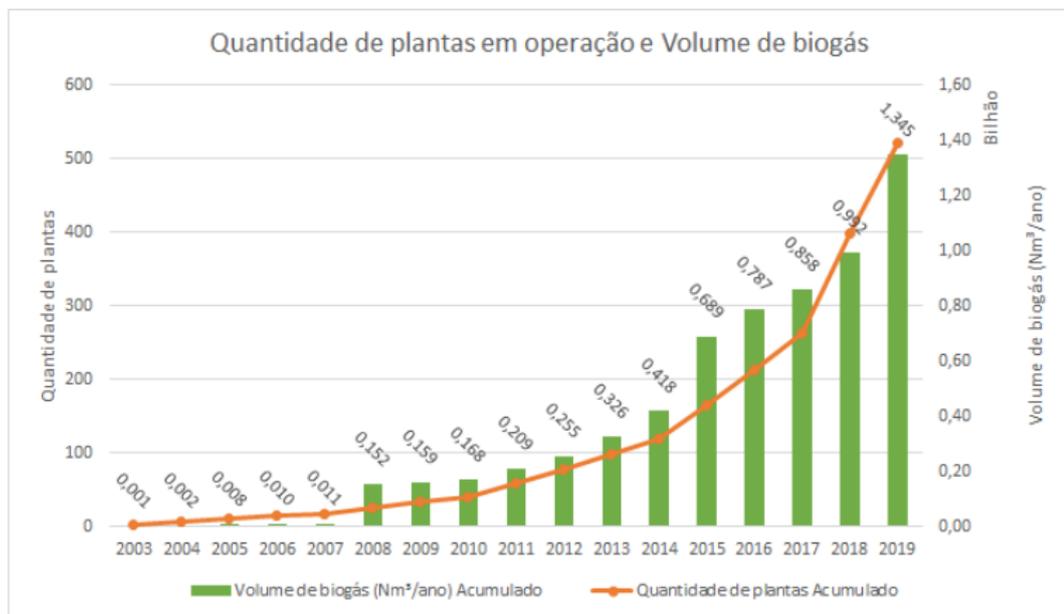


Figura 4: Evolução das plantas de biogás no Brasil.
Fonte: CIBIOGÁS (2020).

Do total de plantas em operação no Brasil em 2019, 78%, ou seja, 408 plantas são classificadas como de pequeno porte, produzindo até 1 milhão Nm³/ano. Entretanto, a sua capacidade de produção equivale a 9% do total produzido. As plantas de médio porte correspondem a 16% (83) do total de plantas, e a 14% do total gerada (CIBIOGÁS, 2020).

As plantas de grande porte (capacidade superior a 5.000.000 Nm³/ano) correspondem a uma participação de 6% do total de plantas instaladas, e a 77% do total produzido (CIBIOGÁS, 2020).

Segundo dados disponibilizados em ABIOGÁS (2022) o potencial de produção de biogás, no Brasil é de 44,1 bilhões de Nm³/ano, sendo 21,1 bilhões provenientes do setor sucroenergético, 6,6 bilhões do setor de produção agrícola, 14,2 do oriundo de proteína animal e 2,2 bilhões do setor de saneamento; para a Região Sudeste o potencial de produção de biogás, para estes setores, correspondem à 64%, 11%, 14,2% e 50% do potencial brasileiro, respectivamente (ABIOGÁS, 2022).

Segundo informações da ABRELPE (2020), no Brasil, em 2018, foram gerados 79 milhões de RSU, deste total, 92% foram coletados. Do total coletado, 59,5%, 43,3 milhões de toneladas receberam a destinação adequada em aterros sanitários. O restante, 29,5 milhões de toneladas de RSU foram despejados em locais inadequados como em lixões ou em aterros controlados. Há que se ressaltar que a disposição inadequada em lixões ou aterros controlados são objeto de proibição pelo Art. 47 da Política Nacional de Resíduos Sólidos, instituída pela lei federal no 12305/2010 (Brasil, 2010) e regulamentada pelo decreto federal 10.936/2022 (BRASIL, 2022). A figura 5 ilustra disposição final de RSU, por tipo de destinação.

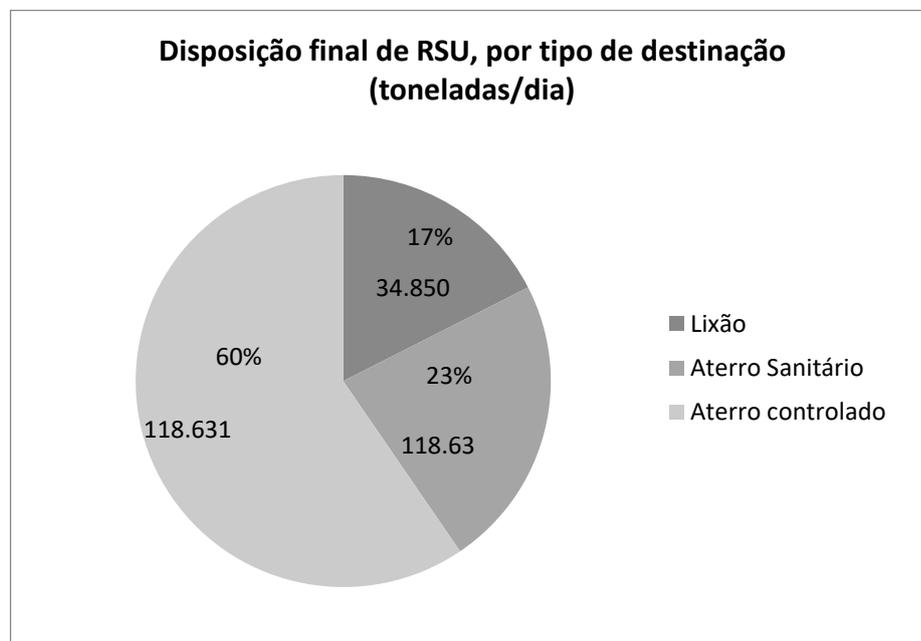


Figura 5: Disposição final de RSU por tipo e destinação em 2018 no Brasil.

Fonte: ABRELPE, 2020.

Como pode ser observada na tabela 2, a região que apresenta um melhor índice de destinação adequada de seus RSU é a região Sul, com uma porcentagem de 87,3%. Em seguida, vem à região Sudeste, com 49,2% do seu RSU destinada a aterros sanitários; região Centro Oeste com 34,7%, região Nordeste com 25,3% e por último a região Norte, com 20,7%.

Tabela 2: Disposição final de RSU, por tipo de destinação para os estados brasileiros.

Disposição Final	Norte		Nordeste		Centro-oeste		Sudeste		Sul	
	Ton./ano	Porcentagem (%)	Ton./ano	Porcentagem (%)	Ton./ano	Porcentagem (%)	Ton./ano	Porcentagem (%)	Ton./ano	Porcentagem (%)
Aterro Sanitário	93,0	20,7	454,0	25,3	162,0	34,7	820,0	49,2	1040,0	87,3
Aterro Controlado	110,0	24,4	496,0	27,6	152,0	32,5	641,0	38,4	109,0	9,2
Lixão	247,0	54,9	844,0	47,0	153,0	32,8	207,0	12,4	42,0	3,5
Total	450,0	100,0	1794,0	100,0	467,0	100,0	1668,0	100,0	1191,0	100,0

Fonte: ABRELPE, 2020.

3.5. Barreiras e Obstáculos para a Produção e Uso

As principais barreiras encontradas para disseminação do biometano em nível global são: custos elevados, quando comparados com o custo dos combustíveis fósseis; falta de segurança nas estruturas regulatórias, não gerando confiança para novos investidores apostarem no setor; existência de monopólios no setor energético; ausência de regulação bem definidas para as redes de gás, ausência de infraestrutura de gás natural veicular (GNV) (IRENA, 2018). Segundo Nevzorova et al. (2019), as barreiras enfrentadas pelo setor de biogás e biometano são divididas em barreiras técnicas, econômicas, de mercado, institucionais, sociocultural e ambiental.

As principais barreiras técnicas são as relacionadas à infraestrutura, como o reduzido número de postos de abastecimento ou de redes de gás natural, sendo que alguns países ainda sofrem com falta de matéria-prima para produção de combustível. A instalação e operação destas usinas requerem mão de obra qualificada, aumentando a dificuldade de seu estabelecimento (IRENA, 2018).

A malha nacional de gasodutos de transporte registra atualmente uma extensão total de 9.409 km, distribuídos por todas as regiões brasileiras (MME/EPE, 2021). De acordo com a

figura 6, apresentam-se a infraestrutura de processamento e transporte de gás natural existente e em construção no Brasil, assim como os terminais de regaseificação de GNL em operação e previstos. Em MME/EPE (2021), ressalta-se que as malhas do Nordeste e do Sudeste, assim como os gasodutos GASBOL e Uruguaiana-Porto Alegre (trecho 3), são interligados e fazem parte da malha integrada. E, está atualmente, em processo de construção, a Unidade de Processamento de gás natural do Polo Gaslub Itaboraí (no Rio de Janeiro).

A Empresa de Pesquisa Energética (MME/EPE, s.d.) disponibilizou o Mapa da Infraestrutura de Gasodutos de Transporte de Gás Natural no Brasil (Figura 7), versão digital que torna possível observar um panorama da infraestrutura de oferta de gás natural, além dos Blocos de Exploração até a ocasião da 13ª Rodada de Licitações da ANP, e dos campos produtores de Óleo e Gás (O&G) relevantes para o planejamento setorial. São apresentados no referido Mapa também, os gasodutos que haviam recebido Autorização de Construção ou ainda, se encontravam em processo de Licenciamento Ambiental na data da publicação da Lei nº 11.909, de 4 de março de 2009, assim como aqueles estudados no Plano Decenal de Expansão da Malha de Transporte Dutoviário (PEMAT).

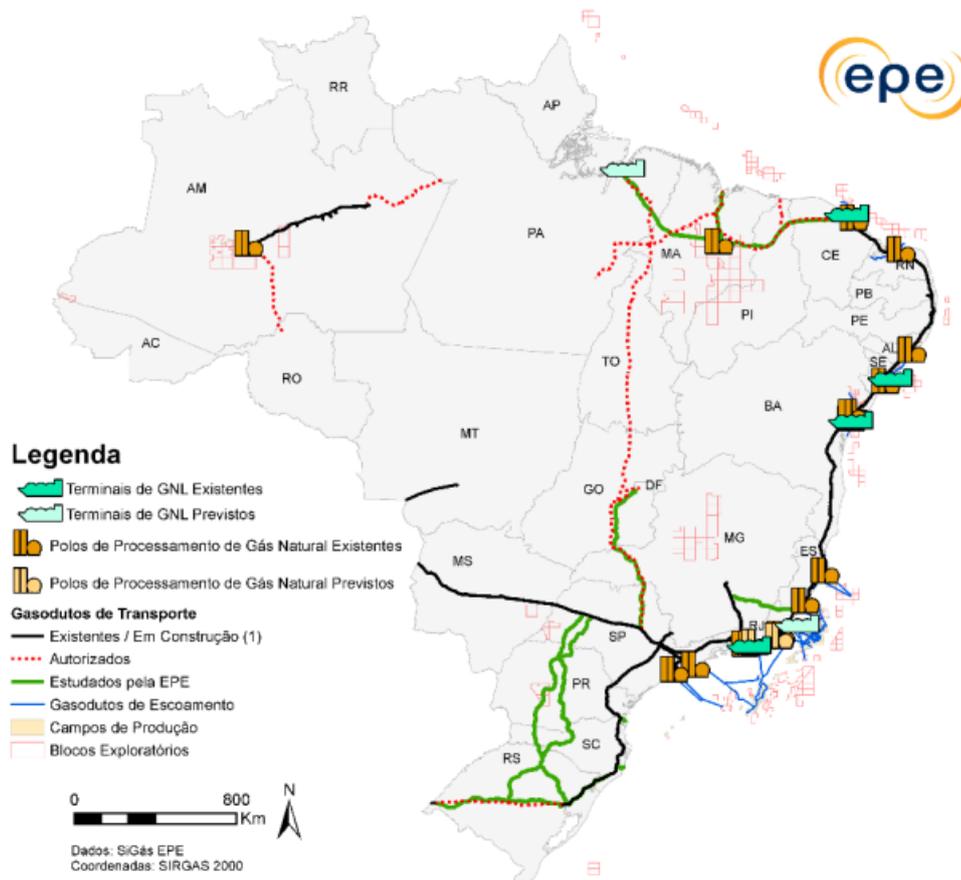


Figura 6 - Infraestrutura de oferta e transporte de gás natural existente, em construção e prevista.
Fonte: MME/EPE (2021).

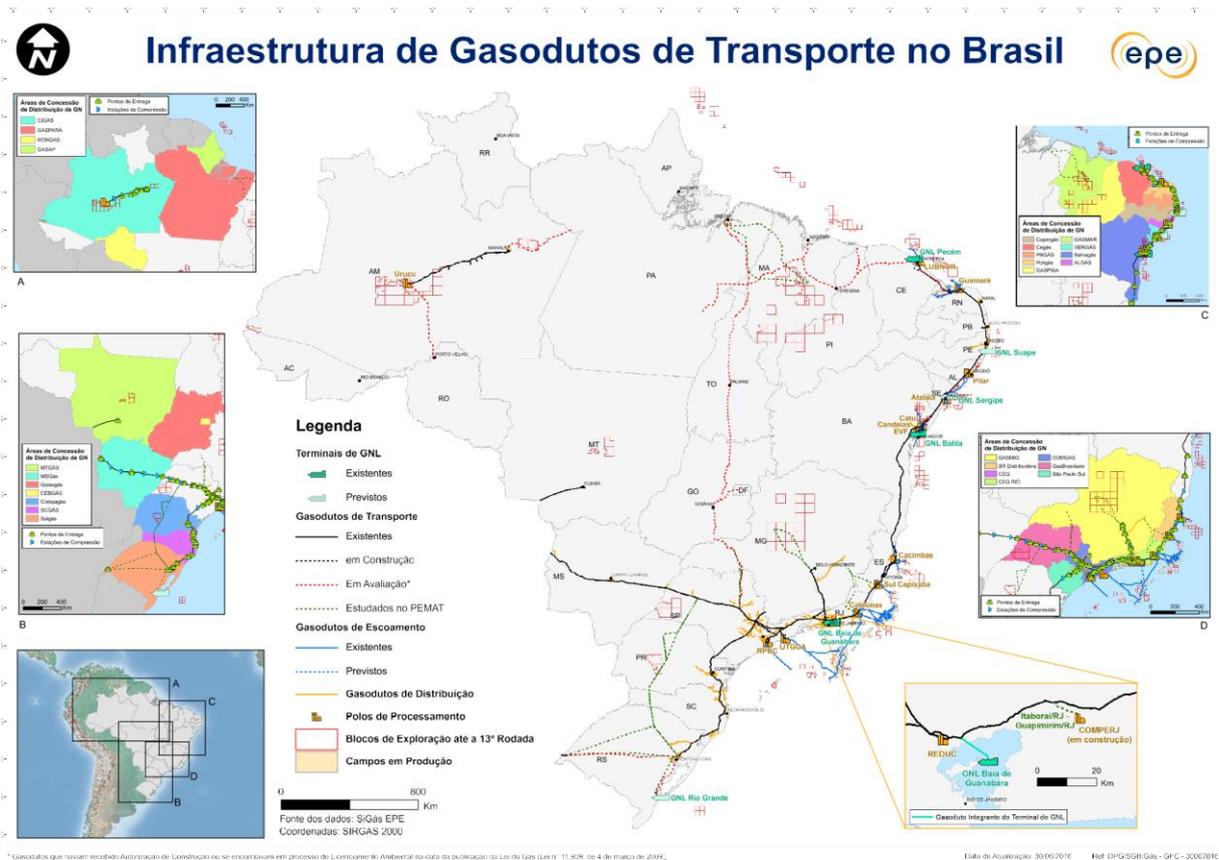


Figura 7 - Mapa da Infraestrutura de Gasodutos de Transporte.
Fonte: MME/EPE (s.d.).

O custo de instalação de uma usina de produção e purificação do biogás é muito elevado, dependendo do tipo de matéria prima utilizada para geração, o custo de operação também se torna substancialmente impactante para a viabilidade do projeto (IRENA, 2018). A principal barreira de mercado está relacionada a inferioridade do preço dos combustíveis fósseis quando comparadas ao preço do biometano. O preço do biometano deve ser competitivo no mercado para que aumente a sua expansão (NEVZOROVA et al., 2019).

O uso do biometano para abastecimento compete ainda, com os veículos movidos a eletricidade. Estudos apontam que a população tende a preferir veículos elétricos a veículos a GNV, pois se sentem inseguros em relação à infraestrutura disponibilizada para atendimento do biometano (NEVZOROVA et al., 2019).

Para as barreiras institucionais, destaca-se a falta de apoio político para implantação dos projetos, dificuldade em obtenção de financiamentos ou até mesmo, precariedade em políticas de incentivo ao seu uso (NEVZOROVA et al., 2019). A barreira sociocultural está relacionada à falta de conhecimento por parte da população sobre o uso de combustível. Esta falta de conhecimento gera uma descrença na capacidade de produção e de utilização do combustível (NEVZOROVA et al.,).

A barreira ambiental encontrada diz respeito à alta demanda de água para produção do combustível quando a matéria-prima utilizada são dejetos de animais. Isso se explica pelo fato de que, na digestão anaeróbia deste material, a proporção entre água e substrato é de 1:1. Outro problema encontrado é na possibilidade de vazamentos de GEE devido a negligência ou falhas no projeto (NEVZOROVA et al., 2019).

Além das barreiras já citadas, o Brasil apresenta outros empecilhos para o desenvolvimento do setor no país, como (MCID, 2016):

- O elevado custo de instalação dos projetos de biogás e biometano, graças à incipiência do mercado, aliado a incerteza do benefício comercial;
- A reduzida quantidade de empreendimentos bem sucedidos e que sirvam de exemplo para outros empreendedores;
- Dificuldade de acesso a informações a respeito das tecnologias do mercado, além disso, este setor tende a não compartilhar as experiências e resultados positivos ou negativos adquiridos;
- Falta de um amparo legal na forma de instrumentos regulatórios, como marco regulatório, licenciamentos ambientais, linhas de financiamento, incentivos fiscais e tributários e leilões de energia especiais a esta fonte a existência destes instrumentos podem fortalecer o mercado e impulsionar a criação de novos projetos.

3.6. Formas de Armazenamento do Biometano

A utilização e produção de biometano para utilização no setor de transportes está concentrado principalmente na Europa, em especial na Suécia, Suíça, o Holanda e Alemanha (SCARLAT et al., 2018).

Atualmente, as formas de armazenamento de biometano existentes no mercado se dão por meio de dutos de canalização, reservatórios subterrâneos, tanques comprimidos, armazenamento liquefeito, engarrafamento, armazenamento adsorvido e armazenamento por conversão física ou química (BUDZIANOWSKI et al., 2017, AHMAN, 2010). Preferencialmente, o biometano deve ser utilizado na sua forma natural a fim de se evitar as perdas de energia com os processos de conversão. Podem ser citados como os principais desafios encontrados no armazenamento do biometano: a imprecisão dos dispositivos de monitoramento utilizados para determinação do nível do reservatório; fluxos variados no abastecimento do combustível nas redes de gás natural, prejudicando assim a operação do

sistema; e a necessidade de priorizar a segurança destas estações pelos riscos de explosões associadas à inflamabilidade do gás (BUDZIANOWSKI et al., 2017).

Para utilização do biometano como combustível veicular, este deve ser comprimido a uma pressão de 200 bar (MCID, 2016). O abastecimento pode ocorrer de forma lenta ou de forma rápida. Na forma lenta, não é necessário se preocupar com a pressão de entrada; porém, o tempo decorrido para o abastecimento é superior ao da forma rápida, levando algumas horas. O abastecimento de forma rápida acontece em alguns minutos, cerca de 5 minutos (BUDZIANOWSKI et al., 2017). Na forma rápida, o abastecimento depende de manter uma pressão específica nos tanques do posto de abastecimento, o custo para este tipo de abastecimento é superior ao de abastecimento lento e também, é necessário equipamentos mais sofisticados (MCID, 2016).

Em regiões possuidoras de gasodutos instalados, o transporte de biometano por esta via se apresenta mais viável economicamente, pois o custo de investimento seria relativamente baixo e a eficiência energética encontrada é bem elevada, sendo inclusive considerado mais eficiente do que o transporte de eletricidade em cabos de alta tensão (BUDZIANOWSKI et al., 2017). Um problema encontrado com a utilização dos gasodutos já existentes reside na necessidade de negociação para a sua utilização com o proprietário da malha de gasodutos, podendo ser empresa pública ou privada. Para que o biometano possa ser transportado pela rede de gás natural já existente, o combustível deve atender aos parâmetros de qualidade do gás natural utilizado (MCID, 2016b).

O custo de implantação de uma rede de gás é dependente da distância da usina de purificação até o centro de distribuição, do tipo de material utilizado para a construção do gasoduto, das condições do solo, entre outros. O biometano pode ser injetado nas redes em diferentes níveis de pressão, para pressões mais baixas o consumo de energia e o custo são relativamente mais baixos (BUDZIANOWSKI et al., 2017).

3.6.1. Tecnologias de Armazenamento Subterrâneo

Os tipos de reservatórios encontrados são: antigos reservatórios de gás e petróleo (armazenamento), cavernas de sal e aquíferos (BUDZIANOWSKI et al., 2017).

Armazenamentos porosos geralmente são encontrados em profundidades de até 2.700 m, onde o gás é armazenado nas fissuras das rochas. Nos armazenamentos em cavernas, por sua vez, é construído o reservatório artificialmente (BUDZIANOWSKI et al., 2017).

Destas opções, a que apresenta maior vantagem são as cavernas de sal, já que, neste modelo consegue-se injetar e retirar o combustível mais rapidamente no que nas outras duas,

apresentando assim, uma dinâmica operacional mais favorável. O armazenamento em aquíferos apresenta com desvantagens o baixo conhecimento geológico e estrutural dos aquíferos, baixa estanqueidade e dificuldade na injeção/retirada do combustível, diminuindo a rotatividade da operação (BUDZIANOWSKI et al., 2017).

3.6.2. Armazenamento em Tanques Comprimidos

Consistem em recipientes em que o gás é pressurizado e injetado. A vantagem deste tipo de armazenamento é a facilidade do deslocamento. Neste caso, o biometano é comprimido a pressões acima de 200 bar e armazenado (MCID, 2016). Os tipos encontrados destes tanques são os tanques esféricos, cilíndricos ou tubulares. Os tanques esféricos suportam uma pressão de até 10 bar, enquanto que os tubulares suportam uma pressão de até 100 bar; portanto, este último apresenta uma maior capacidade de armazenamento. São necessários equipamentos de segurança nestes tanques como discos de ruptura e válvulas de alívio de pressão. O principal custo associado a este tipo de armazenamento é o compressor utilizado para compressão do gás a uma pressão adequada (BUDZIANOWSKI et al., 2017).

3.6.3. Armazenamento Liquefeito (LBM)

Esta forma de armazenamento consiste na liquefação do biometano, por meio do seu resfriamento em que o gás a pressão atmosférica vai para uma pressão de aproximadamente 111K (BUDZIANOWSKI et al., 2017). O volume ocupado pelo combustível na forma líquida ocupa um lugar de aproximadamente 1/6.000 do volume no estado gasoso. Esta forma de armazenamento é mais segura em relação ao gás comprimido, já que não apresenta risco de explosões.

O LBM é comumente utilizado para abastecimento de embarcações. A infraestrutura necessária para este tipo de armazenamento constitui-se em uma planta de liquefação, os tanques de armazenamento e um aparelho para regaseificação. Este tipo de armazenamento é mais indicado para um consumo de curto prazo, não para estocagem do produto, sendo ideal para atendimento do setor de transportes (BUDZIANOWSKI et al., 2017).

3.6.4. Engarrafamento

Utiliza a mesma tecnologia dos tanques de compressão, só em uma escala bem inferior. São garrafas de pequeno volume ideais para atendimento de consumidores menores, como famílias ou pequenos usuários comerciais. Podem ser utilizados também para abastecimento veicular, ou combustível de cozinha (BUDZIANOWSKI et al., 2017).

Instalações com capacidade superior de 500 Nm³/dia são consideradas de grande escala, enquanto que com capacidade entre 100 a 500 Nm³/dia, são consideradas de média escala (BUDZIANOWSKI et al., 2017).

3.6.5. Biometano Adsorvido (ABM)

Tecnologia recente em que o biometano é adsorvido por algum material poroso a pressões baixas de até 45 bar. Dada a baixa pressão de armazenamento, esta forma tornando-se torna mais segura em relação ao CBM, diminuindo também, o risco a explosões e a incêndios.

As vantagens desta forma de armazenamento são: redução das pressões operacionais, maior segurança com o sistema, maior capacidade de armazenamento, tanques mais planos que ocupam menores espaços que os tanques cilíndricos CBM (BUDZIANOWSKI et al., 2017).

3.7. Emissões para Combustíveis Fósseis e Biometano

As emissões de poluentes na atmosfera vêm cada vez mais recebendo atenção e medidas vêm sendo adotadas para mitigar o volume emitido. A assinatura do acordo de Paris, promovido pela 21^a Conferência das Partes - COP 21 estabeleceu a necessidade de os países diminuïrem a emissão de GEEs, a fim de arrefecer as mudanças climáticas.

Segundo dados do Balanço Energético Nacional 2020 (MME/EPE, 2020), em 2019, o setor foi responsável pela emissão de 190,5 Mt CO₂-eq, valor que representa 45,4% do total emitido por ações antrópicas neste ano.

A substituição do diesel pelo biometano nos fornece uma redução expressiva de GEEs. Entretanto, é importante salientar que ao se analisar o ciclo de vida do biometano, dependendo do país de produção, do tipo de matéria prima, da matriz energética do país produtor, dentre outros fatores, haverá uma participação de fontes não renováveis para geração do biometano e consequentemente, uma emissão de GEEs proporcional.

Estima-se que com a substituição da gasolina pelo biometano no setor de transporte, as emissões de GEEs sofreriam uma redução entre 60 a 80% (IRENA, 2018).

A matéria prima do combustível é fator determinante para o potencial de redução de GEEs, sendo que a utilização do biometano para abastecimento veicular (dependendo da matéria prima utilizada) pode até apresentar um fator de emissão de CO₂equ negativo (SCARLAT et al., 2018, IRENA, 2018).

O biometano pode ser utilizado também para abastecimento de embarcações. Segundo Relatório “Third IMO Greenhouse Gas Study 2014”, que considerou as projeções dos fatores de emissão de NO_x, SO₂ e MP para o ano de 2030 para diversos combustíveis, quando há a

substituição do óleo de gás marinho (MGO, em inglês) pelo biometano, há uma redução nas emissões de NOx de mais de 85%, reduções nas emissões de SO2 em 100% e reduções nas emissões de material particulado, em 83,5%. Já para a substituição de óleo de combustível marinho (HFO, em inglês), há uma redução nas emissões de NOx de mais de 85%, reduções nas emissões de SO2 em 100% e reduções nas emissões de material particulado em 96%. (RICARDO ENERGY & ENVIRONMENT, 2016, IMO, 2015)

O Relatório “The role of natural gas and biomethane in the transport sector” realizou uma comparação das emissões de poluentes entre os veículos movidos a gás com os veículos Euro 6 (serviço leve) e Euro VI (serviço pesado), ambos movidos a diesel, obtendo uma redução na emissão de NOx na ordem de 72%, em uma redução em 100% nas emissões de SO2 e em uma redução de 80% nas emissões de materiais particulados (RICARDO ENERGY & ENVIRONMENT, 2016).

3.8. Custos de Produção

Nos últimos 20 anos, houve um grande esforço para a consolidação dos bicomcombustíveis, da segunda geração (etanol, metanol e diesel Fischer). A principal desvantagem do biometano para estes bicomcombustíveis é o seu estado físico em condições normais de temperatura e pressão (CNTF) (AHMAN, 2010).

Entretanto, podemos é possível citar como vantagens do biometano para com os bicomcombustíveis: a sua menor dependência de desenvolvimentos técnicos específicos, a possibilidade de viabilidade para pequenas escalas de produção, maior potencial de matéria-prima, uma maior eficiência térmica, além da possibilidade de serem integrados nas redes de gás natural já existentes. (AHMAN, 2010)

O custo de investimento em energia renovável é superior ao das fontes não renováveis principalmente, pela consolidação tecnológica das fontes não renováveis no Brasil, diferentemente do que ocorre com o setor renovável. Apesar deste fato, seus benefícios na área ambiental, principalmente, na redução de emissões de GEE, e na área socioeconômica são bem elevadas (NADALETI et al., 2019).

Em um horizonte de curto e médio prazo, o biometano e os bicomcombustíveis ainda apresentaram dificuldades em competir economicamente com os combustíveis fósseis (AHMAN, 2010).

Segundo LARSSON et al. (2016), o biogás sempre que possível deve ser utilizado no setor de transporte, já que, para geração de energia elétrica existem outras alternativas de fontes

renováveis para suprir o setor, enquanto que para o setor de transporte estas outras fontes são bem mais limitadas.

Há ainda que se considerar que o preço do biometano, quando comercializado como combustível veicular, é superior quando comparado a sua venda ao setor de energia (LARSSON et al., 2016).

Para obtenção do custo de uma usina de produção de biogás e de biometano, foi consultada a literatura.

Segundo IRENA (2013), os custos de capital para produção de biometano, considerando a usina de produção de biogás e a usina de purificação, para sistemas considerados de pequena escala (100-500 Nm³/hora) variam entre US\$ 8.950 a US\$ 13.800/Nm³/hora, sendo a planta de purificação responsável por 37-47% dos custos totais instalados.

Já para usinas de grande porte (capacidade de geração de 1.000- 2.000 Nm³/hora), os custos são da ordem de US\$ 8.600 a US\$ 7.350/Nm³/hora. A usina de purificação corresponde a uma participação entre 27% a 30% do custo total.

Conforme ilustrado pela figura 8, o custo de produção de biometano é dependente da matéria prima utilizada, bem como, da capacidade total instalada. É possível perceber que o custo é maior para capacidades inferiores.

Já a figura 9, demonstra a participação de cada elemento no custo de produção de biogás, sendo custo do digestor o mais relevante no processo.

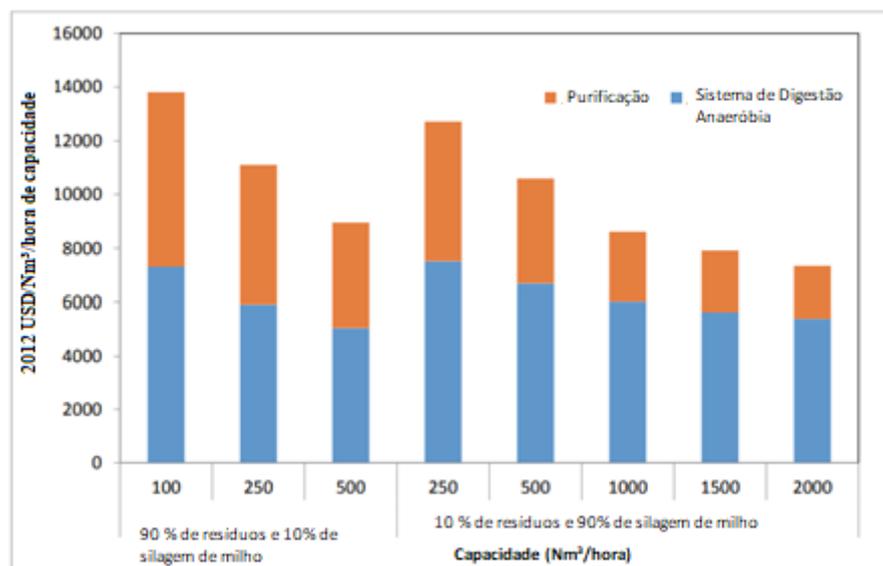


Figura 8: Custos de capital para plantas de produção e purificação de biogás, por tipo de matéria prima e capacidade instalada.

FONTE: Traduzido de IRENA, 2013.

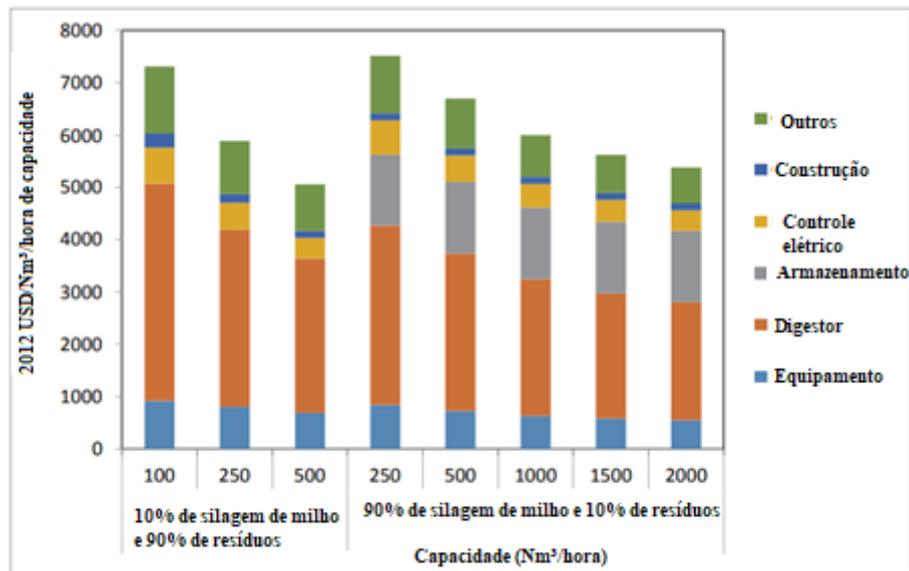


Figura 9: Custos de capital de uma planta de biogás por capacidade instalada e tipo de matéria prima.
 FONTE: Traduzido de IRENA, 2013.

Para biogás produzido a partir de aterro sanitário, Terraza e Willmumsen (2009) apontam um custo de purificação entre US\$ 1,800–4,000/m³gás. hora. Esta variação de valor depende do tipo de tecnologia utilizada e da qualidade requerida do biometano.

Segundo EPE (2018), o valor médio de investimento para plantas de upgrade de biometano é de 431 R\$/m³gás. Este valor médio foi estimado por EPE (2018) por meio de consultas e pesquisas de trabalhos publicados internacionalmente. O custo de purificação é o que possui o maior impacto no custo de produção do biometano (Stürmer et al., 2016).

Já em dados mais recentes, disponibilizados pela International Energy Agency (EIA, 2020), os custos de produção de biogás variam entre US\$ 2/MBtu a US\$ 20/MBtu, sendo que na Europa, o custo médio estimado é de US\$ 16/MBtu, enquanto que no Sudeste Asiático o valor é de US\$ 9/MBtu. Cerca de 70 - 95% do custo total é derivado do custo de instalação dos biodigestores.

O custo de purificação do biogás varia entre US\$ 2/MBtu a US\$ 4/MBtu para uma instalação com capacidade de 3,5 milhões de m³ de biogás por ano. O custo de purificação, tal qual o custo de produção do biogás, está fortemente ligado a capacidade instalada da usina (EIA, 2020).

Outro fator que impacta no custo de produção do biometano (quando o mesmo é injetado diretamente na rede de gás natural) é a proximidade da usina com a rede de gás, isto é, quanto mais próxima, menor é o custo associado (EIA, 2020).

A figura 10 compara o custo de produção de biometano com o gás natural, no ano de 2018, para algumas regiões.

O que é possível destacar é que para todas as regiões estudadas, o custo de produção do gás natural é inferior ao do biometano, isso ocorre provavelmente, pelo fato do mercado de gás natural ser mais consolidado relativamente ao do biometano. Em relação a produção de biometano, é possível constatar que a América do Sul e Central foram a segunda região que apresentou um menor custo de produção, perdendo apenas para a Ásia, cerca de US\$ 12/MBtu (EIA, 2020). É possível inferir, que este menor valor está associado à grande disponibilidade de matéria prima nestas regiões.

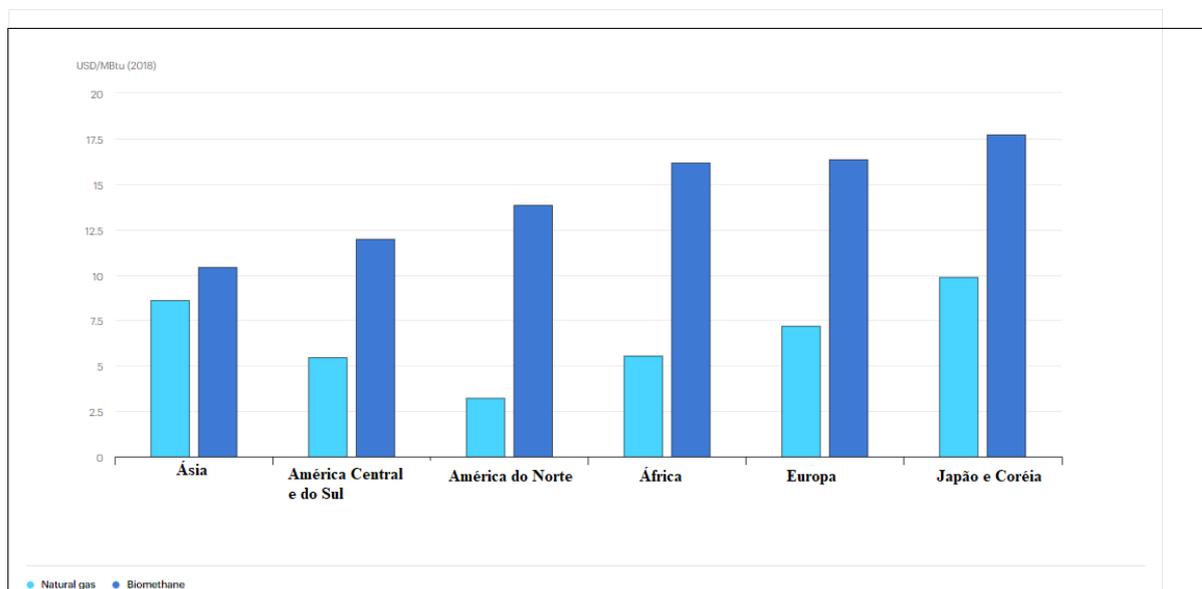


Figura 10: Custos de produção de biometano e gás natural para o ano de 2018.
Fonte: Traduzido de EIA, 2020.

A matéria prima, em alguns casos, pode apresentar um custo negativo. Estes casos ocorrem quando o produtor do resíduo precisa pagar para o seu descarte, esse valor pago para o tratamento deste resíduo é chamado de *gate fees* (EIA, 2020).

3.8.1. Custos de Operação e Manutenção

A produção de biogás por meio dos digestores é um processo já consolidado no mercado, apresentando uma tecnologia madura, e por isso os custos de produção do biogás tendem a se manterem mais estáveis (IRENA, 2013).

Um fator determinante para o custo de produção é a matéria prima utilizada, quando a matéria prima utilizada for algum resíduo o custo para obtenção são nulos, ou quase nulos. Em alguns casos, dependendo da distância entre a usina de biogás e ao local de obtenção/produção da matéria prima, o custo de transporte é bem significativo (IRENA, 2013).

Para Terraza e Willmumsen (2009), os custos operacionais (OPEX) anuais de uma planta de purificação de biogás, variam entre 17% e 21% do custo de investimento total. Segundo IRENA (2013), o custo de produção do biogás varia de US\$ 0,45/litros de gasolina equivalente (lge) quando a matéria prima utilizada for RSU, até US\$ 0,93/lge quando a matéria prima for oriunda de algum material agrosilvopastoril.

Conforme pode ser visto na figura 11, os principais custos associados à produção de biogás, quando há a introdução de algum resíduo agrosilvopastoril, é a matéria prima consumida. Quando se utiliza somente resíduos orgânicos, percebe-se que o maior custo é para geração de energia térmica. A energia térmica no processo é muito importante, já que a temperatura é um dos fatores que favorece o processo de digestão anaeróbia.

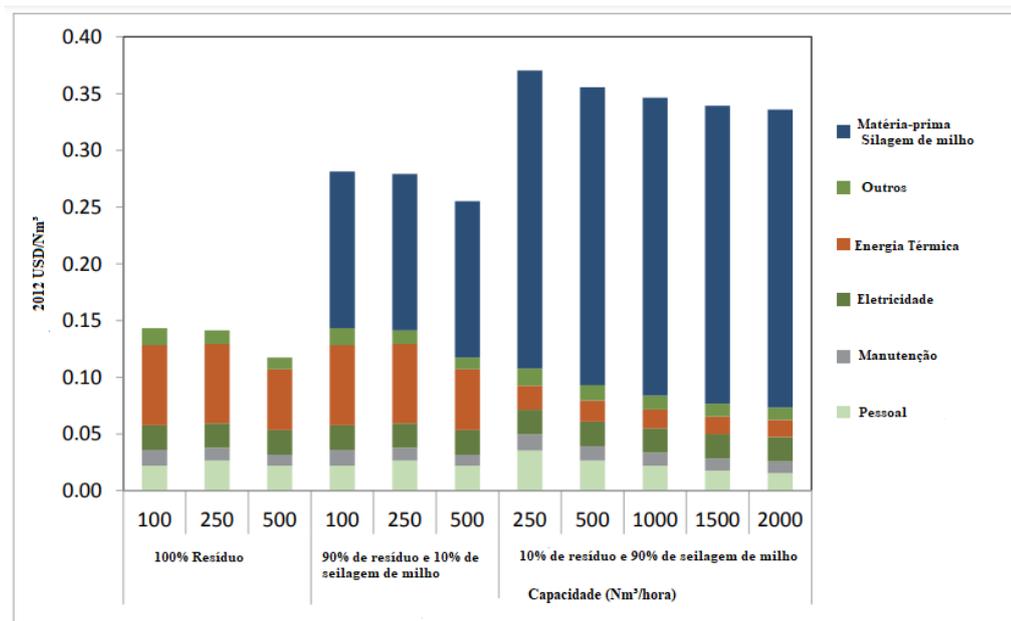


Figura 11: Custos operacionais para produção de biogás por matéria-prima e capacidade da Instalada.
Fonte: Traduzido de IRENA, 2013.

O custo de produção médio de biometano no ano de 2012 para matéria prima de resíduo ou esgoto, varia entre US \$ 0,45 a US\$ 0,55 / lge. Já para a cogeração de resíduos ou esgoto em conjunto com insumo agrosilvopastoril, este custo varia entre US\$ 0,65 para US\$ 0,75 / lge. (IRENA, 2013). A Figura 12 ilustra o custo de operação encontrado por tipo de tecnologia de purificação utilizada (purificação por água e purificação por amina), bem como pela capacidade instalada das plantas.

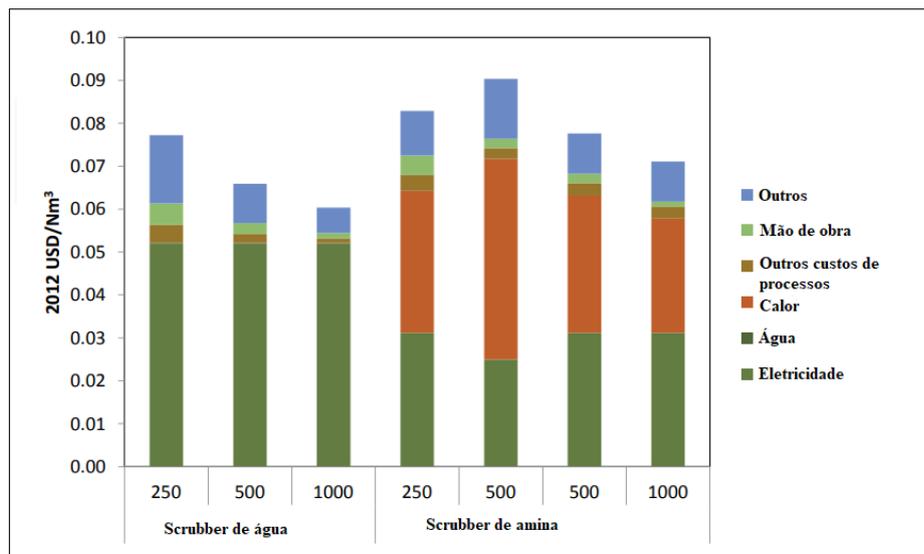


Figura 12: Custos operacionais para purificação de biogás por tipo de tecnologia utilizada e capacidade instalada da planta.

Fonte: Traduzido de IRENA, 2013.

3.9. Uso do Combustível em Veículos Terrestres e em Embarcações

Na Europa são fornecidos três versões de veículos que utilizam gás natural como combustível, quais sejam: versão monovalente onde o único combustível aceito é o GNV, versão quase-monovalente que apresenta um tanque “reserva” inferior a 15 litros de gasolina para alguma operação emergencial e a versão bivalente, com tanque de gasolina adicional.

Em relação aos motores para biometano, podem ser citados:

- Motores específicos de gás biometano, em que os motores possuem vela de ignição otimizada para operar com 100% de biometano. Geralmente, são utilizados em veículos pesados, caminhões e ônibus para a substituição direta do motor a diesel e do sistema de combustível.
- Motores bicombustível de biometano: o motor bicombustível é uma alternativa do motor específico que apresenta, tanto tanques de gasolina como de biometano no veículo. Esse tipo de tecnologia geralmente é instalada em carros e vans leves.
- Tricombustível: como o próprio nome sugere, este tipo de motor funciona com gasolina, etanol e gás natural ou biometano.

Para utilização do biometano em abastecimento veicular, muitas vezes, é necessária a criação de postos de abastecimento. Estas estações comprimem o gás recebido a uma pressão superior para que se torne possível o abastecimento de veículos. Existem, atualmente, três tipos

de estações de GNV: de abastecimento rápido, de abastecimento por tempo e de abastecimento por combinação (SMITH et al., 2014).

O de preenchimento rápido apresenta compressores que conseguem atender ao tempo de abastecimento semelhante aos do de abastecimento convencional (diesel ou gasolina) (SMITH et al., 2014).

Para o preenchimento por tempo, o abastecimento demora algumas horas, normalmente utiliza-se este tipo de abastecimento para frotas de veículos. Nestes casos, os veículos são abastecidos diretamente pelo compressor. O tempo que leva para alimentar um veículo depende do número de veículos, da quantidade de combustível necessária e do rendimento do compressor. No abastecimento por combinação, fica a critério do usuário escolher o tipo de abastecimento, podendo ser o rápido ou o por tempo (SMITH et al., 2014).

3.10. Legislação para Produção, Uso e Comercialização

No quadro 1 estão descritas as principais legislações, resoluções e normativas que norteiam o setor de biogás/biometano no Brasil.

Quadro 1: Principais legislações, decretos, resoluções e normativas do setor de biogás/biometano no Brasil.

Legislação	Descrição
Lei nº 12.187/2009(BRASIL, 2009)	Instituiu a Política Nacional de Mudanças Climáticas, fornece diretrizes gerais para redução emissões de gases de efeito estufas no país.
Lei nº 12.305/2010(BRASIL, 2010)	Instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), disciplinando a destinação final dos resíduos sólidos gerados.
Lei nº 13.576 26/2017(BRASIL, 2017)	Instituiu a Política Nacional de Biocombustíveis (Renovabio).
Decreto Nº 9.888, de 27 de junho de 2019(BRASIL, 2019)	Regulamenta a Lei nº 13.576, estabelece estratégias para o aumento da produção de bicombustíveis. O decreto prevê a definição de metas compulsórias, por parte do Conselho Nacional de Política Energética , de redução de emissões de gases de efeito estufa para o setor de comercialização e institui o Comitê da Política Nacional de Bicomcombustíveis - Comitê RenovaBio.
Decreto nº 5.163/2004(BRASIL, 2004)	Decreto Federal que regulamenta a comercialização de energia elétrica, em especial para a geração distribuída.
Resolução ANEEL nº 482/2012 (ANEEL, 2012) e Resolução ANEEL nº 687/2015(ANEEL, 2015)	Estabelecem as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica e para o sistema de compensação de energia elétrica. Impulsiona a geração de biogás para geração de eletricidade, principalmente para pequenos produtores rurais.
Decreto 44.855/14 (RIO DE JANEIRO, 2014)	Decreto regulamentador Lei nº 6361, de 18 de dezembro de 2012

Continua

Legislação	Descrição
Lei nº 6.361, de 18 de dezembro de 2012 (RIO DE JANEIRO, 2012)	Dispõe sobre a política do gás natural renovável no estado do Rio de Janeiro e impõe às concessionárias de distribuição de gás canalizado do estado a adquirir, de forma compulsória, todo o GNR produzido no Estado até o limite de 10% (dez por cento) do volume de gás natural convencional distribuído por cada uma delas.
Decreto nº 58.659 de 4 de dezembro de 2012(BRASIL, 2012)	Instituiu o Programa Paulista de Biogás e Biometano. Prevê uma porcentagem compulsória de volume de biometano que deve ser distribuído junto com o gás natural não renovável.
Resolução ARSESP nº 744 de 26/07/2017(SÃO PAULO, 2017)	Estabelece condições e critérios para distribuição de Biometano na rede de gás canalizado, no âmbito do Estado de São Paulo.
Lei nº 19.500 de 21 de maio de 2018(PARANÁ, 2018)	Instituiu a política estadual de biogás e biometano no Estado do Paraná. Têm por objetivo fomentar a produção e consumo de biogás e biometano no estado, por meio de programas e regulamento específicos. A lei também estabelece a obrigatoriedade da injeção de um percentual mínimo de biometano ao gás natural distribuído, com o estabelecimento de tarifas e preços mínimos a serem seguidos.
Decreto nº 60.001, de 20 de dezembro de 2013(SÃO PAULO, 2013)	Reduz a base de cálculo do imposto incidente nas saídas internas de biogás e biometano, no estado de São Paulo, de forma que a carga tributária corresponda ao percentual de 12%.
Resolução ANP nº 8/2015(BRASIL/ANP, 2015)	Fica estabelecida a especificação do Biometano oriundo de produtos e resíduos orgânicos agrossilvopastoris e comerciais destinados ao uso veicular e às instalações residenciais e comerciais.
RESOLUÇÃO ANP Nº 685/2017(BRASIL/ANP, 2017)	Estabelece as regras para aprovação do controle da qualidade e a especificação do biometano oriundo de aterros sanitários e de estações de tratamento de esgoto destinado ao uso veicular e às instalações residenciais, industriais e comerciais a ser comercializado em todo o território nacional.

Fonte: Adaptado de GARCILASSO, 2018.

Para a injeção do biometano na rede de gás natural, ele deve apresentar características estabelecidas e normatizadas. Para o biometano proveniente de aterro sanitário e ETEs, a Resolução ANP nº 685/2017 (BRASIL/ANP, 2017) é a responsável por definir os padrões exigidos. A tabela 3 ilustra os limites estabelecidos para cada substância, bem como, o método que deve ser utilizado para verificação dos parâmetros.

Também, a tabela 3 apresenta alguns conceitos/compostos que serão discutidos a seguir, como, poder calorífico, índice de Wobbe, ponto de orvalho e siloxanos.

O poder calorífico de um material é entendido como a quantidade de energia liberada (variação de entalpia) por unidade de massa, ou volume, quando o mesmo ocorre a combustão completa. Existe duas classificações do poder calorífico: poder calorífico superior (PCS) e o poder calorífico inferior (PCI), a diferença entre estes dois, PCS e PCI, é que para o primeiro há a

condensação dos vapores d'água, enquanto que para o segundo, os gases são resfriados até o ponto de ebulição da água, evitando a sua condensação (POTTER E SCOTT, 2007). O Índice de Wobbe (equação 1) é calculado pela razão entre o poder calorífico superior (PCS) e a raiz quadrada da densidade relativa (d) sobre condições iguais de temperatura e pressão (BRASIL/ANP, 2008).

$$W = \frac{PCS}{d^{1/2}} \quad (01)$$

O índice de Wobbe é utilizado como meio de comparação entre os combustíveis gasosos com propriedades de queima semelhantes (COSTA E COELHO, 2007).

O ponto de orvalho é a temperatura que o ar, ou gás, deve ser resfriado para ele ficar saturado com vapor de água. Nessa condição, a quantidade de vapor de água no ar é máxima.

Já os siloxanos, são constituídos por compostos químicos como silício, oxigênio e radicais orgânico. Eles surgem a partir da biodigestão de efluentes oriundos de indústrias do ramo de cosméticos, da de higiene pessoal e da de produção de detergentes (GARCILASSO, 2018). O impacto da presença deste composto no biogás é devido a formação de sílica (SiO_2) e de quartzo microcristalino quando ocorre a combustão do combustível, estes compostos por sua vez, acabam sendo depositados nas velas de ignição, válvulas e cilindros dos maquinários necessários para o aproveitamento energético, danificando assim, estes equipamentos (KUNZ et al., 2019).

Tabela 3: Especificação do Biometano oriundo de aterros e estações de tratamento de esgoto.

Característica	Limite			Método			
	Norte	Nordeste	Centro-Oeste, Sudeste e Sul	NBR	ASTM D	ISO	NF
Poder Calorífico Superior (kJ/m ³)	34.000 a 38.400	35.000 a 43.000		15213	3588	6976	-
Índice de Wobbe (kJ/m ³)	40.500 a 45.000	46.500 a 53.500		15213	-	6976	-
Metano, mín. (% mol.)	90	90		14903	1945	6974	-
Oxigênio, máx. (% mol.)	0,8	0,8		14903	1945	6974	-
CO ₂ , máx.	3	3		14903	1945	6974	-
CO ₂ + O ₂ + N ₂ , máx. (% mol.)	10			14903	1945	6974	-
Enxofre Total, máx.(mg/m ³)	70			15631	5504	6326-3 6326-5 19739	-
Gás Sulfídrico (H ₂ S), máx. (mg/m ³)	10			15631	D4084 - 07 D4323 - 15 5504 6228	6326-3 19739	-
Ponto de orvalho de água a 1atm, máx. (°C)	-39	-39	-45	15765	5454	6327 10101-2 10101-3 11541	-
Ponto de orvalho de hidrocarbonetos (°C)	15	15	0	16338	-	23874	-
Teor de siloxanos, máx. (mgSi/m ³)	0,3	0,3		16560 16561	-		-
Clorados, máx. (mg (Cl/m ³))	5	5		-	-	1911	-
Fluorados, máx. (mg (F/m ³))	5	5		-	-	15713	X43-304

Fonte: Resolução BRASIL/ANP nº 685/2017.

3.11. Cenário da Região Sudeste: Aterros Sanitários e Frota de Veículos

Aterros sanitários são estruturas de engenharia construídas para disposição final correta dos RSUs, são projetados de forma a evitar a contaminação do meio ambiente e problemas relacionados à saúde pública. Para atingir estes objetivos, a construção destes aterros deve se respaldar nas normas e regulamentações específicas, além de cumprir os requisitos de projeto, de licenciamento e de operação exigidos pelos órgãos licenciadores (BARROS, 2013).

Os consórcios públicos intermunicipais, por sua vez, consistem na união entre os entes federativos para a gestão associada de serviços públicos, apresenta como vantagem este modelo de gestão a elevação das escalas de aproveitamento e a redução dos custos associados. A união dos governos locais por meio da colaboração mútua possibilita atingiras metas e objetivos propostos aos serviços públicos mais rapidamente do que pela atuação isolada dos Municípios (CNM, 2016).

Segundo informações da Fundação Nacional da Saúde (FUNASA, 2018), no Estado do Rio Janeiro são encontrados 07 consórcios intermunicipais de RSUs, 28 no estado de Minas Gerias, 03 no Espírito Santo e 13 no estado de São Paulo; totalizando um número de cidades contribuintes de 42, 307, 64 e 95 respectivamente. A figura 13 ilustra as sedes de cada Consórcio de Aterros Sanitários da Região Sudeste, enquanto que, as figuras 14, 15 e 16 destacam os aterros dos Estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo, Minas Gerais e São Paulo, respectivamente. Nos apêndices do presente trabalho, pode ser consultada uma tabela com todas as cidades participantes do Consórcios de Aterros Sanitários estudadas neste trabalho.

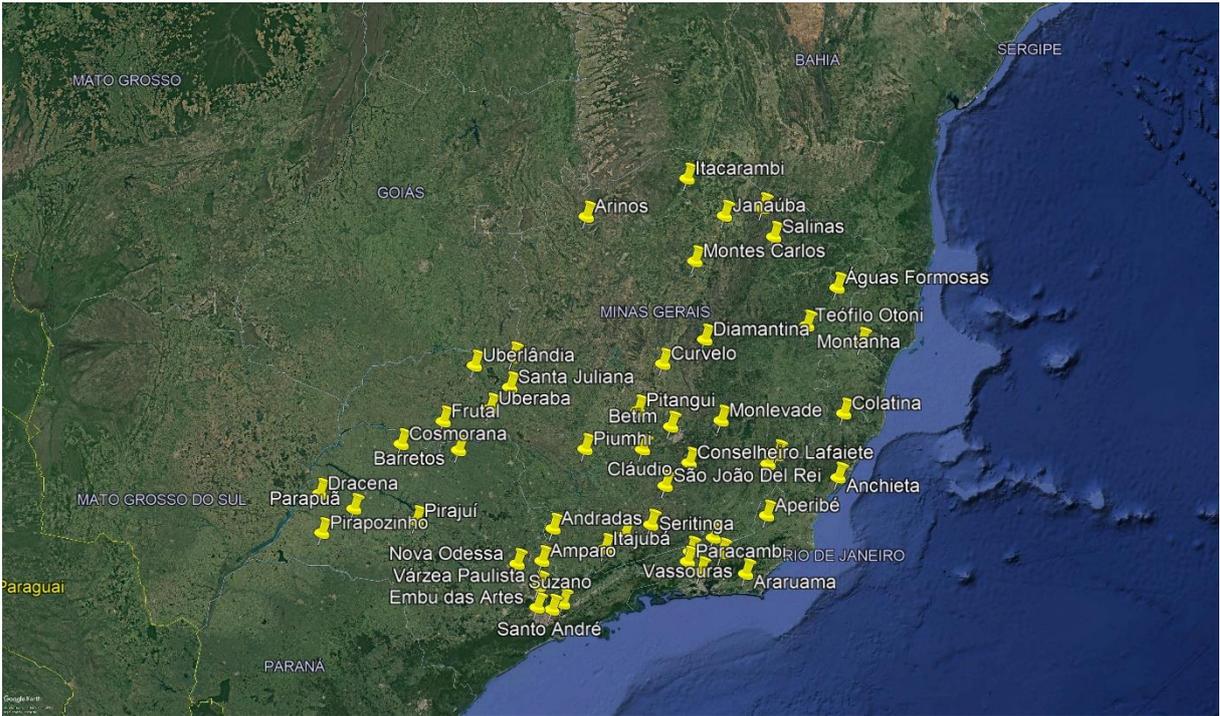


Figura 13: Sede dos Consórcios de Aterros Sanitários Da Região Sudeste do Brasil.

Fonte: Google Earth, 2022.

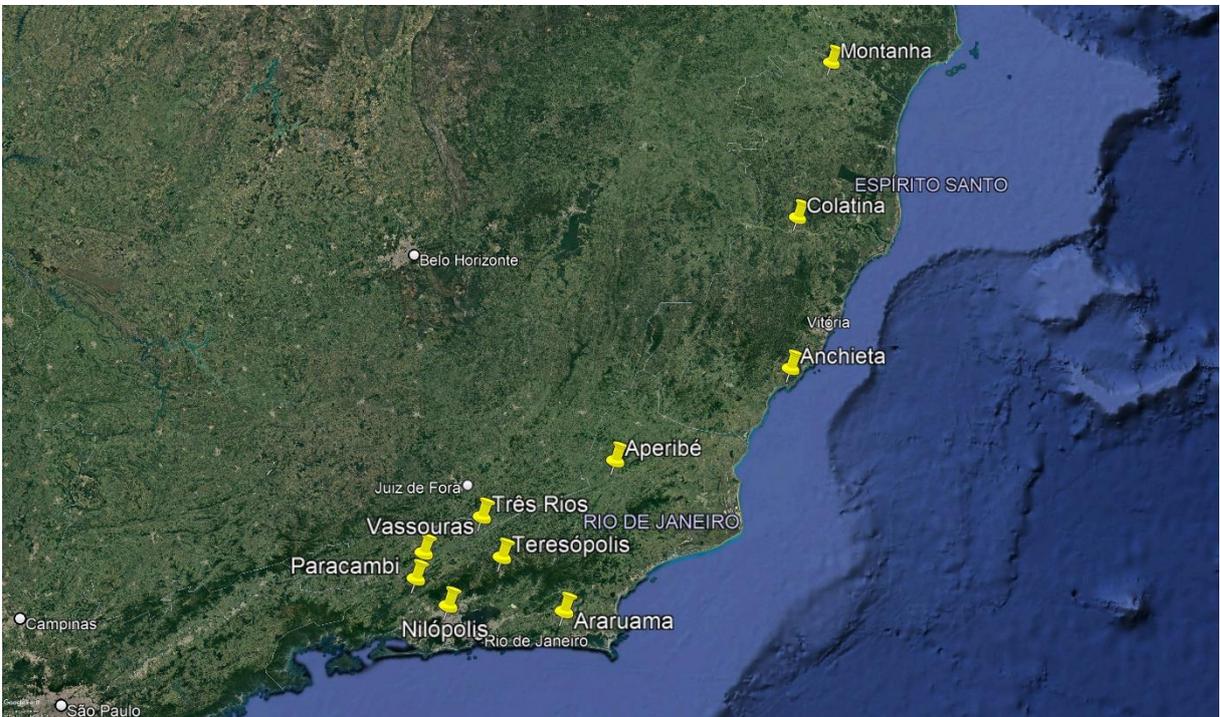


Figura 14: Sede dos Consórcios de Aterros Dos Estados Espírito Santo e Rio de Janeiro.

Fonte: Google Earth, 2022.

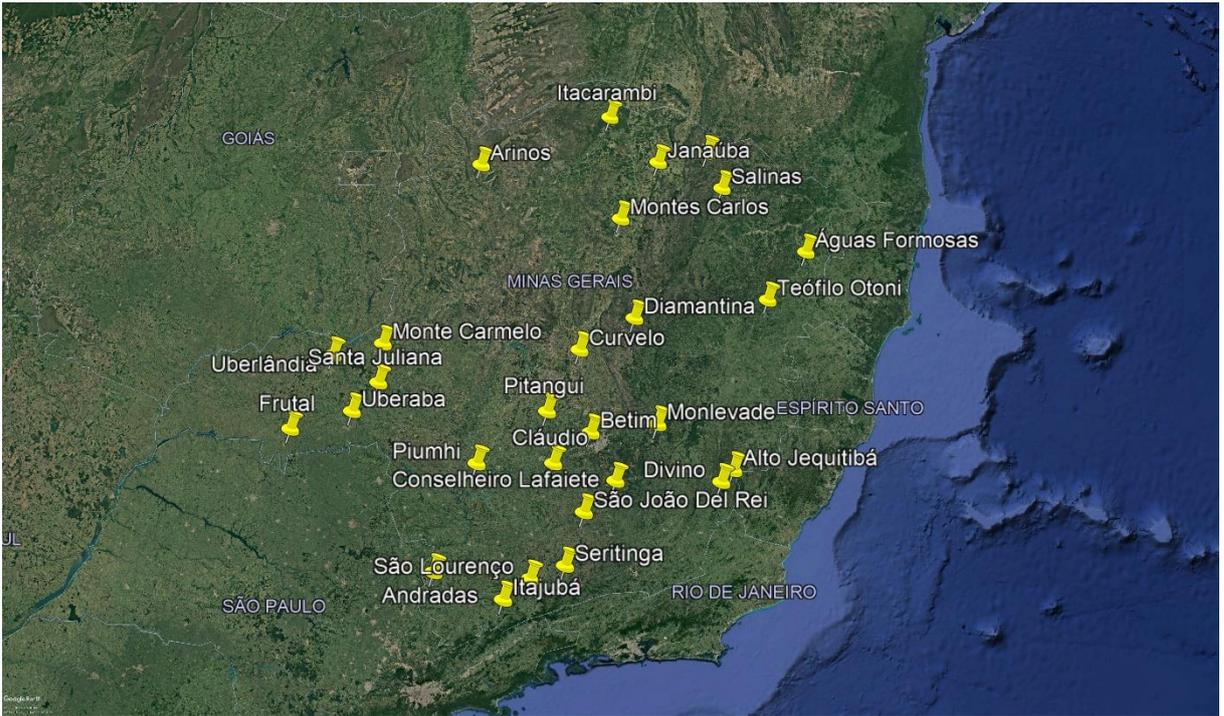


Figura 15: Sede dos Consórcios de Aterros Do Estado de Minas Gerais.

Fonte: Google Earth, 2022.

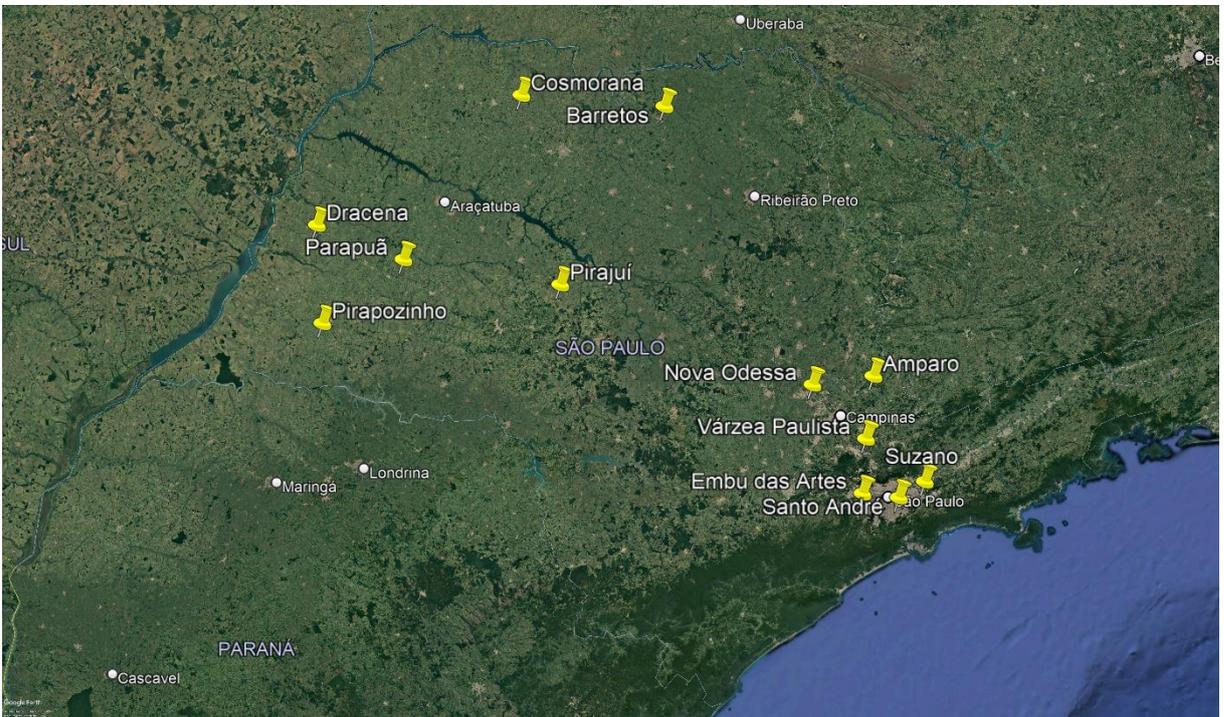


Figura 16: Sede dos Consórcios de Aterros Do Estado de São Paulo.

Fonte: Google Earth, 2022.

Segundo dados levantados pelo Ministério da Infraestrutura (MINFRA, 2020), o Brasil em 2020 apresentou uma frota de 107.250.740 veículos, sendo os veículos tipo automóvel os mais representativos, cerca de 54% do total. Como pode ser visto na figura 17, a região que apresentou a maior frota foi a região Sudeste, com 48% da frota nacional, seguida pela região Sul com 20%, região Nordeste com 18%, região Centro-oeste com 9% e região Norte com 5% (MINFRA, 2020).

O Estado de São Paulo possui a maior frota circulante do Brasil com 30,6 milhões de veículos seguido por Minas Gerais com 11,9 milhões de veículos, Paraná com 8,0 milhões de veículos, Rio Grande do Sul com 7,4 milhões de veículos e Rio de Janeiro com 7,1 milhões de veículos, o que representa em termos percentuais, um valor de 28,6%, 11,2%, 7,5%, 6,9% e 6,6%, respectivamente (MINFRA, 2020).

Já as menores frotas se encontram nos Estados do Amapá, com 213,2 mil veículos, Roraima, com 237,1 mil veículos, Acre, com 303,2 mil veículos, Tocantins com 747,7 mil veículos e Sergipe com 829,9 mil veículos, representando um percentual de 0,20%, 0,22%, 0,28%, 0,70% e 0,77%, respectivamente (MINFRA, 2020).

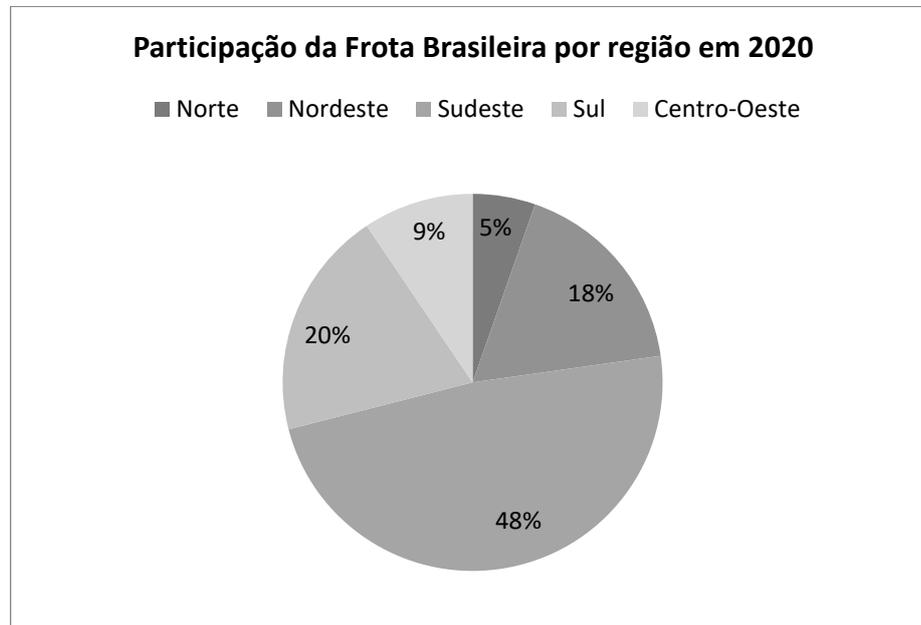


Figura 17: Participação da Frota Brasileira por região em 2020.

Fonte: MINFRA, 2020.

Na região Sudeste, a maior parte dos veículos, cerca de 31.303.012 corresponde a automóveis. O número de ônibus na região é de 309.529 (MINFRA, 2020). O número da frota por tipo de veículos, bem como a sua participação, pode ser visto na figura 18 e 19, respectivamente.

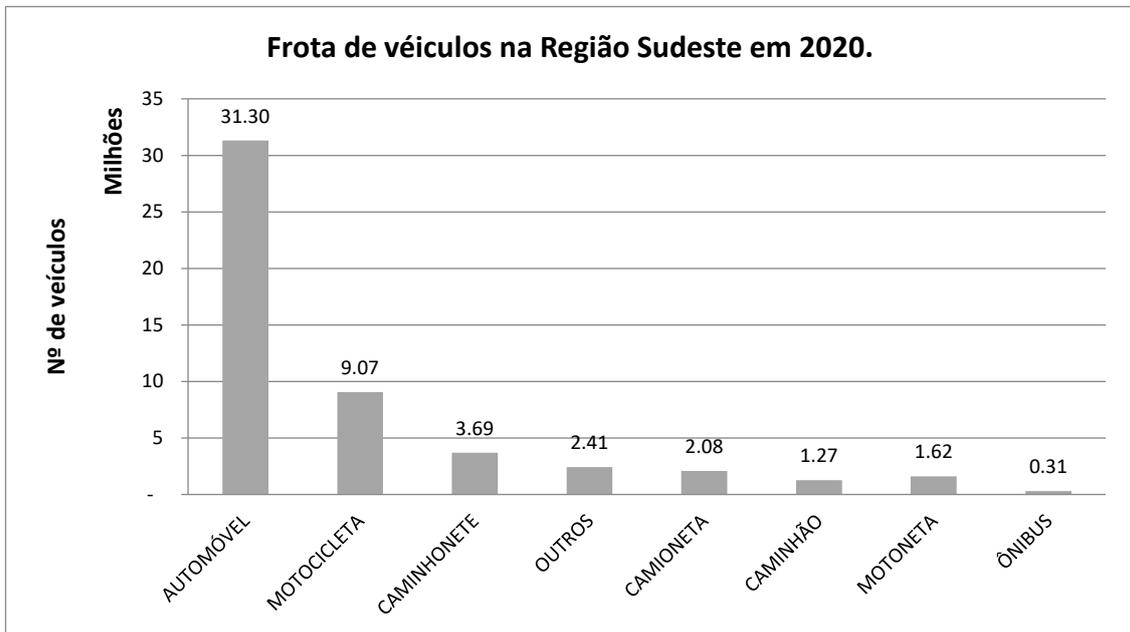


Figura 18: Frota de veículos na região sudeste em 2020.
Fonte: MINFRA, 2020.

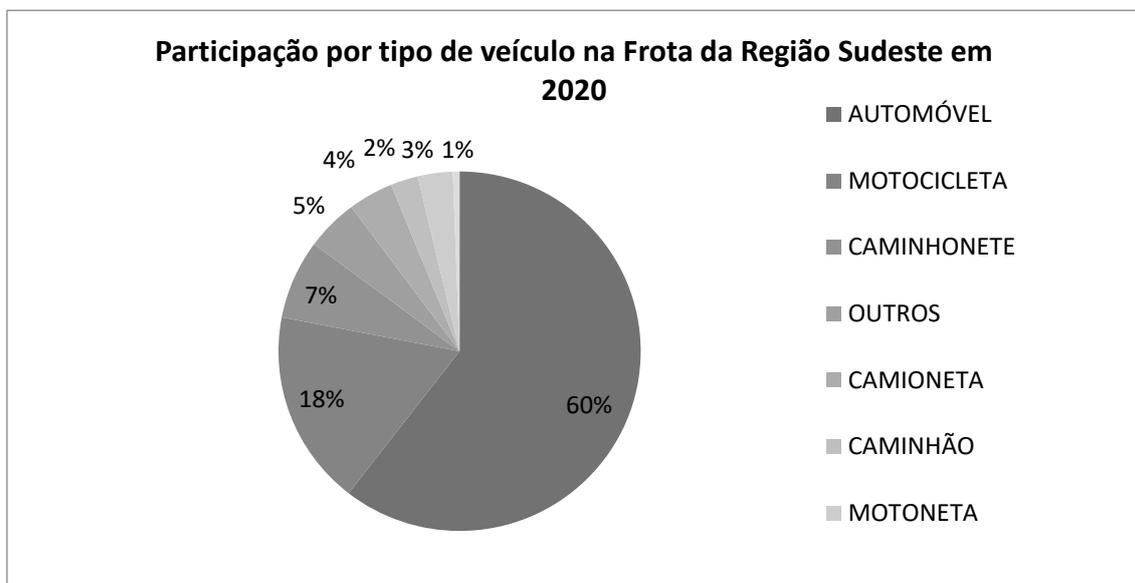


Figura 19: Participação da Frota na região sudeste em 2020.
Fonte: MINFRA, 2020.

A categoria “Outros” na figura 19 engloba os seguintes veículos: caminhão trator, chassi plataforma, ciclomotor, microônibus, ônibus, quadriciclo, reboque, semirreboque, sidecar, trator esteira, trator rodas, triciclo, utilitário.

O fator de emissão de GEE para veículos depende de diversos fatores, tais quais: o ano de fabricação do veículo, o seu estado de sucateamento e sua regulagem (SZWARCFITER, 2004).

4. METODOLOGIA

A Metodologia deste trabalho está descrita no fluxograma (Figura 20).

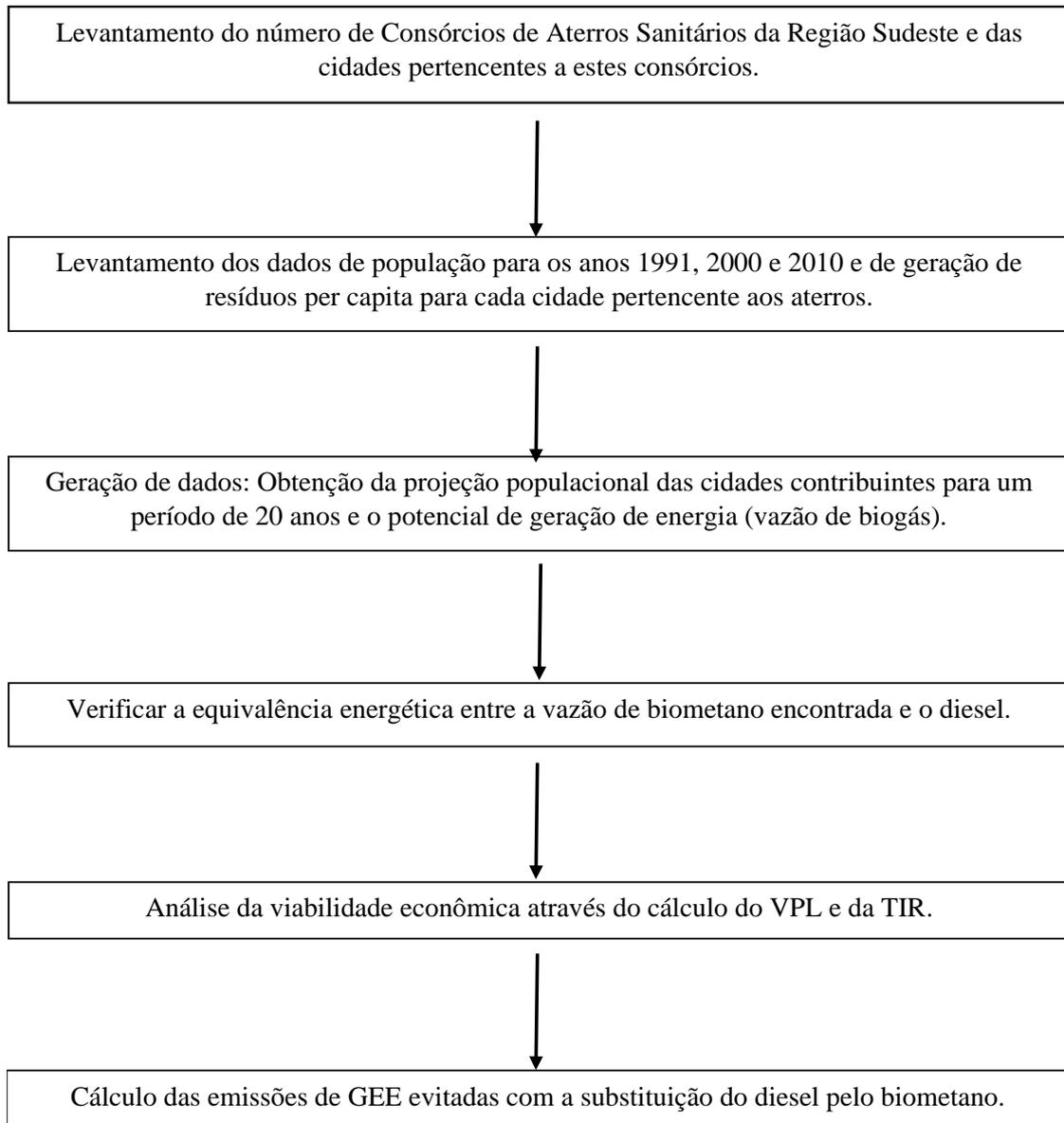


Figura 20: Fluxograma da Metodologia utilizada neste trabalho.
Fonte: Elaboração Própria.

4.1. Projeção Populacional e Geração de Biometano

Foi realizado o levantamento dos (consórcio de) aterros sanitários da Região Sudeste por meio do Site da Fundação Nacional de Saúde (FUNASA), que disponibiliza um Banco de Dados de Consórcios de Saneamento Básico por Estado Brasileiro.

Em seguida, para cada cidade pertencente a estes consórcios, foram levantados os dados de população para os anos 1991, 2000 e 2010 e de geração de resíduos per capita para cada cidade pertencente aos aterros, bem como o ano referente a este dado. Estes dados foram retirados de sites do governo como o do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SINIS), respectivamente.

Para a estimativa da geração de biometano produzido por um aterro sanitário, foi considerado o funcionamento dos aterros por 20 anos, a partir do ano de 2021.

Logo, foi realizado a projeção populacional das cidades pertencentes a estes aterros por 20 anos, do ano de 2021 ao ano de 2041.

Considerando o grande número de cidades analisadas, foi utilizado um programa computacional desenvolvido em Scilab® por Silva et al (2019), para o cálculo da projeção populacional e para a geração de metano.

Os dados de entrada para obtenção destes resultados (projeção populacional e vazão de metano) foram: população de cada cidade para os anos de 1991, 2000 e 2010, taxa de produção de resíduo per capita, e o ano referente a esta produção, também para cada cidade estudada. Cabe ressaltar que algumas destas cidades não possuem dados de população para o ano de 1991 ou 2000.

Neste caso, a projeção populacional foi então obtida por meio da utilização da taxa de crescimento populacional anual de uma cidade com um número de habitantes semelhantes a cidade analisada. Multiplicando a taxa encontrada para o ano de 2010 pela população do ano de 2010, encontra-se a população para o ano de 2011; este valor é então, multiplicado pela taxa referente ao ano de 2011, obtendo a população do ano de 2012 e assim sucessivamente, até o ano de 2041.

O modelo matemático escolhido para estimar a população foi o de crescimento decrescente, considerando-se a melhor adequação ao comportamento passado e as expectativas para a região quanto à dinâmica populacional (BARROS, 2013). As fórmulas deste modelo podem ser vistas nas equações 02, 03, 04 e 05.

$$\frac{dP}{dT} = K_d(P_s - P) \quad (02)$$

$$P_t = P_0 + (P_s - P_0) \cdot [1 - e^{-k_d \cdot (t-t_0)}] \quad (03)$$

$$P_s = \frac{2 \cdot P_0 \cdot P_1 \cdot P_2 - P_1^2 \cdot (P_0 + P_2)}{P_0 \cdot P_2 - P_1^2} \quad (04)$$

$$K_d = \frac{-\ln[(P_s - P_2)/(P_s - P_0)]}{t_2 - t_0} \quad (05)$$

Onde:

dP/dT = taxa de crescimento da população em função do tempo;

P_0, P_1, P_2 = populações nos anos t_0, t_1 e t_2

P_t = população estimada no ano t (hab)

P_s = população de saturação (hab)

K_d = coeficiente

Para as cidades de Pinheiro – ES, São Roque de Minas – MG, Monte Alegre de Minas (MG), Santa Vitória (MG), Couto de Magalhães de Minas (MG), Diamantina (MG), Aiuruoca (MG), Unaí (MG), Inimutaba (MG), Muqui (ES), Italva (RJ), Engenheiro Paulo de Frontin (RJ), Américo de Campos (SP), Ouro Verde (SP), Santa Juliana (MG), São Gonçalo do Pará (MG), Cachoeira Dourada (MG), Poté (MG), Pirajuba (MG), Vazante (MG), Taiobeiras (MG), Presidente Kennedy (ES), Nova Ponte (MG), o modelo matemático escolhido foi o geométrico, já que, para o modelo de crescimento decrescente, o resultado destas projeções foi na ordem do bilhão, valor inconsistente com a realidade.

As fórmulas do modelo geométrico podem ser vistas nas equações 06, 07, 08 e 09.

$$\frac{dP}{dT} = K_g \cdot P \quad (06)$$

$$P_t = P_0 \cdot e^{k_g \cdot (t-t_0)} \quad (07)$$

$$P_1 = P_0 \cdot (1 + i)^{(t-t_0)} \quad (08)$$

$$K_g = \frac{\ln P_2 - \ln P_0}{t_2 - t_0} \quad (09)$$

O modelo utilizado para o cálculo da geração de metano foi o proposto por CETESB (2006b), equação de primeira ordem, conforme pode ser visto na equação 10.

$$\sum Q_x = kR_xL_o e^{-k(x-T)} \quad (10)$$

Onde: Q_x = vazão de metano ($m^3 \text{ CH}_4/\text{ano}$), k = constante de decaimento ($1/\text{ano}$), L_o = potencial de geração de biogás (m^3/kg), R_x = fluxo de resíduos (t/ano), x = ano atual; T = ano de deposição do resíduo.

O potencial de geração de metano utilizado foi a de $170 \text{ m}^3/\text{kg}$ e a taxa de decaimento adotada foi a de $0,05/\text{ano}$. Estes valores são recomendados pela USEPA (2005).

4.2. Análise de viabilidade econômica

Foi feita a utilização de fórmulas como Valor Presente Líquido (VPL) (equação 11) e Taxa Interna de Retorno (TIR) para verificar a viabilidade da venda do biometano. Nesta etapa são estimados os valores de todos as unidades necessárias para produção de biometano (usina de tratamento e purificação).

Um VPL positivo representa que o empreendimento é rentável e viável economicamente.

O cálculo da TIR é feito por meio do uso da Fórmula do VPL, ao igualá-lo a zero. Desta forma, encontra-se a Taxa mínima necessária para obtenção de retorno financeiro.

$$VPL = \sum_{t=1}^m \frac{Qn.T - Com}{(1+i)^n} - I \quad (11)$$

Onde: Q = Vazão produzida anualmente, T = tarifa de venda de combustível, i = taxa de desconto, m = vida útil do empreendimento, Com = custo de operação e manutenção, I = Custo de capital, n = ano

4.2.1. Investimento e Despesas

Para a obtenção do valor do investimento das unidades de tratamento e purificação do biometano, foi utilizado como referência uma Nota técnica publicada pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2018), em 2018.

Os valores de investimento adotados para cada aterro levaram em consideração a capacidade de produção de biometano, ou seja, o a vazão, em m³/dia, de cada aterro. Procurou-se adotar o maior volume possível de cada aterro para ser a capacidade instalada destas unidades. Para todos os aterros simulados, o maior volume se deu no último ano de operação, o ano de 2040.

A figura 21, relaciona o valor de investimento (R\$/m³) com a capacidade de produção (ou capacidade instalada) das unidades de tratamento (Nm³/dia). Esta figura demonstra a parcela variável do investimento.

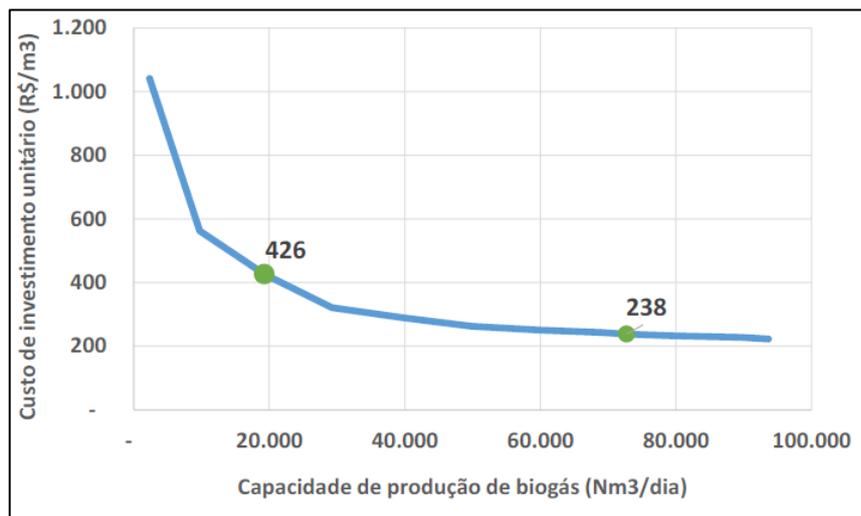


Figura 21: Valores de investimento para conversão e tratamento de biometano.
Fonte: EPE, 2018.

Além da parcela variável, é necessário adicionar o valor da parcela não sujeita aos efeitos de escala, este valor foi estimado em 99,00 R\$/m³. Logo, o valor total do investimento em R\$/m³ é dado com a somatória da parcela variável com a fixa. A equação 12 ilustra o custo de investimento final.

$$C_{inv} = C_{variavel} + C_{Fixo} \quad (12)$$

Onde, C_{inv} = Custo do Investimento (R\$/m³); $C_{variavel}$ = Parcela variável (R\$/m³); C_{Fixo} = Parcela fixa (99,00 R\$/m³).

Para o cálculo, foi considerado o biometano em CNTP.

O valor de investimento é obtido pela equação (13).

$$I = C_I * C_{inv} \quad (13)$$

Onde, I = Investimento (R\$); C_I = Capacidade Instalada (m³/dia); C_{inv} = Custo do Investimento (R\$/m³)

Para os custos anuais de Operação e Manutenção (O&M), foi adotado como referência o valor apontado por Terraza e Willmumsen (2009), pelos quais este custo varia entre 17% e 21% do custo de investimento total. Neste trabalho, considerando um cenário mais conservador foi utilizado uma porcentagem de 21% dos custos totais de investimento.

4.2.2. Receita

Para fins de comparação, foi adotada duas formas distintas de cálculo de receita: a primeira considerou o preço de venda do gás natural aos postos automotivos do Brasil, esse valor foi encontrado no Boletim Mensal do Acompanhamento da Indústria de Gás Natural publicado pelo Ministério de Minas e Energia (MME) para o mês de Junho de 2021; a segunda metodologia consistiu no levantamento da série histórica dos preços da venda de gás natural divulgados mensalmente, sendo que esses preços são obtidos por meio da média do valor de cada contrato de venda de gás natural às distribuidoras e consumidores livres

Para a obtenção da Receita da venda do combustível, é necessário determinar a precificação do biometano e também o volume útil anual que deverá ser vendido as distribuidoras. A receita anual, é então obtida por meio da fórmula 14.

$$Receita = Preço * Volume \text{ útil} \quad (14)$$

Onde: a receita dada em R\$; o Preço em R\$/MMbtu e o Volume útil em MMbtu/ano.

4.2.2.1. Precificação (1º Metodologia)

Como o biometano é um combustível análogo ao gás natural, com propriedades muito semelhantes, na sua precificação, considerou-se utilizar como referência o preço de venda do gás natural aos postos automotivos do Brasil.

Consultando o Boletim Mensal do Acompanhamento da Indústria de Gás Natural publicado pelo Ministério de Minas e Energia (MME) no mês de Junho de 2021 (MME, 2021), foi encontrado diversos valores da venda do gás natural para cada tipo de segmento. Estes valores podem ser observados na tabela 4. É importante destacar, que nestes valores já estão inclusos os tributos.

Para os segmentos industrial, residencial, comercial e automotivo para postos as precificações foram calculadas considerando a média simples dos preços aplicados pelas distribuidoras. Já o preço do segmento automotivo para consumidor final foi obtido a partir do Sistema de Levantamento de Preços (SLP) da ANP.

Tabela 4: Preço ao consumidor final (com tributos) junho, 2021.

	Preço ao consumidor final (com tributos) junho, 2021			
	Segmento	Faixa de Consumo	R\$/m ³	U\$/MMBtu
Preços de Distribuidoras	Industrial (m ³ /dia)	2.000	3,317	17,668
		20.000	2,868	15,274
		50.000	2,801	14,919
	Residencial (m ³ /mês)	12	6,163	32,826
	Comercial (m ³ /mês)	800	4,665	24,848
	Automotivo (Postos)	Faixa única	2,844	15,148
ANP	Automotivo (Consumidor final)	Faixa única	3,876	20,645

Fonte: MME, 2021.

O valor que mais se enquadra na proposta deste trabalho é o da venda aos postos automotivos. Então, consultando todos os Boletins Mensais do Acompanhamento da Indústria de Gás Natural do ano de 2021, já publicados, foram encontrados os valores médios da venda de gás natural deste segmento (posto automotivos), conforme mostrado na tabela 5. O valor adotado para o trabalho foi o de 2,404 R\$/m³.

Tabela 5: Preço ao consumidor final (com tributos) do segmento automotivo dos meses de janeiro à junho do ano de 2021.

		Jan/21	Fev/21	Mar/21	Abr/21	Mai/21	Jun/21	Média
Automotivo (Postos)	R\$/m ³	2,262	2,318	2,350	2,365	2,763	2,365	2.404
	U\$/MMBtu	11,325	11,471	11,158	11,401	14,002	11,401	11.793
Automotivo (Consumidor final)	R\$/m ³	3,187	3,207	3,262	3,276	3,834	3,276	3.340
	U\$/MMBtu	15,952	15,874	15,489	15,791	19,427	15,791	16.387

Fonte: Adaptado de MMEa, 2021; MMEb, 2021, MMEc, 2021; MMEd, 2021; MMEd, 2021; MMEe, 2021; MMEf, 2021.

4.2.2.2. Precificação (2º Metodologia)

Como o biometano é um combustível análogo ao gás natural, com propriedades muito semelhantes de forma que, para a sua precificação, utilizou-se o preço de venda do gás natural. Em consulta ao Site da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (BRASIL/ANP, 2021) encontrou-se a série histórica dos preços divulgados mensalmente. Esses preços são obtidos por meio da média do valor de cada contrato de venda de gás natural às distribuidoras e consumidores livres, ponderada pela participação dos seus respectivos volumes comercializados dentro de cada região agregada.

Os tipos de mercado atendidos foram divididos em duas categorias: térmicos e não-térmicos. Os mercados térmicos são aqueles onde a venda do combustível é transferido diretamente a uma unidade térmica. Os demais mercados foram agregados na categoria não-térmica.

Além dessa diferenciação de mercado, estes contratos também são separados pela Região Agregada. No caso do mercado térmico, devido ao número reduzido de agentes envolvidos na comercialização, a agregação é realizada em apenas 2 categorias: Norte-Nordeste e Sudeste-Sul-Centro-Oeste; para o mercado não-térmico as regiões foram agregadas em Norte-Nordeste, Sudeste e Sul-Centro-Oeste. De acordo com a agência, essa discriminação geográfica é necessária pois fornece ao público a transparência na formação de preços e condições gerais de comercialização no mercado de GN no Brasil.

A série histórica divulgada abrange informações desde o mês de Setembro de 2019 até o mês de Julho de 2021. O valor das médias dos contratos é fornecido em R\$/MMBtu. A tabela 6 descreve estes valores.

Os preços divulgados são os valores finais de venda ao agente comprador incluindo os impostos incidentes sobre a venda do gás, tais como ICMS, PIS e COFINS.

É importante destacar, que os volumes médios comercializados são convertidos para os valores equivalentes às seguintes condições de referência do gás natural, ou seja: temperatura de 20°, pressão de 1,033 kgf/cm² e poder calorífico superior (PCS) igual a 9400 kcal/m³.

Tabela 6: Valor médio dos contratos de venda de gás natural entre os meses de Setembro de 2019 à Julho de 2021.

Data	Preços (R\$/MMBtu) - Regiões Agregadas				
	Térmico		Não Térmico		
	Norte-Nordeste	Sudeste-Sul-Centro-Oeste	Norte-Nordeste	Sudeste	Sul-Centro-Oeste
set/19	19,0	18,80	48,50	48,80	40,10
out/19	18,9	21,90	48,60	47,80	38,00
nov/19	19,1	24,60	47,20	47,20	39,20
dez/19	19,0	19,70	47,30	46,90	37,60
jan/20	19,2	23,80	43,90	42,60	38,10
fev/20	21,0	17,90	45,60	44,20	38,10
mar/20	29,1	18,70	44,50	46,40	41,10
abr/20	32,9	16,20	45,60	45,50	43,20
mai/20	34,5	19,50	40,80	42,40	39,00
jun/20	27,2	21,50	41,50	42,50	38,80
jul/20	26,3	21,70	41,30	39,60	38,20
ago/20	25,8	21,00	32,70	34,50	30,80
out/20	20,6	28,10	31,10	34,40	31,30
nov/20	20,4	31,40	41,30	41,00	41,40
dez/20	20,1	35,30	40,90	40,70	41,20
jan/21	20,8	32,30	42,00	41,80	41,10
fev/21	23,2	33,30	42,50	42,50	43,00
mar/21	38,0	38,90	42,70	42,90	43,30
abr/21	31,8	31,30	42,50	44,40	43,60
mai/21	23,1	31,30	54,50	55,80	59,70
jun/21	22,5	38,60	53,10	57,00	60,10
jul/21	21,8	46,10	53,90	58,80	60,20
Média		26,77	43,69	44,41	41,66

Fonte: Adaptado de BRASIL/ANP, 2021.

Por meio do uso da Série Histórica, é então calculada a média do valor do gás natural para o mercado não térmico da Região Sudeste. A média obtida corresponde ao valor adotado do preço de venda do biometano utilizado neste trabalho.

4.2.2.3. Volume útil

É sabido que parte do volume de biometano gerado nos aterros sanitários são “perdidos” durante o seu processo de purificação. Entretanto, esse percentual “perdido” deve ser considerado no cálculo do volume, para uma maior correspondência com a realidade.

Para encontrar o valor útil anual de biometano produzido, ou seja, o real volume que será vendido as distribuidoras, foi considerada uma eficiência de purificação do metano de 70% e um fator de disponibilidade da unidade de tratamento de 92%, esses valores foram retirados da Nota Técnica da EPE, 2018.

A fórmula utilizada para obtenção do volume útil é dada em (15)

$$V_{\text{útil}} = V_{\text{gerado}} * FD * Ef \quad (15)$$

Onde: $V_{\text{útil}}$ = Volume útil (m^3/ano); V_{gerado} = Volume gerado (m^3/ano); FD = Fator de Disponibilidade (valor adotado de 92%); Ef = Eficiência de purificação (valor adotado de 70%).

Como o Volume útil encontrado é dado em m^3/ano e a precificação do biometano na 2ª metodologia é em R\$/MMbtu, é necessário converter o volume em m^3/ano para MMbtu/Ano. Para isso, basta dividir o volume (m^3/ano) por um fator de conversão.

Para a obtenção do fator de conversão foi considerado que o biometano tem o mesmo potencial energético que o gás natural, logo o fator de conversão utilizado é o em relação ao gás natural.

Segundo dados da CEGÁS (2021), 1 MMBTU equivale a 26,8 m^3 de gás natural (considerando um Poder calorífico superior (PCS) de 9.400 Kcal, nas condições de temperatura e pressão de 20°C e 1 atm, respectivamente).

Logo, o volume útil de biometano dado em MMbtu/ano é calculado pela equação 16.

$$V_{\text{útil}} \left(\frac{\text{MMbtu}}{\text{ano}} \right) = \frac{V_{\text{útil}} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{ano}} \right)}{Fc \left(\frac{\text{m}^3}{\text{MMbtu}} \right)} \quad (16)$$

Onde: Fc = Fator de conversão, o valor adotado é de 26,8 m^3/MMbtu .

4.3. Emissões de GEEs evitadas

Segundo recomendações do IPCC (1997), a emissão de GEEs, é calculada pelo produto de um dado de atividade por um fator de emissão adequado (Equação 17). Para este trabalho, o dado de atividade é a quantidade de combustível (biometano) gerado pelos aterros sanitários. Segundo Relatório publicado pela ICCT (2021), o fator de emissão médio do biometano produzido a partir de aterro sanitários é $-30 \text{ gCO}_{2\text{eq}}/\text{MJ}$, enquanto que para o óleo diesel o fator de emissão é de $74 \text{ gCO}_{2\text{eq}}/\text{MJ}$ (DONES et al, 2004 *apud* IPCC/OECD/IEA, 1996).

$$E_g = \text{Cons.} * FE \quad (17)$$

Onde: E_g = emissão de GEE ($\text{gCO}_{2\text{eq}}$); Cons. = Consumo de combustível (MJ) e FE = Fator de emissão ($\text{gCO}_{2\text{eq}}/\text{MJ}$)

Para verificar o quanto se deixa de emitir caso fosse utilizado o biometano para abastecimento veicular em substituição do óleo diesel, em um primeiro momento, é necessário calcular a equivalência energética entre estes dois combustíveis, ou seja, o quanto de óleo diesel é correspondente ao volume gerado de biometano pelos aterros sanitários. Para isso, basta dividir o volume útil de biometano pelo fator de conversão equivalente (Equação 18).

Para isso, foi considerado que o biometano, também denominado gás natural renovável, possui a mesma equivalência energética do gás natural.

A tabela 7 retirado do CEGÁS (2021) demonstra os diversos fatores de conversão para o gás natural.

Tabela 7: Fatores de Conversão de alguns combustíveis para o gás natural.

COMBUSTÍVEL	UNIDADE	FATOR DE CONVERSÃO
Gás Natural	m^3	1,00
Gás Liquefeito de petróleo – GLP	kg	1,27
Óleo Diesel	litro	1,08
Lenha	kg	0.35
Óleo combustível BPF	kg	1,08
Carvão Vegetal	kg	0,72
Querosene	litro	0,8834
Energia Elétrica	kWh	0,0915
Carvão Mineral Nacional (4500 kcal/kg)	kg	0,48
Barril de Petróleo*	litro	150

Fonte: CEGÁS, 2021.

$$V_{\text{diesel}} (\text{litro}) = \frac{V_{\text{gás natural}} (\text{m}^3)}{FC_{\text{diesel}}} \quad (18)$$

Obtendo o valor correspondente de óleo diesel em litro, é necessário obter os valores de biometano e de óleo diesel em MJ, pois é esta a unidade de medida utilizada na fórmula 18. Para isso, multiplica-se o volume de combustível pelo seu PCS. Segundo dados da COPERGÁS (2021), o PCS do óleo diesel e do gás natural é de 9.159 Kcal/l e 9.400 Kcal/m³, respectivamente.

Logo, a quantidade de combustível em MJ é expressada pela equação 19:

$$\text{Combustível (MJ)} = \text{Volume Combustível} * \text{PCS} * 4,1868 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kcal}} \right) * 1000 \left(\frac{\text{Mega}}{\text{Kilo}} \right) \quad (19)$$

Aplicando a equação (19) para os volumes de combustível encontrados em MJ e para seus respectivos fatores de emissão, obtém-se valores de emissão de GEEs para os combustíveis em análise (biometano e óleo diesel).

Dessa forma, a quantidade de emissão de GEEs evitados é igual a diferença entre a emissão da queima de óleo diesel pela da de biometano.

5. RESULTADOS

5.1 Projeção Populacional

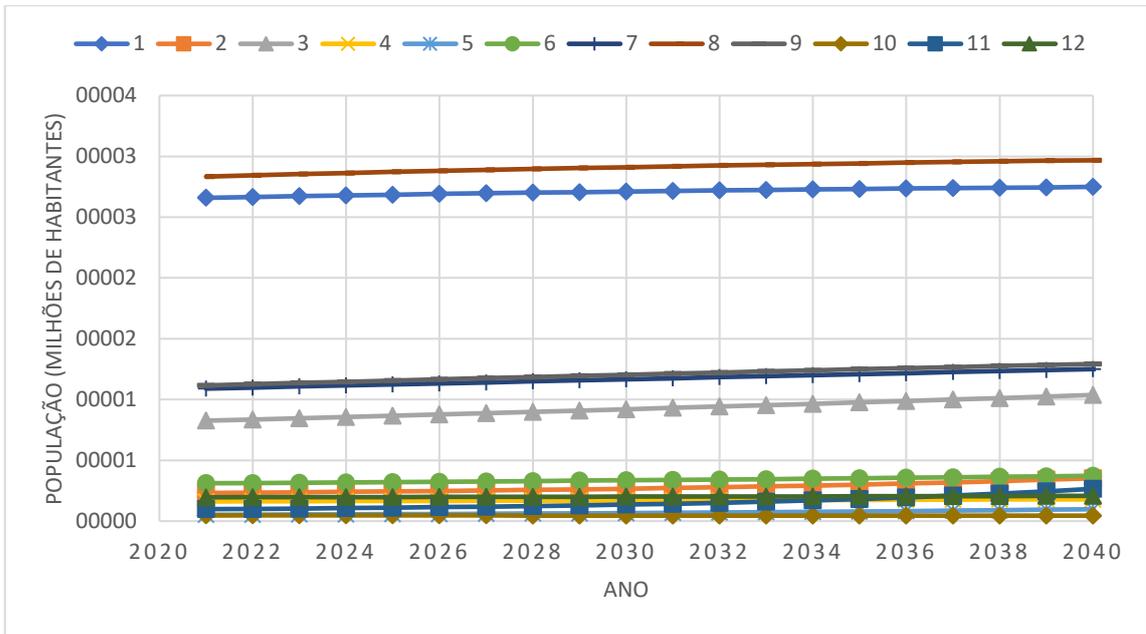
Para o Estado de São Paulo foram encontrados 12 consórcios de aterros sanitários com 95 cidades pertencentes a estes aterros; para o estado de Espírito Santo, o total de aterros foi de apenas 3 enquanto que o número de cidades foram de 64; para Minas Gerais o total de aterros foi de 28 e o de cidades 307 e por último, para o estado do Rio de Janeiro o número de aterros foi de 7 e o de cidades 42.

A partir dos dados do IBGE dos anos de 1991, 2000 e 2010 e da metodologia apresentada, construiu-se a projeção populacional para todos os municípios dos consórcios estudados. Somando os habitantes das cidades pertencentes a cada um dos aterros, foi obtido a projeção populacional para cada aterro.

As Figuras 22, 23, 24 e 25 apresentam as projeções populacionais de todos os consórcios de aterros sanitários para um período de 20 anos.

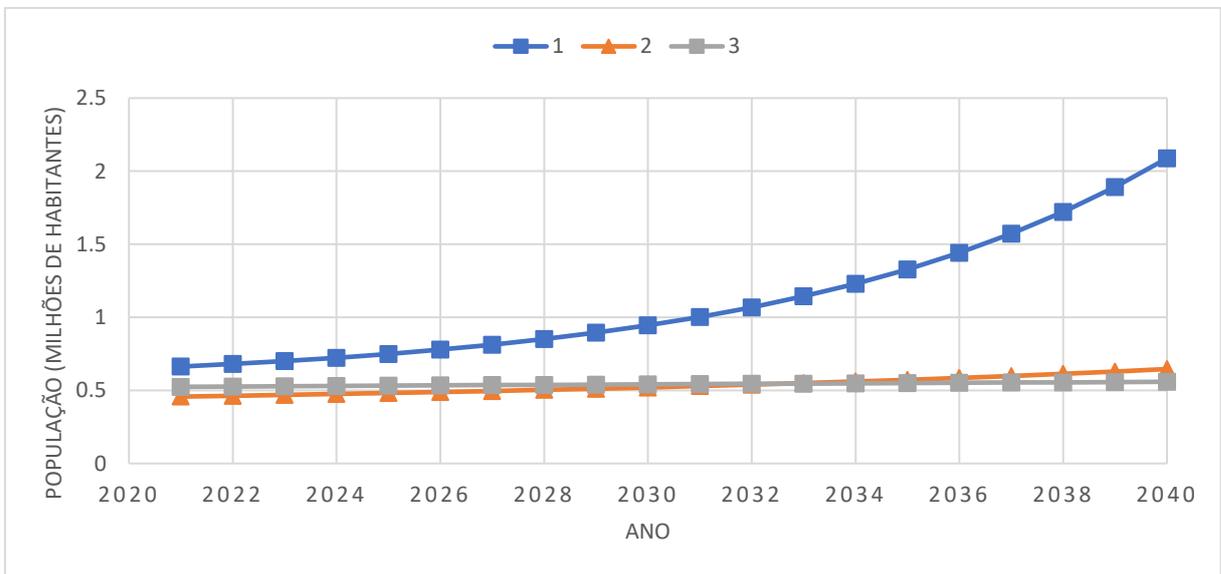
Para os aterros do estado de São Paulo, vemos que apenas dois aterros (Consórcio CONDEMAT e ABC) se encontram na faixa entre 2,5 a 3,0 milhões de habitantes; três consórcios se encontram entre uma projeção populacional de 800 mil a 1,5 milhões e o restante abaixo dos 500 mil habitantes.

No estado do Espírito Santo, merece destaque o consórcio Condoeste que apresentou uma população final (ano 2040) cerca de 5 vezes superior à sua projeção inicial (ano 2021). Para o Rio de Janeiro apenas Consórcio FLUMINENSE apresentou uma projeção populacional superior a 1 milhão de habitantes os outros consórcios não ultrapassaram os 500.000 habitantes. Para o Estado de Minas Gerais, apesar de ser o Estado com um maior número de aterros sanitários e de municípios participantes, apenas três consórcios (Consórcio COMPARESOLURB, CIDES e CODANORTE) apresentaram uma projeção populacional com mais de 1.000.000 de habitantes.



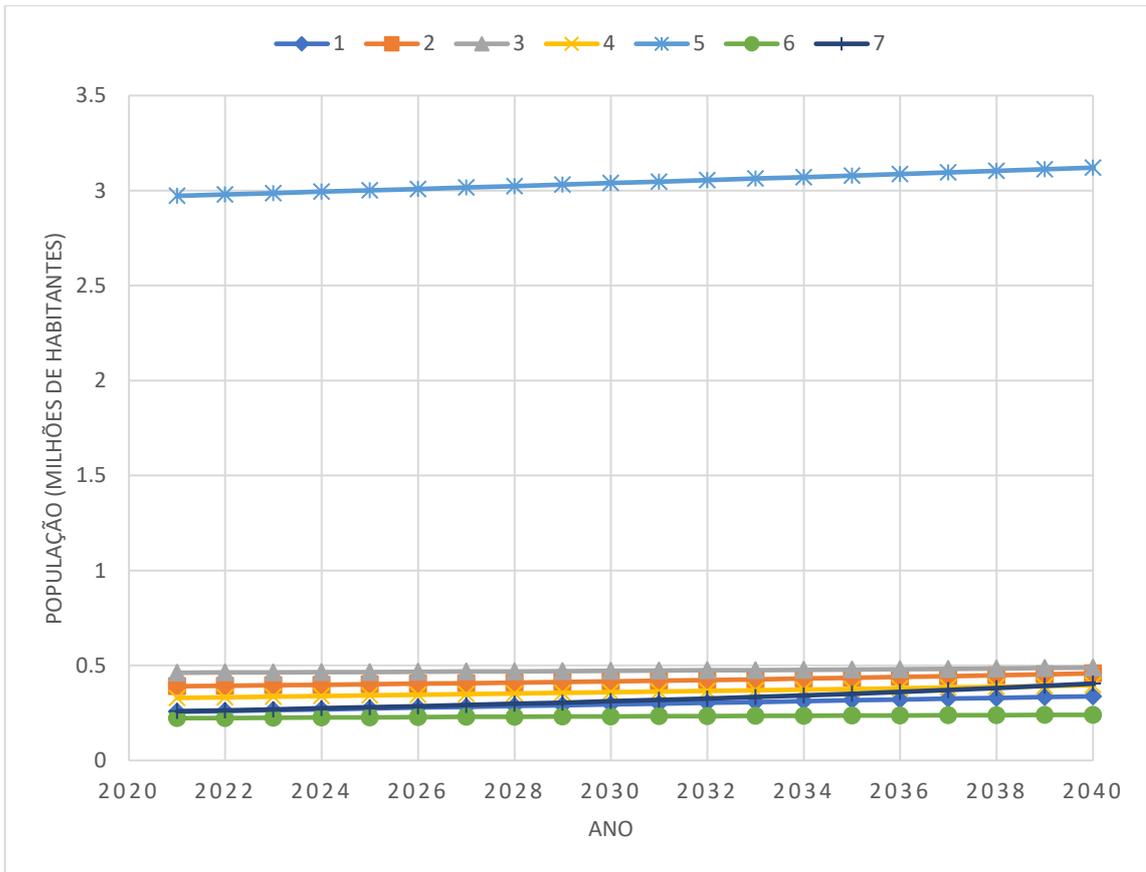
*1: Consórcio ABC; 2: Consórcio AMVAPA; 3: Consórcio CIAS; 4: Consórcio CIDAS; 5: Consórcio CIPP; 6: Consórcio CISBRA; 7: Consórcio CONSIMARES; 8: Consórcio CONDEMAT; 9: Consórcio CONISUD; 10: Consórcio CONTRALIX; 11: Consórcio INTEGRAÇÃO; 12: Consórcio SIGEINRES.

Figura 22: Projeção populacional dos consórcios de aterros do Estado de São Paulo.



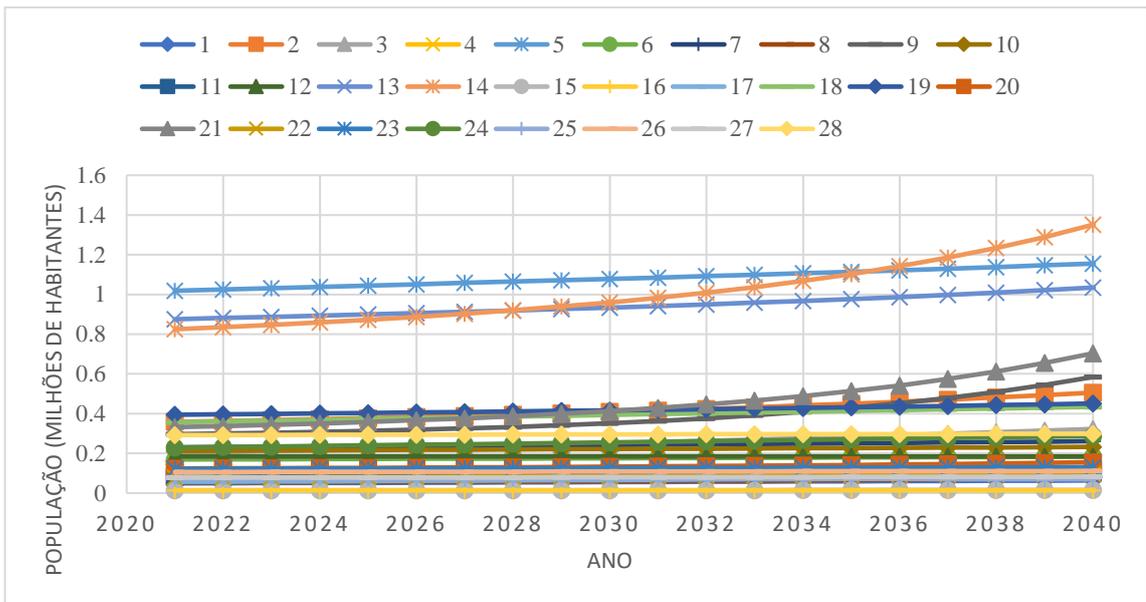
*1: Consórcio CONDOESTE; 2: Consórcio CONORTE e 3: Consórcio CONSUL.

Figura 23: Projeção populacional dos consórcios de aterros do Estado de Espírito Santo.



*1: Consórcio LAGOS 1; 2: : Consórcio CPGRS NOROESTE; 3: Consórcio SERRANAS 2; 4: Consórcio CENTRO SUL; 5: Consórcio FLUMINENSE; 6: Consórcio VALE DO CAFÉ; 7: Consórcio SERRANA 1.

Figura 24: Projeção populacional dos consórcios de aterros do Estado Do Rio de Janeiro.



*1: Consórcio 4 AMBIENTAL; 2: Consórcio CIAMESF; 3: Consórcio CIAS CENTRO OESTE; 4: Consórcio CIKANASTRA; 5: Consórcio CIDES; 6: Consórcio CIDESSEA; 7: Consórcio CIGEDAS; 8: Consórcio CIGRSES; 9: Consórcio CIMAJE; 10: Consórcio CIMASAS; 11: Consórcio CIMFAS; 12: Consórcio CIRSU; 13: Consórcio CODANORTE; 14: Consórcio COMPARESOLURB; 15: Consórcio CONCASS; 16: Consórcio

CONRESOL; 17: Consórcio Intermunicipal do Alto e Médio Carangola para a Gestão de Resíduos Sólidos; 18: Consórcio CONVALE; 19: Consórcio CONVALES NOROESTE DE MINAS; 20: Consórcio CORESAB BOA VISTA; 21: Consórcio CORESAB CENTRAL DE MINAS; 22: Consórcio CPGIRS; 23: Consórcio CPGRS MEDIO PIRACICABA; 24: Consórcio ECOTRES; 25: Consórcio Entorno de Salinas; 26: Consórcio REGIAO ALTO RIO PARDO; 27: Consórcio RIDES; 28: Consórcio UNIAO DA SERRA GERAL.

Figura 25: Projeção populacional dos consórcios de aterros do Estado de Minas Gerais.

A figura 26 demonstra o número de contribuintes por Estado da Região Sudeste. Percebe-se, que o Estado que apresentou uma maior projeção populacional é o de São Paulo, seguido por Minas Gerais, Rio de Janeiro e Espírito Santo.

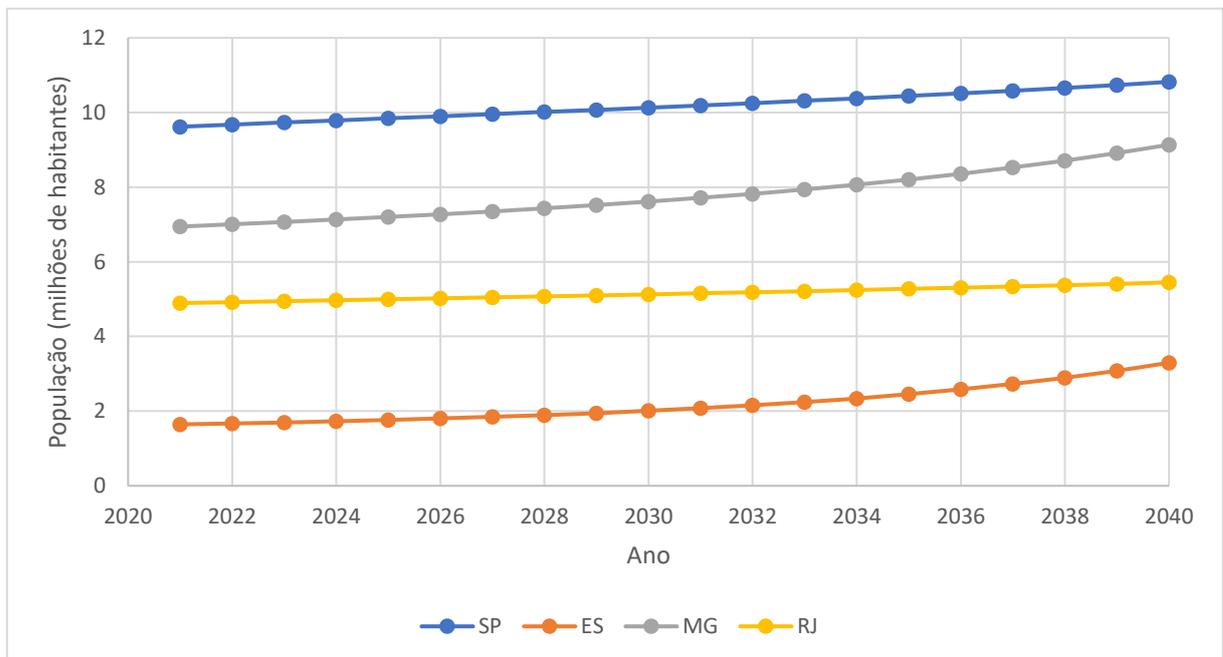


Figura 26: Projeção populacional das cidades analisadas por Estado da Região Sudeste.

5.2. Geração de Biometano

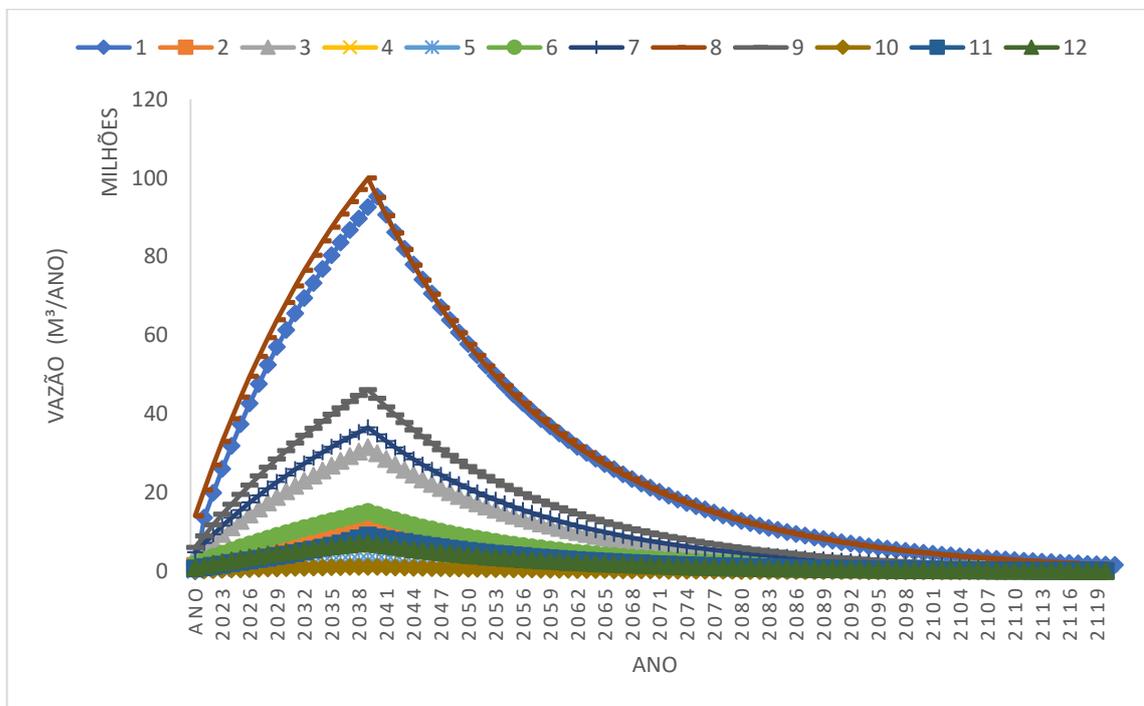
Com a projeção populacional estimada e com dos dados de geração de resíduos per capita de cada cidade analisada, foi então calculado a geração de metano para estas cidades, para um potencial de geração de metano adotado de $170 \text{ m}^3/\text{kg}$ e uma taxa de decaimento de $0,05/\text{ano}$.

A geração de metano (m^3) obtida destes aterros podem ser vistos nas figuras 27, 28, 29 e 30.

O resultado esperado é uma maior geração de metano para os aterros com um maior número de contribuintes (habitantes). Essa relação não ocorreu no Estado de Minas Gerais, já

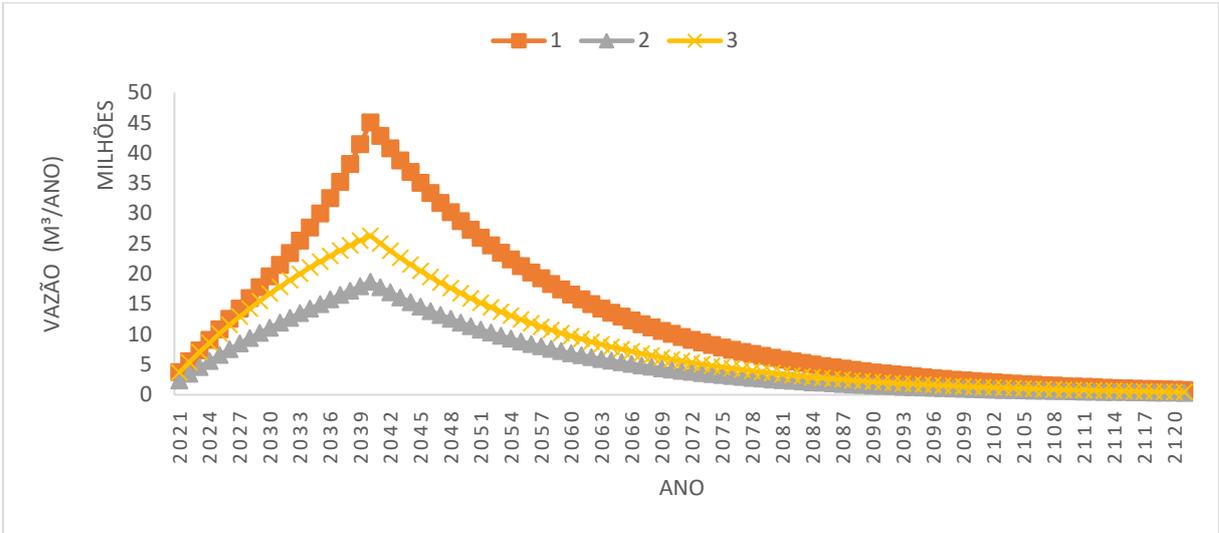
que, o aterro que apresentou um maior potencial de geração de metano (CIDES) apresentou a terceira maior projeção populacional. Isso ocorreu, pois, a taxa de geração *percapita* de resíduos das cidades contribuintes deste aterro é muito superior aos dos outros consórcios.

Fazendo um comparativo entre os estados, observa-se que o estado de maior potencial de geração de biometano entre o período de 2021 a 2040 é o de São Paulo, seguido pelo de Minas Gerais, Rio de Janeiro e por último, Espírito Santo que apresentaram um potencial de 2,88; 2,11; 2,01 e 0,64 milhões de toneladas de m^3 , respectivamente. Como é possível observar na figura 26, este é o resultado esperado, pois é também essa a ordem de Estados com a maior projeção populacional de contribuintes das cidades analisadas neste trabalho.

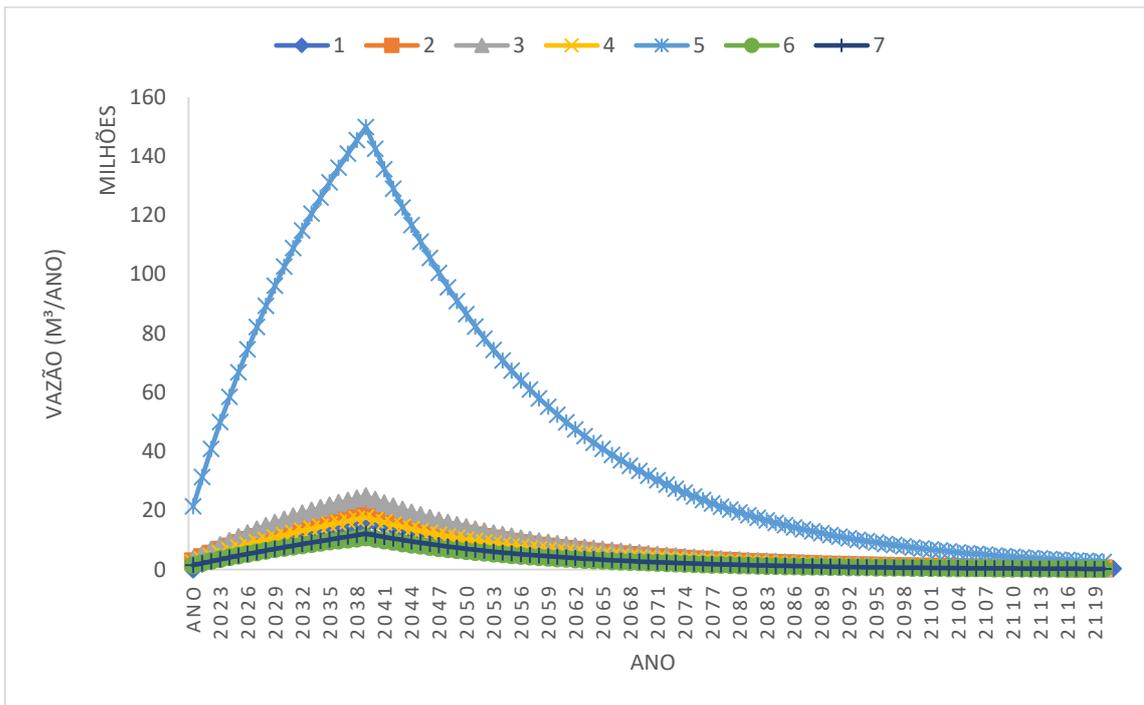


*1: Consórcio ABC; 2: Consórcio AMVAPA; 3: Consórcio CIAS; 4: Consórcio CIDAS; 5: Consórcio CIPP; 6: Consórcio CISBRA; 7: Consórcio CONSIMARES; 8: Consórcio CONDEMAT; 9: Consórcio CONISUD; 10: Consórcio CONTRALIX; 11: Consórcio INTEGRAÇÃO; 12: Consórcio SIGEINRES.

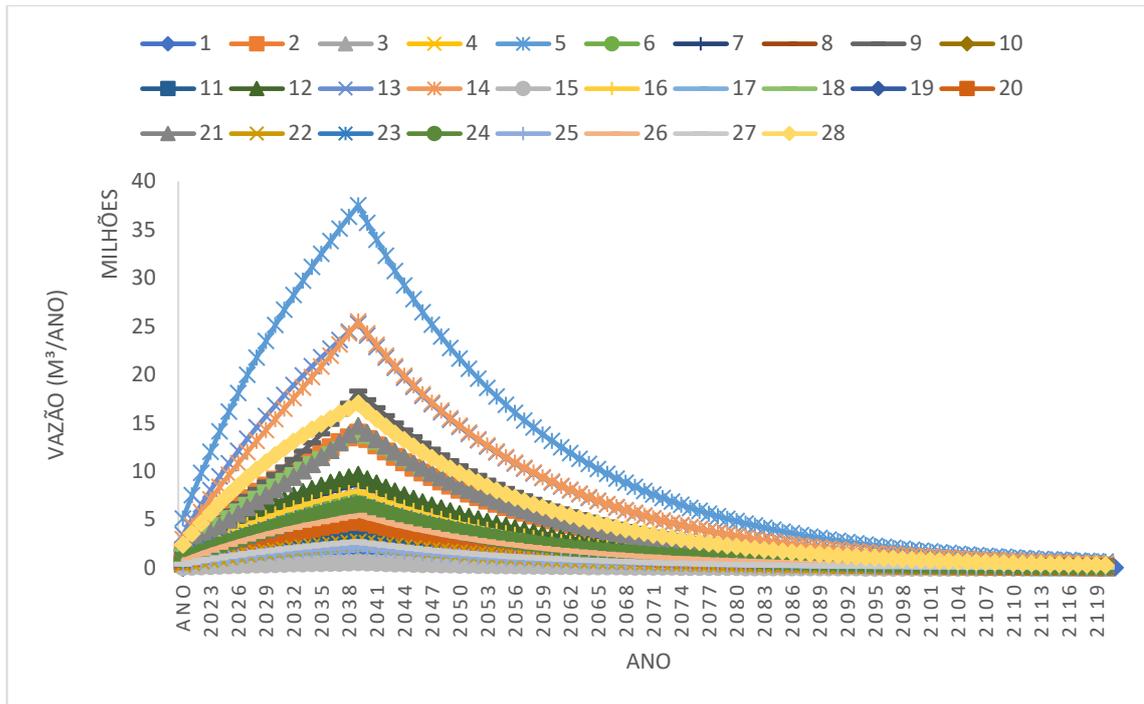
Figura 27: Vazão de metano (m^3) dos consórcios de aterros do Estado de São Paulo.



*1: Consórcio CONDOESTE; 2: Consórcio CONORTE e 3: Consórcio CONSUL.
 Figura 28: Vazão de metano (m³) dos consórcios de aterros do Estado de Espírito Santo.



*1: Consórcio LAGOS 1; 2: : Consórcio CPGRS NOROESTE; 3: Consórcio SERRANAS 2; 4: Consórcio CENTRO SUL; 5: Consórcio FLUMINENSE; 6: Consórcio VALE DO CAFÉ; 7: Consórcio SERRANA 1.
 Figura 29: Vazão de metano (m³) dos consórcios de aterros do Estado Do Rio de Janeiro.



*1: Consórcio 4 AMBIENTAL; 2: Consórcio CIAMESF; 3: Consórcio CIAS CENTRO OESTE; 4: Consórcio CIKANASTRA; 5: Consórcio CIDES; 6: Consórcio CIDESSEA; 7: Consórcio CIGEDAS; 8: Consórcio CIGRESS; 9: Consórcio CIMAJE; 10: Consórcio CIMASAS; 11: Consórcio CIMFAS; 12: Consórcio CIRSU; 13: Consórcio CODANORTE; 14: Consórcio COMPARESOLURB; 15: Consórcio CONCASS; 16: Consórcio CONRESOL; 17: Consórcio Intermunicipal do Alto e Médio Carangola para a Gestão de Resíduos Sólidos; 18: Consórcio CONVALE; 19: Consórcio CONVALES NOROESTE DE MINAS; 20: Consórcio CORESAB BOA VISTA; 21: Consórcio CORESAB CENTRAL DE MINAS; 22: Consórcio CPGIRS; 23: Consórcio CPGRS MEDIO PIRACICABA; 24: Consórcio ECOTRES; 25: Consórcio Entorno de Salinas; 26: Consórcio REGIAO ALTO RIO PARDO; 27: Consórcio RIDES; 28: Consórcio UNIAO DA SERRA GERAL.

Figura 30: Vazão de metano (m³) dos consórcios de aterros do Estado de Minas Gerais.

5.3. Análise de viabilidade econômica

5.3.1 1ª Metodologia de Precificação

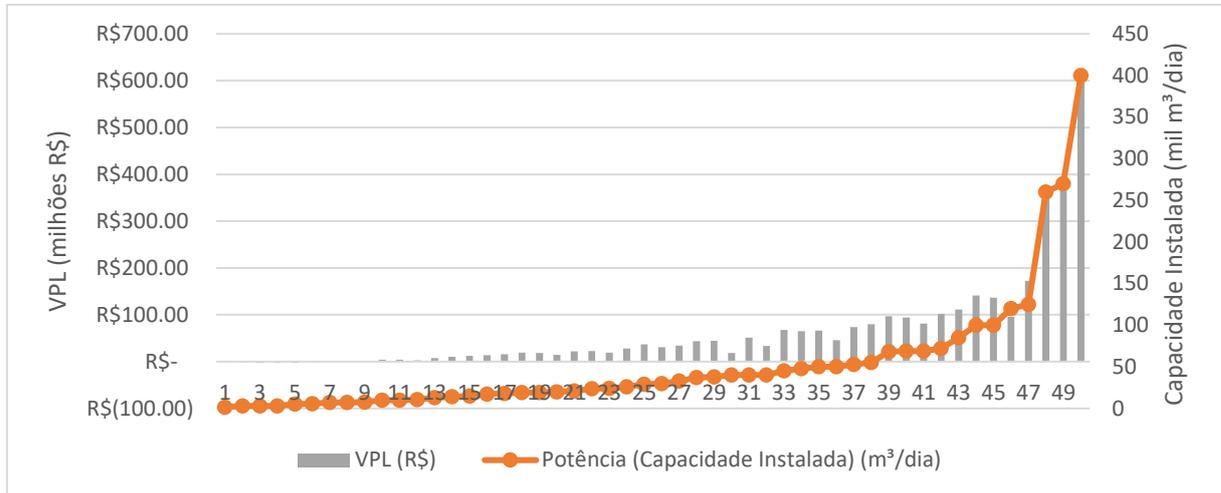
Os valores encontrados do VPL para a metodologia apresentada, considerando o tempo de projeto de 20 anos, a uma taxa de juros anual de 10% pode ser visto na figura 31.

Para capacidades instaladas inferiores a 5.500 m³/dia o VPL obtido foi negativo (figura 32), indicando a inviabilidade econômica para estes projetos.

De uma maneira geral, como é demonstrado na figura 33, quanto maior a capacidade instalada maior foi o VPL encontrado.

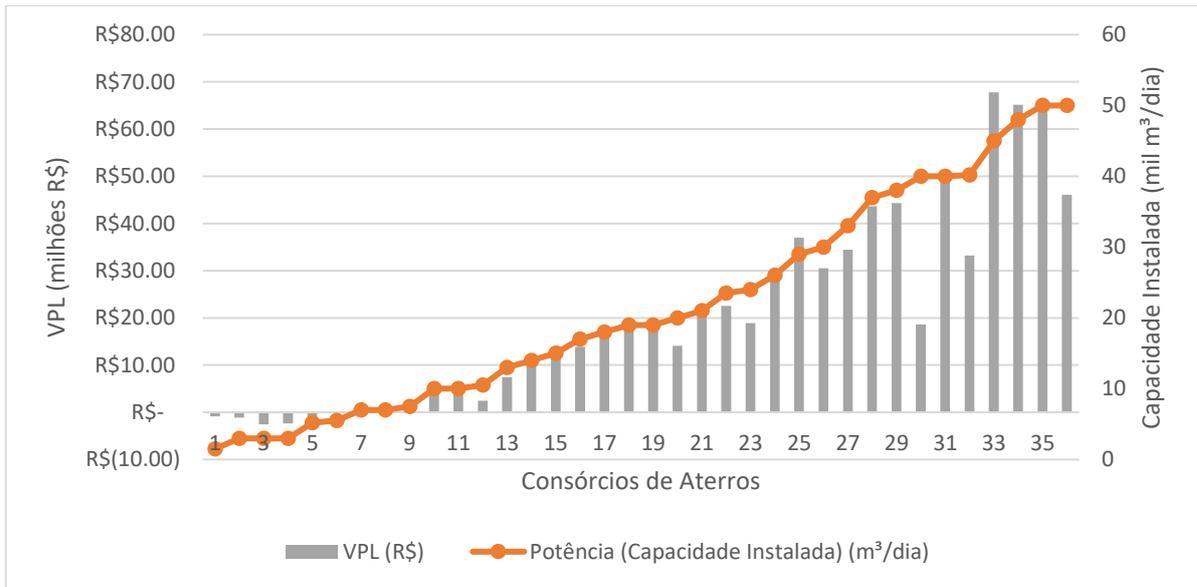
Os aterros que apresentaram uma inviabilidade econômica para o aproveitamento energético do biometano, foram CONCASS, CONTRALIX, 4 Ambiental, CIGRESS, Alto e Médio Carangola e Entorno de Salinas. Apenas um deles é pertencente ao Estado de São Paulo (CONTRALIX) e o restante ao estado de Minas Gerais.

Para os Estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo, todos os consórcios de aterros sanitários apresentaram uma viabilidade econômica para o aproveitamento energético de biometano como combustível veicular.



*1: Consórcio CONCASS; 2: Consórcio CONTRALIX; 3: Consórcio 4 Ambiental; 4: Consórcio CIGRESS; 5: Consórcio Alto e Médio Carangola; 6: Consórcio ENTORNO DE SALINAS; 7: Consórcio CPGIRS; 8: Consórcio RIDES; 9: Consórcio CIPP; 10: Consórcio CICANASTRA; 11: Consórcio CPGIRS MÉDIO PIRACICABA; 12: Consórcio CIMFAS; 13: Consórcio CORESAB BOA VISTA; 14: Consórcio REGIÃO DO ALTO RIO PARDO; 15: Consórcio CIMASAS; 16: Consórcio ECOTRES; 17: Consórcio CIDAS; 18: Consórcio SIGEINRES; 19: Consórcio CIDESEA; 20: Consórcio CIAS CENTRO OESTE; 21: Consórcio CONRESOL; 22: Consórcio CIGEDAS; 23: Consórcio INTEGRAÇÃO; 24: Consórcio CIRSU; 25: Consórcio CPGRS VALE DO CAFÉ; 26: Consórcio AMVAPA; 27: Consórcio SERRANA 1; 28: Consórcio CONVALE; 29: Consórcio CIAMESF; 30: Consórcio CISBRA; 31: Consórcio LAGOS 1; 32: Consórcio CORESAB CENTRAL DE MINAS; 33: Consórcio UNIÃO DA SERRA GERAL; 34: Consórcio CPGRS CENTRO SUL; 35: Consórcio CONORTE; 36: Consórcio CIMAJE; 37: Consórcio CONVALES NOROESTE DE MINAS; 38: Consórcio CPGRS NOROESTE; 39: Consórcio CPGRS SERRANAS 2; 40: Consórcio CODANORTE; 41: Consórcio COMPARESOLURB; 42: Consórcio CONSUL; 43: Consórcio CIAS; 44: Consórcio CIDES; 45: Consórcio CONSIMARES; 46: Consórcio CONDOESTE; 47: Consórcio CONISUD; 48: Consórcio ABC; 49: Consórcio CONDEMAT; 50: Consórcio BAIXADA FLUMINENSE.

Figura 31: VPL e Capacidade Instalada dos Consórcios de Aterros Sanitários – 1º Cenário.



*1: Consórcio CONCASS; 2: Consórcio CONTRALIX; 3: Consórcio 4 Ambiental; 4: Consórcio CIGRESS; 5: Consórcio Alto e Médio Carangola; 6: Consórcio ENTORNO DE SALINAS; 7: Consórcio CPGIRS; 8: Consórcio RIDES; 9: Consórcio CIPP; 10: Consórcio CICANASTRA; 11: Consórcio CPGIRS MÉDIO PIRACICABA; 12 Consórcio CIMFAS; 13: Consórcio CORESAB BOA VISTA; 14 Consórcio REGIÃO DO ALTO RIO PARDO; 15: Consórcio CIMASAS; 16: Consórcio ECOTRES; 17: Consórcio CIDAS; 18: Consórcio SIGEINRES; 19: Consórcio CIDESEA; 20: Consórcio CIAS CENTRO OESTE; 21: Consórcio CONRESOL; 22: Consórcio CIGEDAS; 23: Consórcio INTEGRAÇÃO; 24: Consórcio CIRSU; 25: Consórcio CPGRS VALE DO CAFÉ; 26: Consórcio AMVAPA; 27: Consórcio SERRANA 1; 28: Consórcio CONVALE; 29: Consórcio CIAMESF; 30: Consórcio CISBRA; 31: Consórcio LAGOS 1; 32: Consórcio CORESAB CENTRAL DE MINAS; 33: Consórcio UNIÃO DA SERRA GERAL; 34: Consórcio CPGRS CENTRO SUL; 35: Consórcio CONORTE; 36: Consórcio CIMAJE.

Figura 32: VPL e Capacidade Instalada dos Consórcios de Aterros Sanitários com Capacidade Instalada Igual ou inferior a 500.000 m³/dia – 1º Cenário.

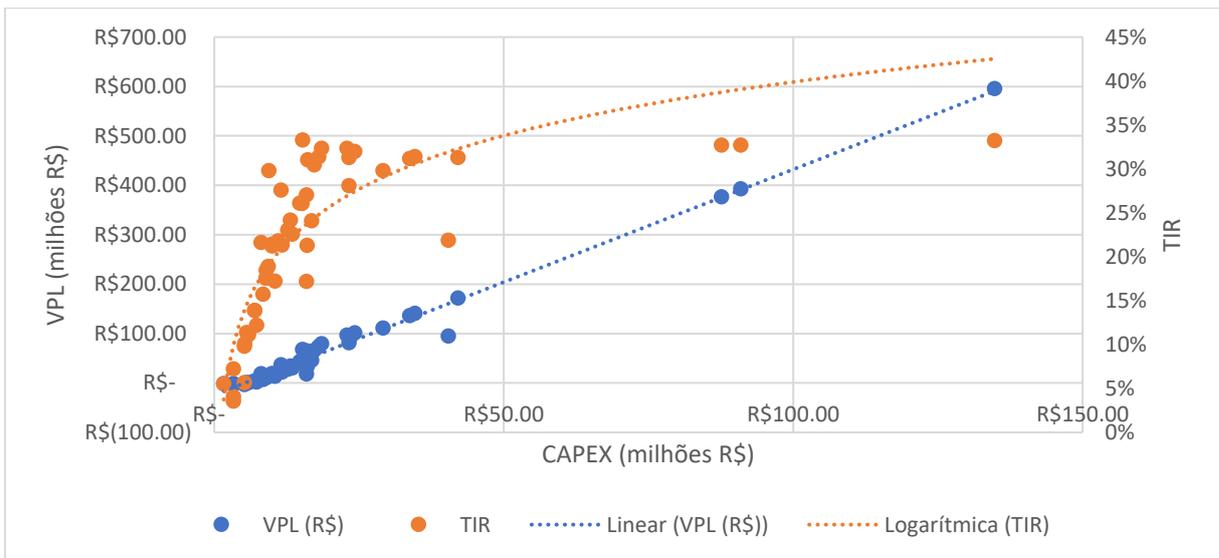


Figura 33: Relação entre VPL e TIR com o CAPEX dos projetos das usinas de produção de biometano – 1º Cenário.

A figura 33 relaciona o valor do investimento dos projetos (CAPEX) com os seus respectivos VPL e TIR, tal como observado na figura 31, quando maior a capacidade instalada (e conseqüentemente o CAPEX dos projetos) maior é o VPL. Essa relação CAPEX/VPL apresenta uma tendencia linear, enquanto que, como observa-se na figura 33, o TIR dos projetos, a partir de um CAPEX de R\$ 20 milhões se mantêm constante, cerca de 35%, independente do aumento do CAPEX.

Já a figura 34, relaciona a população no ano de 2040 com o VPL e com a capacidade instalada das usinas de purificação. De uma maneira geral, a viabilidade econômica acontece nesse cenário para uma população acima de 83.000 habitantes. Fatores como geração per capita de resíduo das cidades também é um fator decisivo para a viabilidade do projeto, esse fator é exemplificado pela figura 34, em que para a menor população final encontrada (13.798 habitantes) foi possível a viabilidade do projeto.

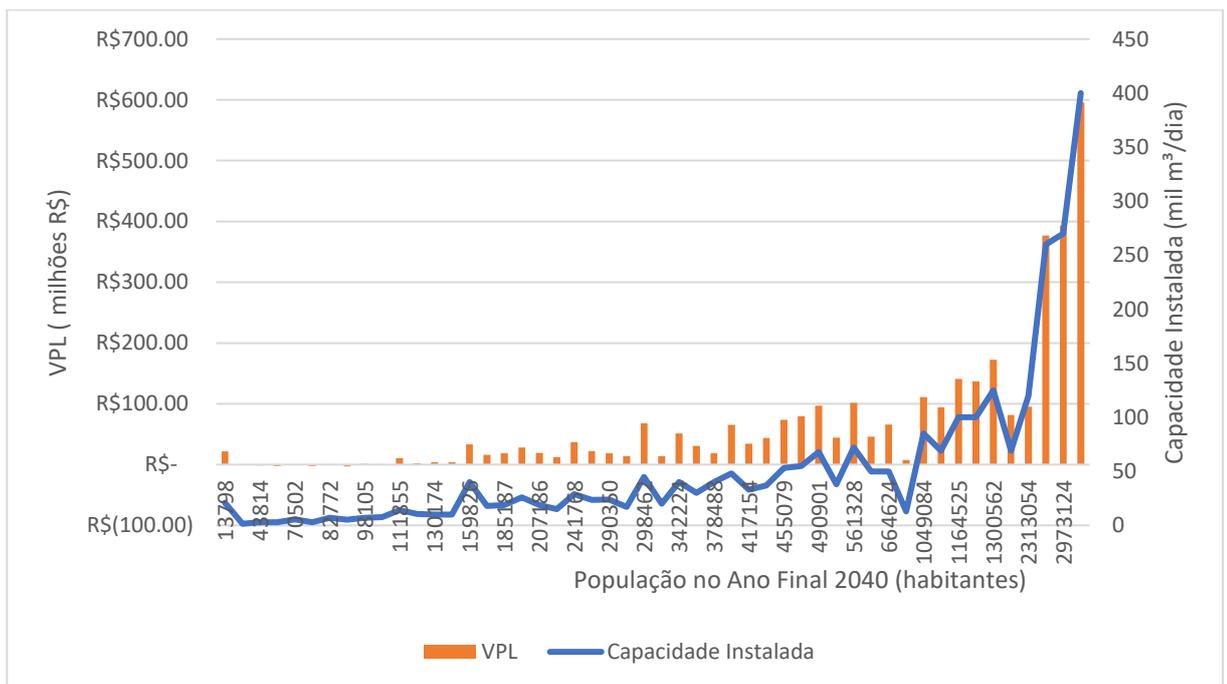


Figura 34: Relação entre População do ano 2040 com o VPL e com a capacidade instalada dos projetos das usinas de produção de biometano – 1º Cenário.

5.3.2. 2ª Metodologia de Precificação

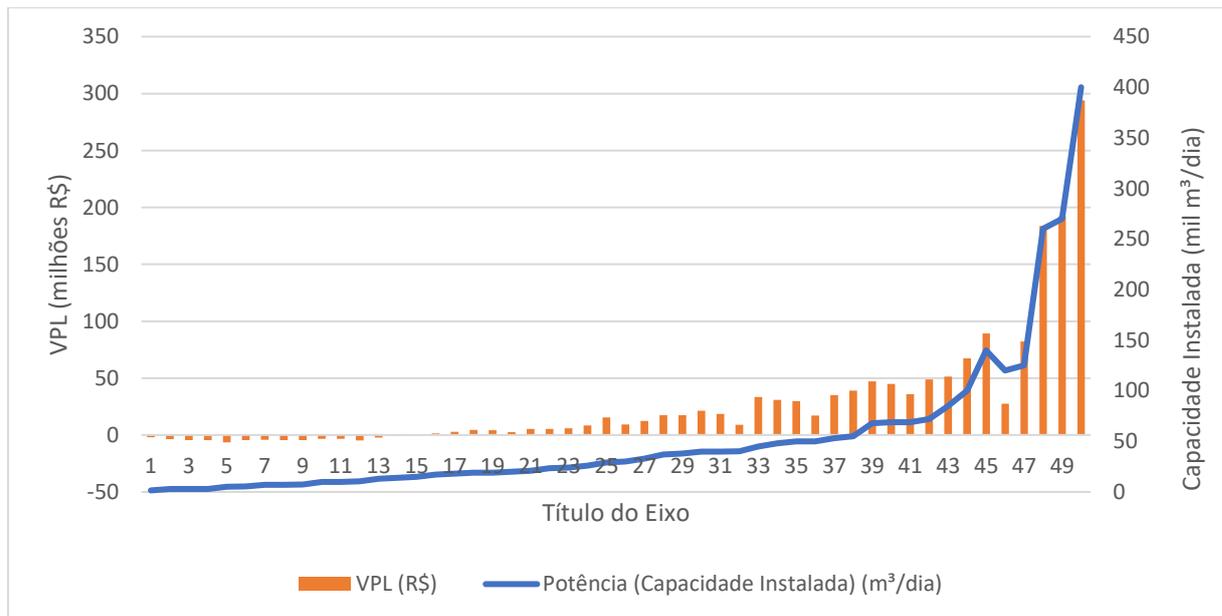
Com a figura 35, é possível observar a relação entre a capacidade instalada e VPL das usinas de purificação dos consórcios de aterros estudados. Os aterros que apresentaram um VPL negativo foram: Cipp; Contralix; 4 Ambiental; Cicanastra; Cigress; CIMFAS; Concass; Alto e Medio Carangola; Coresab Boa Vista; Cpgirs; Cpgirs Médio Piracicaba; Entorno de Salinas;

Região do Alto Rio Pardo e Rides. Estes aterros, apresentaram uma capacidade instalada de 7.500 m³/dia; 3.000 m³/dia; 3.000 m³/dia; 10.000 m³/dia; 3.000 m³/dia; 10.000 m³/dia; 3.000 m³/dia; 10.500 m³/dia; 5.200 m³/dia; 13.000 m³/dia; 7.000 m³/dia; 10.000 m³/dia; 5.500 m³/dia; 14.000 m³/dia; 7.000 m³/dia, respectivamente.

Na figura 36 é possível identificar que, para capacidades instaladas inferiores a 14.000 m³/dia, os aterros sanitários apresentaram um VPL negativo, ou seja, foram inviáveis economicamente.

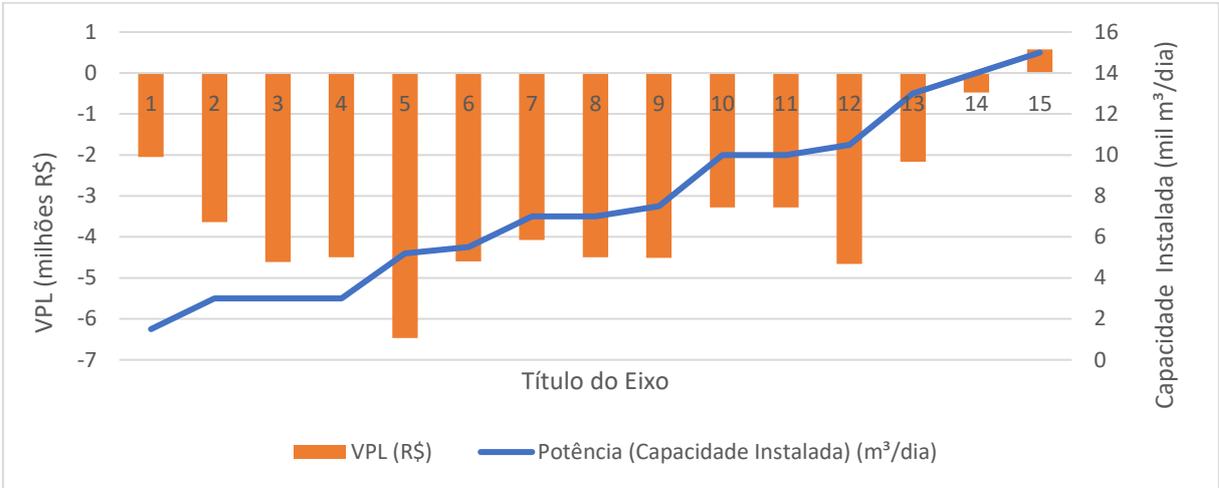
Fazendo a comparação entre as duas metodologias propostas de precificação, verifica-se que a venda de combustível direto aos postos de combustíveis garante uma viabilidade econômica para usinas de purificação com menores capacidades instaladas, cerca de 5.500 m³/dia, enquanto que, para a venda do biometano para mercados não térmicos a viabilidade passa a se tornar possível a partir de uma capacidade instalada de 14.000 m³/dia.

Logo, é mais vantajoso economicamente a venda do biometano diretamente aos postos de abastecimento.



*1: Consórcio CONCASS; 2: Consórcio CONTRALIX; 3: Consórcio 4 Ambiental; 4: Consórcio CIGRESS; 5: Consórcio Alto e Médio Carangola; 6: Consórcio ENTORNO DE SALINAS; 7: Consórcio CPGIRS; 8: Consórcio RIDES; 9: Consórcio CIPP; 10: Consórcio CICANASTRA; 11: Consórcio CPGIRS MÉDIO PIRACICABA; 12: Consórcio CIMFAS; 13: Consórcio CORESAB BOA VISTA; 14: Consórcio REGIÃO DO ALTO RIO PARDO; 15: Consórcio CIMASAS; 16: Consórcio ECOTRES; 17: Consórcio CIDAS; 18: Consórcio SIGEINRES; 19: Consórcio CIDESSEA; 20: Consórcio CIAS CENTRO OESTE; 21: Consórcio CONRESOL; 22: Consórcio CIGEDAS; 23: Consórcio INTEGRAÇÃO; 24: Consórcio CIRSU; 25: Consórcio CPGRS VALE DO CAFÉ; 26: Consórcio AMVAPA; 27: Consórcio SERRANA 1; 28: Consórcio CONVALE; 29: Consórcio CIAMESF; 30: Consórcio CISBRA; 31: Consórcio LAGOS 1; 32: Consórcio CORESAB CENTRAL DE MINAS; 33: Consórcio UNIÃO DA SERRA GERAL; 34: Consórcio CPGRS CENTRO SUL; 35: Consórcio CONORTE; 36: Consórcio CIMAJE; 37: Consórcio CONVALES NOROESTE DE MINAS; 38: Consórcio CPGRS NOROESTE; 39: Consórcio CPGRS SERRANAS 2; 40: Consórcio CODANORTE; 41: Consórcio COMPARESOLURB; 42: Consórcio CONSUL; 43: Consórcio CIAS; 44: Consórcio CIDES; 45: Consórcio CONSIMARES; 46: Consórcio CONDOESTE; 47: Consórcio CONISUD; 48: Consórcio ABC; 49: Consórcio CONDEMAT; 50: Consórcio BAIXADA FLUMINENSE.

Figura 35: VPL e Capacidade Instalada dos Consórcios de Aterros Sanitários 2º Cenário.



*1: Consórcio CONCASS; 2: Consórcio CONTRALIX; 3: Consórcio 4 Ambiental; 4: Consórcio CIGRESS; 5: Consórcio Alto e Médio Carangola; 6: Consórcio ENTORNO DE SALINAS; 7: Consórcio CPGIRS; 8: Consórcio RIDES; 9: Consórcio CIPP; 10: Consórcio CICANASTRA; 11: Consórcio CPGIRS MÉDIO PIRACICABA; 12 Consórcio CIMFAS; 13: Consórcio CORESAB BOA VISTA; 14 Consórcio REGIÃO DO ALTO RIO PARDO; 15: Consórcio CIMASAS.

Figura 36: VPL e Capacidade Instalada dos Consórcios de Aterros Sanitários com Capacidade Instalada Igual ou inferior a 500.000 m³/dia 2º Cenário.

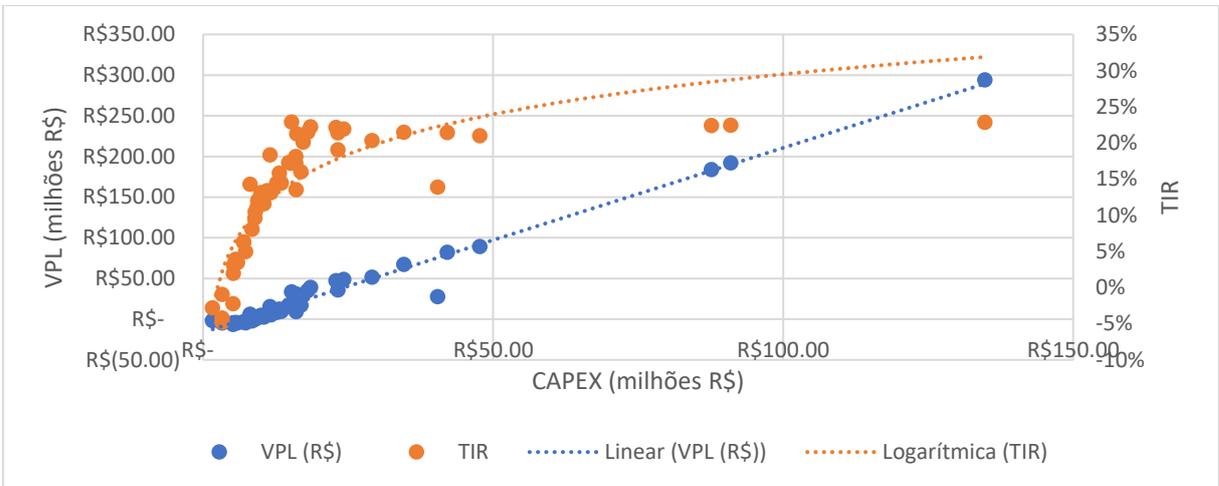


Figura 37: Relação entre VPL e TIR com o CAPEX dos projetos das usinas de produção de biometano 2º Cenário.

Já na figura 37, é possível ver a distribuição dos valores de VPL e das TIR encontradas para todos os aterros, em relação ao Investimento (CAPEX) adotado.

Tal como a 1ª metodologia adotada, o VPL em relação ao valor total do investimento apresenta uma linha de tendência linear, enquanto que a linha de tendência da TIR está mais próxima de uma projeção logarítmica. Os valores, entretanto, para a viabilidade destes projetos é que se diferem de uma metodologia para outra, já que, a receita obtida é diferente para cada caso.

Para esta metodologia, a TIR se estabiliza na faixa dos 20%, a partir de um CAPEX de R\$ 30 milhões.

Como a receita obtida pela primeira metodologia (venda de combustível diretamente aos postos de combustíveis) é superior a esta, é inevitável um maior valor dos VPLs e das TIRs encontradas, quando comparado aos resultados da 2ª metodologia.

A figura 38 relaciona a População do ano 2040 com o VPL e com a capacidade instaladas dos projetos. A viabilidade econômica acontece, de um modo geral, a partir de uma população de 160.000 habitantes, aproximadamente.

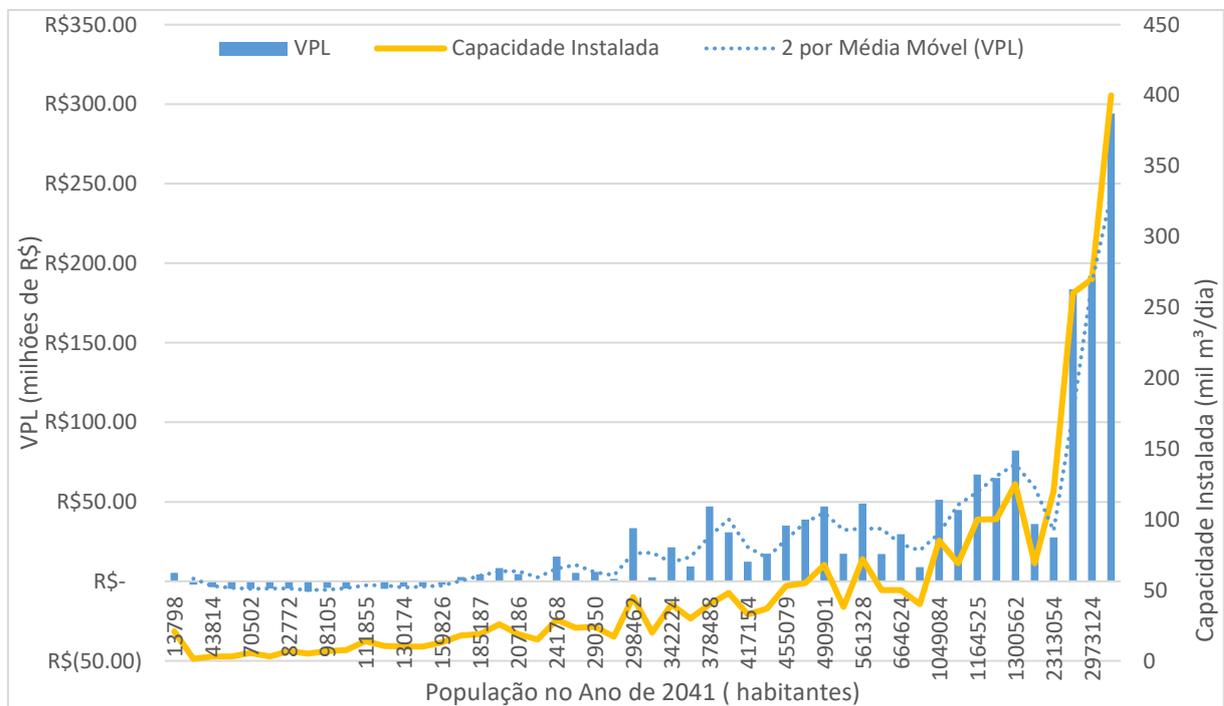


Figura 38: Relação entre População do ano 2040 com o VPL e com a capacidade instalada dos projetos das usinas de produção de biometano – 2º Cenário.

5.4. Emissões de GEEs evitadas

Como o fator de emissão de GEEs adotado para o biometano é negativo, ao utilizar este combustível considera-se que as emissões já estão sendo evitadas.

Ao comparar o óleo diesel com o biometano, considerando a substituição de um pelo outro, as emissões evitadas aumentam significativamente.

A tabela 8 ilustra a quantidade total produzida de biometano ao longo de 20 anos pelos aterros dos Estados da Região Sudeste do Brasil estudados neste trabalho, bem como a equivalência energética desta produção em óleo diesel.

Observa-se que, para o Estado de São Paulo, Minas Gerais, Rio de Janeiro e Espírito Santo as emissões evitadas de GEEs são na ordem de 10,98; 8,06; 7,68 e 2,42 trilhões de toneladas de CO_{2eq}.

Tabela 8: Valores do volume produzido de biometano e sua equivalência energética em óleo diesel e das emissões de GEEs.

Estados	Volume		Volume		Emissões		Emissões evitadas (tco2eq)
	Biometano (bilhões de m ³)	Diesel (bilhões de L)	Biometano (MJ)	Diesel (MJ)	Biometano (MJ)	Diesel (MJ)	
São Paulo	2.88	2.67	1.13E+17	1.02E+17	-3.40E+18	7.58E+18	1.10E+13
Minas Gerais	2.12	1.96	8.33E+16	7.52E+16	-2.50E+18	5.56E+18	8.06E+12
Rio De Janeiro	2.02	1.87	8.84E+16	7.98E+16	-2.65E+18	5.90E+18	7.68+12
Espirito Santo	0.64	0.59	2.50E+16	2.26E+16	-7.51E+17	1.67E+18	2.42E+12

Fonte: Elaboração Própria.

6. CONCLUSÃO

Este trabalho propôs analisar a viabilidade econômica do uso de biometano produzido a partir dos consórcios de aterros sanitários existentes na Região Sudeste do Brasil, considerando o seu uso para abastecimento veicular.

Foram analisadas 508 cidades distribuídas em 50 consórcios de aterros sanitários dos Estados de São Paulo, Minas Gerais, Espírito Santo e Rio de Janeiro.

Foram adotadas duas metodologias distintas para a precificação da venda deste combustível, a primeira considerou a venda do biometano diretamente aos postos de abastecimento e a segunda à venda direta a mercados não térmicos. Como a receita obtida pela primeira metodologia é superior ao da segunda, neste primeiro cenário houve um maior número de aterros com viabilidade econômica para o aproveitamento energético, os consórcios de aterros sanitários com capacidade instalada superior a 5.500 m³/dia e, de maneira geral, com população superior a 83.000 habitantes já se apresentaram viáveis; enquanto que para o segundo cenário, a viabilidade econômica se deu a partir de uma capacidade instalada de 14.000 m³/dia e população final de 160.000 habitantes.

Para o primeiro cenário, os números de aterros que são viáveis economicamente para a proposta deste trabalho, são de 44, ou seja, 88% do total de aterros analisados. Já, para o segundo cenário, 36 aterros se mostraram viáveis, 72% dos aterros da Região Sudeste.

A maior parte dos aterros que não apresentaram viabilidade econômica para o aproveitamento do biometano, pertence ao estado de Minas Gerais, 5 aterros no 1º cenário e 12 aterros no segundo cenário. Rio de Janeiro e Espírito Santo tiveram todos os projetos de purificação do biogás de aterro viáveis economicamente. Isso ocorre, principalmente pelos consórcios do Estado de Minas com cidades com populações muito baixas.

Como discutido ao longo do trabalho, a melhor forma de utilização do biogás é para uso veicular, já que, para geração de energia elétrica existem outras fontes de aproveitamento.

O Brasil, apesar de apresentar potencial de geração de biometano, como demonstrado neste trabalho, infelizmente não apresenta um mercado estruturado para a exploração deste potencial. Uma das barreiras mais significativas é a falta de estrutura para o transporte desse combustível, apesar do País possuir uma rede de 9.409 km de extensão (BRASIL/MME/EPE, 2021) essa quantidade de gasodutos não é suficiente para atender todo o potencial de geração de biogás, diferentemente de países Europeus que já possuem uma rede de gasodutos extensa e consolidada.

A inexistência de empreendimentos bem sucedidos no País também é um fator limitante para o desenvolvimento do mercado, já que, a falta de um exemplo próspero e eficiente pode inibir os investimentos de empresários neste ramo. Aliado a isso, há que se considerar a criação de instrumentos regulatórios que incentive os investidores e impulsione o mercado (MCID, 2016a).

No ano de 2021 foi sancionada a Lei n. 14.134 (Brasil, 2021a) que vem para amparar e estimular o mercado do biometano. Conforme preconizado por Brasil/MME/EPE (2020), deve-se ressaltar a oportunidade que foi criada no contexto do Novo Mercado de Gás. A produção e uso do biogás pode proporcionar um acréscimo na oferta de gás natural, assim como para redução da sua pegada de carbono, corroborando uma sinergia positiva entre o combustível renovável e o fóssil em um processo de transição energética.

Dessa forma, a Lei n. 14.134 (Brasil, 2021b) possibilita a inserção do biometano ao mercado de gás natural, mercado este já consolidado no Brasil.

Em relação aos custos de instalação de empreendimentos deste setor, quanto menor a capacidade instalada, maior é o custo associado, passível de interferir na viabilidade econômica destas usinas de purificação. Com os consórcios de aterros sanitários estudados, foi observado que as menores capacidades instaladas foram os aterros sanitários que se apresentaram inviáveis economicamente. Outro fator que influencia na viabilidade destes projetos é a receita obtida, como pode ser visto claramente por meio dos dois cenários de precificação propostos.

A matéria-prima utilizada para a geração de biogás também impacta na viabilidade do projeto, já que, dependendo do tipo de matéria-prima, o custo de produção da mesma pode ser considerável. Com a utilização de resíduos sólidos como matéria-prima esse custo é inexistente. Pode-se citar como uma barreira significativa, a inferioridade do preço dos combustíveis fósseis, quando comparadas ao preço do biometano. O preço do biometano deve ser competitivo no mercado para que aumente a sua expansão (NEVZOROVA et al., 2019).

Outra questão pertinente e que reforça a necessidade de encontrarmos fontes renováveis e com menores fatores de emissões de CO_{2eq} é a mudança climática iminente que o mundo vem enfrentando.

Fontes renováveis sempre terá uma menor contribuição nas emissões de GEE quando comparado a fontes fósseis. Com este trabalho, foi possível estimar a redução no volume de emissão, ao longo dos 20 anos propostos, quando há a substituição do biometano pelo óleo diesel. A emissão potencialmente evitada resultou em cerca de 29,14 trilhões de CO_{2eq}.

Como sugestões para trabalhos futuros, propõe-se a expansão deste estudo para as demais regiões do País; analisar o potencial de geração de biometano por outros substratos não explorados neste trabalho; e ainda, levantar a infraestrutura de redes de gasodutos no Brasil e verificar a viabilidade/necessidade da construção de novos gasodutos para exploração e desenvolvimento deste combustível no País.

REFERÊNCIAS

ABATZOGLOU, N.; BOIVIN S. A review of biogas purification processes. **Biofuels, Bioprod. Bioref**, Quebec, v. 03, p. 42- 71, 2009.

AHMAN , M. Life Biomethane in the transport sector—An appraisal of the forgotten option. **Energy Policy**, [s.l.],vol. 38, p.208–217, 2010.

KUNZ, A; STEINMETZ, R. L. R.; AMARAL, A. C. **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato** / Concórdia: Sbera: Embrapa Suínos e Aves, 2019. 209 p.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP): **Portaria n. 16, de 17 de Junho de 2008**. Estabelece a especificação do gás natural, de origem nacional ou importador, a ser comercializado em todo território nacional. Disponível em: <<https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=109588>> Acesso em 01 out 2021. (BRASIL/ANP, 2008).

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP): **Publicidade dos Preços de Gás Natural**: Boletim Mensal da Comercialização do Gás Natural Mês de referência: Julho/2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/movimentacao-estocagem-e-comercializacao-de-gas-natural/acompanhamento-do-mercado-de-gas-natural/publicidade-dos-precos-de-gas-natural>> Acesso em 01 out 2021. (BRASIL/ANP, 2021).

AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO (ANP). **Resolução n. 8, de 30 de janeiro de 2015**. Estabelece a especificação do Biometano contida no Regulamento Técnico ANP nº 1/2015, parte integrante desta Resolução. Disponível em: <https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-8-2015?origin=instituicao&q=8/2015>. Acesso em: 15 nov. 2020. (BRASIL/ANP, 2015).

AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO (ANP). **Resolução n. 685, de 29 de junho de 2017**. Estabelece as regras para aprovação do controle da qualidade e a especificação do biometano oriundo de aterros sanitários e de estações de tratamento de esgoto destinado ao uso veicular e às instalações residenciais, industriais e comerciais a ser comercializado em todo o território nacional. Disponível em: <https://atosoficiais.com.br/anp/?q=685%2F2017&types=24>. Acesso em: 15 nov. 2020. (ANP/BRASIL, 2017).

AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO (ANP). **Resolução n. 734, de 28 de junho de 2018**. Regulamenta a autorização para o exercício da atividade de produção de biocombustíveis e a autorização de operação da instalação produtora de biocombustíveis. Disponível em: https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/27934159/do1-2018-06-29-resolucao-n-734-de-28-de-junho-de-2018-27934029. Acesso em: 15 nov. 2020. (ANP/BRASIL, 2018).

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL): **Sistemas de Informações de Geração da ANEEL SIGA**. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoibjNjc4OGYyYjQtYWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkN>

TQ1MTc1NjM2IiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAx NzBIMSIsImMiOjR9. Acesso em: 15 nov. 2020. (ANEEL, 2021).

ABiogás divulga novo potencial do biogás para o mercado brasileiro durante fórum em São Paulo. **ABIOGÁS**, 2019. Disponível em: <https://abiogas.org.br/abiogas-divulga-novopotencial-do-biogas-para-o-mercado-brasileiro-durante-forum-em-sao-paulo/>. Acesso em: 11 de mar. de 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE BIOGÁS (ABIOGÁS): **Potencial de Biogás no Brasil**. Disponível em: <https://abiogas.org.br/potencial-de-biogas-no-brasil/> Acesso em: 22 de jan. de 2022. (ABIOGÁS 2022).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE): **Panorama Dos Resíduos Sólidos No Brasil 2018/2019**. 2020. (ABRELPE, 2020).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8419: Apresentação de Projetos de Aterros Sanitários de Resíduos Sólidos Urbanos**. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 13.896: Aterros de Resíduos Não Perigosos - Critérios para Projeto, Implantação e Operação**. Rio de Janeiro, 1997.

AXELSSON, L.; FRANZÉN, M.; OSTWALD, M.; BERNDEN, G.; LAKSHMI, G.; RAVINDRANATH, N. H. Perspective: Jatropha cultivation in southern India: Assessing farmers' experiences. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, [s.l.], vol. 6, no. 3, p. 246–256, 2012.

BARROS, R. M. **Tratado sobre resíduos sólidos: Gestão, uso e sustentabilidade**. 1 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2013.

BARROS, M. B. et al., A potential of the biogas generating and energy recovering from municipal solid waste. **Renewable Energy Focus**, [s.l.], vol. 25, p. 04–16, 2018.

BORSCHIVER, S.; SILVA, A. L. R. DA; "Mapeamento Tecnológico para Purificação de Biogás e seu Aproveitamento: Panorama Mundial e Iniciativas Nacionais", p. 8757-876 . In: Anais do XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química - COBEQ 2014.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). EMPRESA DE PESQUISA ENÉRGÉTICA (EPE): **Mapa da Infraestrutura de Gasodutos de Transporte**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/mapa-da-infraestrutura-de-gasodutos-de-transporte>>. Acesso em 10 de jan. de 2022. (MME/EPE, s.d.).

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). EMPRESA DE PESQUISA ENÉRGÉTICA (EPE): **Plano Decenal de Expansão de Energia 2030**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2030> Acesso em 10 de janeiro de 2022. (MME/EPE, 2021).

BRASIL. **Lei n. 12.187, de 29 de dezembro de 2009.** Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/112187.htm. Acesso em: 15 nov. 2020. (BRASIL, 2009).

BRASIL. **Lei n. 12.305, de 2 de agosto de 2010.** Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm. Acesso em: 15 nov. 2020.(BRASIL, 2010).

BRASIL. **Lei n. 13.576, de 26 de dezembro de 2017.** Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/lei/113576.htm. Acesso em: 15 nov. 2020. (BRASIL, 2017).

BRASIL. **Lei nº 14.134, de 8 de abril de 2021.** Dispõe sobre as atividades relativas ao transporte de gás natural, de que trata o art. 177 da Constituição Federal, e sobre as atividades de escoamento, tratamento, processamento, estocagem subterrânea, acondicionamento, liquefação, regaseificação e comercialização de gás natural; altera as Leis nºs 9.478, de 6 de agosto de 1997, e 9.847, de 26 de outubro de 1999; e revoga a Lei nº 11.909, de 4 de março de 2009, e dispositivo da Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/lei-n-14.134-de-8-de-abril-de-2021-312904769>. Acesso em 06 jan. 2022. (BRASIL, 2021b).

BRASIL. **Decreto nº 10.712, de 2 de junho de 2021.** Regulamenta a Lei nº 14.134, de 8 de abril de 2021, que dispõe sobre as atividades relativas ao transporte de gás natural, de que trata o art. 177 da Constituição, e sobre as atividades de escoamento, tratamento, processamento, estocagem subterrânea, acondicionamento, liquefação, regaseificação e comercialização de gás natural. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/decreto-n-10.712-de-2-de-junho-de-2021-323832363> Acesso em 06 jan. 2022. (BRASIL, 2021a).

BRASIL. **Decreto n. 10.936, de 12 de janeiro de 2022.** Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos.. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2022/Decreto/D10936.htm#art91. Acesso em: 22 jan. 2022. (BRASIL, 2022).

BRASIL. **Decreto n. 9.888, de 27 de junho de 2019.** Dispõe sobre a definição das metas compulsórias anuais de redução de emissões de gases causadores do efeito estufa para a comercialização de combustíveis de que trata a Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017, e institui o Comitê da Política Nacional de Biocombustíveis - Comitê RenovaBio. Disponível em: <https://legislacao.presidencia.gov.br/atos/?tipo=DEC&numero=9888&ano=2019&ato=abk3aE9keZpWT8ef>. Acesso em: 15 nov. 2020. (BRASIL, 2019).

BRASIL. **Decreto n. 5.163, de 30 de julho de 2004.** Regulamenta a comercialização de energia elétrica, o processo de outorga de concessões e de autorizações de geração de energia elétrica, e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/decreto/d5163.HTM. Acesso em: 15 nov. 2020. (BRASIL, 2004).

BRASIL. ANEEL. **Resolução n. 482, DE 17 de abril de 2012.** Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2020. (ANEEL, 2012).

BRASIL. ANEEL. **Resolução n. 687, DE 17 de abril de 2012.** Altera a Resolução Normativa nº 482, de 24 de novembro de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição – PRODIST. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2020. (ANEEL, 2015).

BUDZIANOWSKI, W. M.; BRODACKA, M. Biomethane storage: Evaluation of technologies, end uses, business models, and sustainability. **Energy Conversion and Management**, [s.l.], vol. 141, p. 254–273, 2017.

CENTRO INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS (CIBIOGÁS): **BiogásMap**. Disponível em: <https://mapbiogas.cibiogas.org/>. Acesso em 10 dez 2020. CIBIOGÁS, 2020.

CHERNICHARO, C. A. L. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: biodigestores anaeróbios.** Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental-UFMG, 1997.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Biogás Pesquisas e Projetos no Brasil.** São Paulo, 2006. (CETESB, 2006).

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Biogás: geração e uso energético - versão 1.0/Cetesb.** São Paulo, 2006. (CETESB, 2006b) Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/mudancas-climaticas/biogas/Softwares/16-Softwares#>>. Acesso em: 12 nov. 2014.

Companhia de Gás do Ceará (CEGÁS): **Equivalência Energética.** Disponível em: <https://www.cegas.com.br/gas-natural/equivalencia-energetica/>. Acesso em 13 set 2021. (CEGÁS, 2021).

Companhia Pernambucana de Gás (COPERGÁS): **Industrial.** Disponível em: <https://www.copergas.com.br/produtos/industrial/>. Acesso em 13 set 2021. (COPERGÁS, 2021).

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE MUNICÍPIOS (CNM): **Consórcios Públicos Intermunicipais: Uma Alternativa à Gestão Pública.** Disponível em: https://www.cnm.org.br/biblioteca/registros/financas/2/7/date_desc/2016/. Acesso em 13 set 2021. (CNM, 2016).

COSTA, M.; COELHO, P. **Combustão.** Portugal: Orion, 2007.

DONES, R.; HECK, T; HIRSCHBERG, S. Greenhouse Gas Emissions from Energy Systems, Comparison and Overview. **Encyclopedia of Energy**, [s.l.], vol. 03, p. 77–95, 2004.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE): **Estudo sobre a Economicidade do Aproveitamento dos Resíduos Sólidos Urbanos em Aterro para Produção de Biometano.** Rio de Janeiro, 2018. (EPE, 2018).

FUNDAÇÃO NACIONAL DA SAÚDE (FUNASA): **Consórcios Intermunicipais de Saneamento**. Disponível em: <http://cisaneamento.lucashappy.com>. Acesso em 10 dez 2020. (FUNASA, 2018).

GARCILASSO, Vanessa Pecora et al. **Tecnologia de Produção e Uso de Biogás e Biometano**. São Paulo: Synergia Editora Concórdia, 2018.

GOOGLE EARTH. <https://earth.google.com/web/>. Consulta realizada em: 10 de jan de 2022.

INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION (ICCT): **Life-Cycle Greenhouse Gas Emissions Of Biomethane And Hydrogen Pathways In The European Union**. Washington, 2021 (ICCT, 2021).

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Outlook for biogas and biomethane: Prospects for organic growth**. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/outlook-for-biogas-and-biomethane-prospects-for-organic-growth/sustainable-supply-potential-and-costs>>. Acesso em 27 fev 2021. (IEA, 2020).

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA): **Biomethane Status and Factors Affecting Market Development and Trade**. 2014. (IEA, 2014).

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION (IMO). **Third IMO Greenhouse Gas Study 2014**. London, 2016. (IMO, 2015).

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Revised 1996 IPCC Guidelines for national Greenhouse Gas Inventories Reporting Instructions**. (IPCC, 1997).

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA): **Biogas For Road Vehicles, 2018**. (IRENA, 2018).

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **Road transport: the cost of renewable solutions, 2013**. (IRENA, 2013).

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Demográfico: Tabela 200 - População residente, por sexo, situação e grupos de idade - Amostra - Características Gerais da População**. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/Tabela/200>> Acesso em 10 jun 2020. (IBGE, 2020).

LARSSON, M.; GRONKVIST, S.; ALVFORS, P. Upgraded biogas for transport in Sweden e effects of policy instruments on production, infrastructure deployment and vehicle sales. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], vol. 112, p. 3774–3784, 2016.

MACHADO, P. G.; ICHIGE, E. N. A.; RAMOS, K. N.; MOUETTE, D. Natural gas vehicles in heavy-duty transportation – A political-economic analysis for Brazil. **Case Studies on Transport Policy**, [s.l.], vol. , p. 22-39, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2020.06.009>.

MINISTÉRIOS DAS CIDADES (MCID): **PROBIOGÁS - Barreiras e Propostas de Soluções Para o Mercado de Biogás no Brasil, 2016**. (MCID, 2016a).

MINISTÉRIOS DAS CIDADES (MCID): **PROBIOGÁS** – Biometano como Combustível Veicular, 2016. (MCID, 2016b).

MINISTÉRIO DE INFRAESTRUTURA (MINFRA): **Frota por UF e Tipo de Veículo, 2020**. Disponível em: <<https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/transito/conteudo-denatran/frota-de-veiculos-2020>>. Acesso em 05 dez 2020. (MINFRA, 2020).

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME): **Boletim Mensal do Acompanhamento da Indústria de Gás Natural Mês de Referência: Junho/2021**. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/publicacoes-1/boletim-mensal-de-acompanhamento-da-industria-de-gas-natural/2021/06-boletim-de-acompanhamento-da-industria-de-gas-natural-junho-de-2021.pdf/view>> Acesso em 10 out 2021. (MMEd, 2021).

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME): **Boletim Mensal do Acompanhamento da Indústria de Gás Natural Mês de Referência: Janeiro/2021**. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/publicacoes-1/boletim-mensal-de-acompanhamento-da-industria-de-gas-natural/2021/06-boletim-de-acompanhamento-da-industria-de-gas-natural-junho-de-2021.pdf/view>> Acesso em 10 out 2021. (MMEc, 2021).

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME): **Boletim Mensal do Acompanhamento da Indústria de Gás Natural Mês de Referência: Fevereiro/2021**. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/publicacoes-1/boletim-mensal-de-acompanhamento-da-industria-de-gas-natural/2021/06-boletim-de-acompanhamento-da-industria-de-gas-natural-junho-de-2021.pdf/view>> Acesso em 10 out 2021. (MMEb, 2021).

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME): **Boletim Mensal do Acompanhamento da Indústria de Gás Natural Mês de Referência: Março/2021**. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/publicacoes-1/boletim-mensal-de-acompanhamento-da-industria-de-gas-natural/2021/06-boletim-de-acompanhamento-da-industria-de-gas-natural-junho-de-2021.pdf/view>> Acesso em 10 out 2021. (MMEf, 2021).

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME): **Boletim Mensal do Acompanhamento da Indústria de Gás Natural Mês de Referência: Abril/2021**. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/publicacoes-1/boletim-mensal-de-acompanhamento-da-industria-de-gas-natural/2021/06-boletim-de-acompanhamento-da-industria-de-gas-natural-junho-de-2021.pdf/view>> Acesso em 10 out 2021. (MMEa, 2021).

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME): **Boletim Mensal do Acompanhamento da Indústria de Gás Natural Mês de Referência: Maio/2021**. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/publicacoes-1/boletim-mensal-de-acompanhamento-da-industria-de-gas-natural/2021/06-boletim-de-acompanhamento-da-industria-de-gas-natural-junho-de-2021.pdf/view>> Acesso em 10 out 2021. (MMEe, 2021).

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE): **Plano Nacional de Energia 2050**. Disponível em: <

<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Nacional-de-Energia-2050>> Acesso em 10 out 2021. (BRASIL/MME/EPE, 2021).

MINISTERIO DE MINAS E ENERGIA (MME). EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE): **Balço Energético Nacional 2020**: Relatório Síntese/Base 2019. Rio de Janeiro, 2020. (MME/EPE, 2020).

MIKI, R. E. Biometano Produzido a Partir de Biogás de ETes e Seu Uso Como Combustível Veicular. **Revista DAE**, [s.I.], Vol. 66, p. 6–16, 2018.

NADALETI, W. C.; LOURENÇO, V. A.; BELLI, P.; SANTOS, G. B.; PRZYBYLA, G. National potential production of methane and electrical energy from sugarcane vinasse in Brazil: A thermo-economic analysis. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, [s.I.], vol. 8, 2020.

NASCIMENTO, M. C. B.; FREIRE, E. P.; DANTAS, F. A. S.; GIANANTE M. B. Estado da arte dos aterros de resíduos sólidos urbanos que aproveitam o biogás para geração de energia elétrica e biometano no Brasil. **Engenharia Sanitária Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 1, p. 143-155, 2019.

NEVZOROVA, T.; KUTCHEROV, V. Barriers to the wider implementation of biogas as a source of energy: A state-of-the-artre view. **Energy Strategy Reviews**, [s.I.], vol. 26, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100414>.

NURHADI, L.; BORÉN, S.; NY, H. Advancing from Efficiency to Sustainability in Swedish Medium-Sized Cities: Na Approach for Recommending Powertrainsand Energy Carriers for Public Bus Transport Systems. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, [s.I.], vol. 111, p. 586-595, 2014.

OLIVEIRA, L. G. S.; NEGRO, S. O. Contextual structures and interaction dynamics in the Brazilian Biogas Innovation System. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.I.], vol. 107, p.462–481, 2019.

PARANÁ. **Lei n. 19.500, de 21 de maio de 2018**. Dispõe sobre a Política Estadual do Biogás e Biometano e adota outras providências. Disponível em: <http://portal.assembleia.pr.leg.br/index.php/pesquisa-legislativa/legislacao-estadual?idLegislacao=51410&tpLei=0&idProposicao=76699>. Acesso em: 15 nov. 2020. (PARANÁ, 2018).

POTTER, M. C. & SCOTT, E. P. **Ciências Térmicas**: termodinâmica, mecânica dos fluidos e transmissão do calor. São Paulo: Thomson Learning, 277p, 2007.

PRUSSI, M.; PADELLA, M.; CONTON, M., POSTMA, E. D.; LONZA, L. Review of technologies for biomethane production and assessment of Eu transport share in 2030. **Journal of Cleaner Production**, [s.I.], vol. 222, p. 565–572, 2019.

RICARDO ENERGY & ENVIRONMENT: **The role of natural gas and biomethane in the transport sector**. Fev, 2016. Disponível em: https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2016_02_TE_Natural_Gas_Biomethane_Study_FINAL.pdf . Acesso em: 15 dez. 2020.

RIO DE JANEIRO. **Lei n. 6361, de 18 de dezembro de 2012.** Dispõe sobre a Política Estadual de Gás Natural Renovável - GNR. Disponível em: <https://leisestaduais.com.br/rj/lei-ordinaria-n-6361-2012-rio-de-janeiro-dispoe-sobre-a-politica-estadual-de-gas-natural-renovavel-gnr>. Acesso em: 15 nov. 2020. (RIO DE JANEIRO, 2012).

RIO DE JANEIRO. **Decreto n. 44.855, de 26 de junho de 2014.** Regulamenta a Lei nº 6.361, de 18 de dezembro de 2012, que dispõe sobre a Política Estadual de Gás Natural Renovável - GNR, e dá outras providências. Diário oficial do estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 27 jun. 2014. (RIO DE JANEIRO, 2014).

SÃO PAULO. ARSESP. **Resolução n. 744 de 26 de julho de 2017.** Dispõe sobre as condições de distribuição de Biometano na rede de gás canalizado no âmbito do Estado de São Paulo, e dá outras providências. Disponível em: <http://www.arsesp.sp.gov.br/LegislacaoArquivos/ldl7442017.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2020. (SÃO PAULO, 2017).

SÃO PAULO. **Decreto n. 58.659 de 4 de dezembro de 2012.** Institui o Programa Paulista de Biogás e dá providências correlatas. Disponível em: <https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/decreto/2012/decreto-58659-04.12.2012.html>. Acesso em: 15 nov. 2020. (SÃO PAULO, 2012).

SÃO PAULO. **Decreto n. 60.001 de 20 de dezembro de 2013.** Introduce alteração no Regulamento do Imposto sobre Operações Relativas à Circulação de Mercadorias e sobre Prestações de Serviços de Transporte Interestadual e Intermunicipal e de Comunicação - RICMS. Disponível em: <https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/decreto/2013/decreto-60001-20.12.2013.html>. Acesso em: 15 nov. 2020. (SÃO PAULO, 2013).

SCARLAT, N.; DALLEMAND, J. F.; FAHL, F. Biogas: Developments and perspectives in Europe. **Renewable Energy**, [s.l.], vol. 129, p. 457–472, 2018.

SMITH M.; GONZALES, J. **Costs Associated With Compressed Natural Gas Vehicle Fueling Infrastructure.U.S.** Department of Energy. 2014. Disponível em: https://afdc.energy.gov/files/u/publication/cng_infrastructure_costs.pdf.

SILVA, T. N.; FREITAS, F. S. N.; CANDIANI, G. Avaliação das emissões superficiais do gás de aterros sanitários de grande porte. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [s.l.], vol. 18, no. 2, p. 95–100, 2013.

SILVA, S. P. G.; SANTOS, I. F. S.; BARROS, R. M.; TIAGO FILHO, G. L. 2019. **Avaliação Energético-Econômica de Projetos de Geração de Energia de Resíduos Sólidos Orgânicos.** Rotina elaborada em Scilab®. Itajubá/Minas Gerais, 2019. 10.536 bytes. (SILVA et al, 2019).

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO (SINIS): **Painel Resíduos Sólidos Urbanos** – Indicadores Municipais. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoibGVkYTRiZTktMGUwZS00OWFiLTgwNWYtNGQ3Y2JlZmJhYzFiIiwidCI6IjJmY2ZmE5LTNmOTMtNGJiMS05ODMwLTZmYzNDYzNTJmMDNlNCIsImMiOiJF9>. Acesso em 10 mar 2021. (SINIS, 2021).

STÜRMER, B., KIRCHMEYR F., KOVACS K., HOFMANN F., COLLINS D., INGREMEAU C., STAMBASKY, J. **Technical-economic analysis for determining the feasibility threshold for tradable biomethane certificates**. Biosurf Project, 2016.

TERRAZA H.; WILLMUMSEN, H. **Guidance Note on Landfill Gas Capture and Utilization**. Inter-American Development Bank. 2009. Disponível em: www.iadb.org.

TUINIER, M. J.; VAN SINT ANNALAND, M. Biogas purification using cryogenic packed-bed technology. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, [s.l.], vol. 51, no. 15, p. 5552–5558, 2012.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **Landfill gas emissions model (LandGEM) Version 3.02. 2005**. Disponível em: <<https://www.epa.gov/technical-air-pollution-resources>>. Acesso em: 23 de Jan. de 2022 (USEPA, 2005).

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA): **USEPA, AP 42 – Compilation of Air Pollutant Emission Factors - cap 2, 2.4. Municipal Solid Waste Landfills (Draft Section)**. 2018. Disponível em: <http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch02/index.html>. USEPA, 2008.

VILELA, R. S. **Remoção de matéria orgânica de águas residuárias com elevada concentração de sulfato pelas vias sulfetogênicas e metanogênicas combinadas**. 2012. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo.

SZWARCFITER, L. **Opções para o aprimoramento do controle de emissões de poluentes atmosféricos por veículos leves no Brasil: Uma avaliação do potencial de programas de inspeção e manutenção e de renovação acelerada da frota**. 2004. Tese (Doutorado em Ciências em Planejamento Energético) – Pós-Graduação De Engenharia, Universidade Federal Do Rio De Janeiro, Rio de Janeiro.

APÊNDICE

Tabela 9: Consórcios Intermunicipais de RSU do Estado de São Paulo.

Consórcio de Aterros Sanitários	Sede	Municípios
Consórcio Intermunicipal de Saneamento Básico para Região do Circuito das Águas/CISBRA	Amparo	Águas de Lindóia, Amparo, Itapira, Lindóia, Monte Alegre do Sul, Morungaba, Pedra Bela, Pinhalzinho, Santo Antônio de Posse, Serra Negra, Socorro, Tuiuti
Consórcio Intermunicipal de Manejo de Resíduos Sólidos da Região Metropolitana de Campinas/CONSIMARES	Nova Odessa	Americana, Capivari, Elias Fausto, Hortolândia, Monte Mor, Nova Odessa, Santa Bárbara d'Oeste, Sumaré
Consórcio Intermunicipal do Alto Vale do Paranapanema/AMVAPA	Pirajuí	Angatuba, Barão de Antonina, Bernardino de Campos, Coronel Macedo, Fartura, Itaberá, Itaí, Itaporanga, Manduri, Paranapanema, Pirajuí, Riversul, Sarutaiá, Taguaí, Taquarituba, Tejupá
Consortio Intermunicipal do Pontal do Paranapanema/CIPP	Pirapozinho	Anhumas, Narandiba, Pirapozinho, Tarabai, Sandovalina
Consórcio Intermunicipal para Gestão Integrada de Resíduos Sólidos/SIGEINRES	Barretos	Barretos, Bebedouro
Consórcio Intermunicipal de Desenvolvimento Ambiental Sustentável/CIDAS	Cosmorana	Álvares Florence, Américo de Campos, Cardoso, Cosmorama, Jaci, Meridiano, Parisi, Paulo de Faria, Pedranópolis, Pontes Gestal, Valentim Gentil, Votuporanga
Consórcio Intermunicipal da Região Sudoeste da Grande São Paulo/CONISUD	Embu das Artes	Cotia, Embu das Artes, Embu-Guaçu, Itapecerica da Serra, Juquitiba, São Lourenço da Serra, Taboão da Serra, Vargem Grande Paulista

Continua

Conclusão

Consórcio de Aterros Sanitários	Sede	Municípios
Consórcio de Desenvolvimento dos Municípios do Alto Tietê/CONDEMAT	Suzano	Arujá, Biritiba-Mirim, Ferraz de Vasconcelos, Guararema, Guarulhos, Itaquaquecetuba, Mogi das Cruzes, Poá, Salesópolis, Santa Isabel, Suzano
Consórcio Intermunicipal para Tratamento e Disposição Final do Lixo/COTRALIX	Parapuã	Bastos, Iacri, Parapuã, Rinópolis
Consórcio Intermunicipal do Aterro Sanitário/CIAS	Várzea Paulista	Cajamar, Campo Limpo Paulista, Jundiaí, Louveira, Várzea Paulista, Vinhedo
Consórcio Intermunicipal Grande ABC	Santo André	Diadema, Mauá, Ribeirão Pires, Rio Grande da Serra, Santo André, São Bernardo do Campo, São Caetano do Sul
Consórcio Intermunicipal para Gestão de Resíduos Sólidos Integração	Dracena	Dracena, Ouro Verde, Tupi Paulista, Junqueirópolis

Tabela 10: Consórcios Intermunicipais de RSU do Estado do Rio de Janeiro.

Consórcio de Aterros Sanitários	Sede	Municípios
Consórcio Intermunicipal Lagos I	Araruama	Araruama, Saquarema , Silva Jardim
Consórcio Público de Gestão Associada e Integrada do Serviço de Limpeza Urbana e Manejo de Resíduos Sólidos – Noroeste/CIR NOROESTE 1	Aperibé	Aperibé, Bom Jesus do Itabapoana, Cambuci, Cardoso Moreira, Italva, Itaocara, Itaperuna, Laje do Muriaé, Miracema, Natividade, Porciúncula, Santo Antônio de Pádua, São Fidélis, São José de Ubá, Varre-Sai
Consórcio Público Para Gestão Integrada E Associada de Manejo de Resíduos Sólidos Serrana 2/CIR SERRANA 2	Três Rios	Areal, Comendador Levy Gasparian, Paraíba do Sul, Petrópolis, Sapucaia, Três Rios
Consórcio Público de Gestão de Resíduos Sólidos Centro Sul/CIR CENTRO SUL	Paracambi	Engenheiro Paulo de Frontin, Japeri, Paracambi, Queimados
Consórcio Público de Gestão de Resíduos Sólidos da Baixada Fluminense	Nilópolis	Belford Roxo, Duque de Caxias, Mesquita, Nilópolis, Nova Iguaçu, São João de Meriti
Consórcio Público de Gestão de Resíduos Sólidos Vale do Café/CONVALE	Vassouras	Barra do Piraí, Rio das Flores, Valença, Vassouras
Consórcio Público de Gestão de Resíduos Sólidos Serrana 1/CIR SERRANA 1	Teresópolis	Carmo, São José do Vale do Rio Preto, Sumidouro, Teresópolis

Fonte: FUNASA,2018.

Tabela 11: Consórcios Intermunicipais de Resíduos Sólidos Urbanos do Estado do Espírito Santo.

Consórcio de Aterros Sanitários	Sede	Municípios
Consórcio Público para Tratamento e Destinação Final Adequada de Resíduos Sólidos da Região Oeste do Estado do Espírito Santo/CONDOESTE	Colatina	Águia Branca, Afonso Cláudio, Alto Rio Novo, Baixo Guandu, Colatina, Governador Lindenberg, Itaguaçu, Itarana, Laranja da Terra, Linhares, Mantenópolis, Marilândia, Pancas, Rio Bananal, Santa Maria de Jetibá, Santa Teresa, São Domingos do Norte, São Gabriel da Palha, São Roque do Canaã, Vila Valério
Consórcio Público para Tratamento e Destinação Final de Resíduos Sólidos da Região Norte do Estado do Espírito Santo/CONORTE	Montanha	Água Doce do Norte, Barra de São Francisco, Boa Esperança, Conceição da Barra, Ecoporanga, Jaguaré, Montanha, Mucurici, Nova Venécia, Pedro Canário, Pinheiros, Ponto Belo, São Mateus, Vila Pavão, Sooretama
Consórcio Público para Tratamento e Destinação Final Adequada de Resíduos Sólidos da Região Sul Serrana do Espírito Santo/CONSUL	Anchieta	Anchieta, Alfredo Chaves, Alegre, Apiacá, Atilio Vivacqua, Bom Jesus do Norte, Brejetuba, Castelo, Conceição do Castelo, Divino de São Lourenço, Dores do Rio Preto, Guaçuí, Ibatiba, Ibitirama, Iconha, Irupi, Itapemirim, Iúna, Jerônimo Monteiro, Marataízes, Mimoso do Sul, Muniz Freire, Muqui, Piúma, Presidente Kennedy, Rio Novo do Sul, São José do Calçado, Vargem Alta, Venda Nova do Imigrante

Fonte: FUNASA, 2018.

Tabela 12: Consórcios Intermunicipais de RSU do Estado de Minas Gerais.

Consórcio de Aterros Sanitários	Sede	Municípios
Consórcio Público de Gestão de Resíduos Sólidos do Médio Piracicaba/CPGRS Médio Piracicaba	Monlevade	Bela Vista de Minas, João Monlevade, Nova Era, Rio Piracicaba
Consórcio Regional de Saneamento Básico Central de Minas/CORESAB Central de Minas	Curvelo	Araçaí, Augusto de Lima, Baldim, Buenópolis, Caetanópolis, Congonhas do Norte, Corinto, Curvelo, Datas, Cordisburgo, Felixlândia, Funilândia, Gouveia, Inimutaba, Jaboticatubas, Joaquim Felício, Lassance, Monjolos, Morro da Garça, Paraopeba, Presidente Juscelino, Presidente Kubitschek, Santana de Pirapama, Santana do Riacho, Santo Hipólito, Três Marias
Consórcio Intermunicipal de Saúde e Desenvolvimento dos Vales do Noroeste de Minas/CONVALES Noroeste de Minas	Arinos	Arinos, Brasilândia de Minas, Bonfinópolis de Minas, Buritis, Cabeceira Grande, Chapada Gaúcha, Dom Bosco, Formoso, Guarda-Mor, João Pinheiro, Lagoa Grande, Natalândia, Paracatu, Pintópolis, Riachinho, Santa Fé de Minas, Unai, Uruana de Minas, Uruçuia, Vazante
Consórcio Intermunicipal de Gestão e Desenvolvimento Ambiental Sustentável das Vertentes/CIGEDAS Vertentes	São João Del Rei	Barroso, Carrancas, Conceição da Barra de Minas, Coronel Xavier Chaves, Dolores de Campos, Ibituruna, Itutinga, Lagoa Dourada, Madre de Deus de Minas, Nazareno, Piedade do Rio Grande, Prados, Resende Costa, Ritópolis, Santa Cruz de Minas, São João del Rei, São Tiago, São Vicente de Minas, Tiradentes
Consórcio Intermunicipal de Desenvolvimento Socioeconômico da Microrregião do Alto Médio São Francisco/CIAMESF	Itacarambi	Bonito de Minas, Brasília de Minas, Chapada Gaúcha, Cônego Marinho, Ibiracatu, Icarai de Minas, Itacarambi, Januária, Juvenília, Luislândia, Manga, Matias Cardoso, Miravânia, Montalvânia, Pedras de Maria da Cruz, Pintópolis, São Francisco, São João das Missões, São Romão, Ubaí

Continua

Consórcio de Aterros Sanitários	Sede	Municípios
Consórcio Intermunicipal para o Desenvolvimento Socioambiental dos Municípios da Microrregião de São Lourenço/CIDEESEA (EX- CIMISA)	São Lourenço	Carmo de Minas, Cristina, Dom Viçoso, Itamonte, Itanhandu, Jesuânia, Lambari, Maria da Fé, Olímpio Noronha, Pouso Alto, São Lourenço, São Sebastião do Rio Verde, Soledade de Minas, Virgínia
Consórcio Intermunicipal de Desenvolvimento Sustentável da Microrregião da Serra Geral de Minas/UNIÃO DA SERRA GERAL	Janaúba	Catuti, Espinosa, Gameleiras, Jaíba, Janaúba, Manga, Mamonas, Matias Cardoso, Mato Verde, Monte Azul, Nova Porteirinha, Pai Pedro, Porteirinha, Serranópolis de Minas, Riacho dos Machados, Verdelândia
Consórcio Regional de Saneamento Básico/CORESAB Boa Vista	Cláudio	Carmo da Mata, Cláudio, Itaguara, Itapeçerica, Oliveira, São Francisco de Paula
Consórcio Público Intermunicipal de Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos/ECOTRES	Conselheiro Lafaiete	Congonhas, Conselheiro Lafaiete, Ouro Branco
Consórcio Intermunicipal dos Municípios da Microrregião do Alto Sapucaí para Aterro Sanitário/CIMASAS	Itajubá	Brazópolis, Cachoeira de Minas, Delfim Moreira, Itajubá, Marmelópolis, Maria da Fé, Piranguçu, Piranguinho, Santa Rita do Sapucaí, São José do Alegre, Wenceslau Braz
Consórcio Intermunicipal do Alto e Médio Carangola para a Gestão de Resíduos Sólidos	Divino	Divino, Fervedouro, Pedra Bonita, Santa Margarida
Consórcio Intermunicipal da Serra da Canastra, Alto São Francisco e Médio Rio Grande/CICANASTRA	Piumhi	Arcos, Capitólio, Córrego Fundo, Doloresópolis, Pains, Pimenta, Piumhi, São Roque de Minas, Vargem Bonita
Consórcio Intermunicipal da Região Integrada de Desenvolvimento Sustentável/RIDES	Monte Carmelo	Cascalho Rico, Douradoquara, Estrela do Sul, Grupiara, Indianópolis, Iraí de Minas, Monte Carmelo, Romaria

Continua

Consórcio de Aterros Sanitários	Sede	Municípios
Consórcio Intermunicipal de Desenvolvimento Ambiental Sustentável do Norte de Minas/CODANORTE	Montes Carlos	Bocaiúva, Botumirim, Buritizeiro, Campo Azul, Capitão Enéas, Claro dos Poções, Coração de Jesus, Cristália, Engenheiro Navarro, Francisco Dumont, Francisco Sá, Glaucilândia, Grão Mogol, Guaraciama, Ibiaí, Ibiracatu, Itacambira, Japonvar, Jequitaí, Josenópolis, Juramento, Lagoa dos Patos, Lontra, Mirabela, Montes Claros, Olhos-d'Água, Padre Carvalho, Patis, Pedras de Maria da Cruz, Pirapora, Ponto Chique, São João da Lagoa, São João da Ponte, São João do Pacuí, Varzelândia, Várzea da Palma, Verdelândia
Consórcio Intermunicipal de Desenvolvimento Sustentável do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba/CIDES	Uberlândia	Araporã, Cachoeira Dourada, Campina Verde, Canápolis, Capinópolis, Cascalho Rico, Centralina, Douradoquara, Estrela do Sul, Grupiara, Gurinhatã, Ipiáçu, Indianópolis, Iraí de Minas, Ituiutaba, Monte Alegre de Minas, Monte Carmelo, Prata, Santa Vitória, Tupaciçuara, Uberlândia
Consórcio Intermunicipal de Resíduos Sólidos Urbanos/CIRSU Vale do Mucuri	Teófilo Otoni	Frei Gaspar, Itambacuri, Ouro Verde de Minas, Poté, Teófilo Otoni
Consórcio Intermunicipal dos Municípios da Microrregião de Frutal para Aterro Sanitário/CIMFAS	Frutal	Comendador Gomes, Frutal, Planura
Consórcio Intermunicipal para o Desenvolvimento Ambiental/4 Ambiental	Santa Juliana	Nova Ponte, Pedrinópolis, Perdizes, Santa Juliana
Consórcio Intermunicipal Público para Gestão Integrada dos Resíduos Sólidos/CIGRSES	Águas Formosas	Águas Formosas, Bertópolis, Crisólita, Fronteira dos Vales, Machacalis, Santa Helena de Minas, Umburatiba
Consórcio Público para Gestão Integrada de Resíduos Sólidos e Iluminação Pública/CPGIRS	Andradas	Andradas, Caldas, Ibitiúra de Minas, Ipuiúna, Santa Rita de Caldas
Consórcio Intermunicipal para Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos/CONRESOL	Alto Jequitibá	Alto Jequitibá, Alto Caparaó
Consórcio Intermunicipal Multifinalitário do Alto Jequitinhonha/CIMAJE	Diamantina	Alvorada de Minas, Angelândia, Aricanduva, Capelinha, Carbonita, Chapada do Norte, Couto de Magalhães de Minas, Datas, Diamantina, Felício dos Santos, Gouveia, Itamarandiba, José Gonçalves de Minas, Leme do Prado, Minas Novas, Presidente Kubitschek, Santo Antônio do Itambé, São Gonçalo do Rio Preto, Senador Modestino Gonçalves, Serro, Turmalina, Veredinha

Continua

Consórcio de Aterros Sanitários	Sede	Municípios
Consórcio Intermunicipal Para Gestão dos Resíduos Sólidos Urbanos/CONCASS	Seritinga	Aiuruoca, Carvalhos, Seritinga, Serranos
Consórcio Intermunicipal de Aterro Sanitário do Centro Oeste Mineiro/CIAS Centro Oeste	Pitangui	Nova Serrana, Pitangui, Onça de Pitangui, Perdigão, Conceição do Pará, Igaratinga, Leandro Ferreira, Moema, São Gonçalo do Pará, Araújojos
Consórcio Intermunicipal de Desenvolvimento Regional do Vale do Rio Grande/CONVALE	Uberaba	Água Comprida, Campo Florido, Pirajuba, Uberaba
Consórcio Intermunicipal para Gestão de Resíduos Sólidos da Região do Alto Rio Pardo	Rio Pardo de Minas	Berizal, Indaiabira, Ninheira, Rio Pardo de Minas, São João do Paraíso, Taiobeiras
Consórcio Intermunicipal para Gestão de Resíduos Sólidos do Entorno de Salinas	Salinas	Curral de Dentro, Fruta de Leite, Novorizonte, Padre Carvalho, Salinas, Santa Cruz de Salinas, Rubelita
Consórcio Médio Paraopebano de Resíduos Sólidos Urbanos/COMPARESOLURB	Betim	Betim, Brumadinho, Ibirité, Igarapé, Itatiaiuçu, Juatuba, Mário Campos, Mateus Leme, São Joaquim de Bicas, Sarzedo

Fonte: FUNASA, 2018.

Tabela 13: Valores encontrados para os Aterros do Estado de São Paulo para a primeira metodologia de Precificação.

Aterro	Investimento (R\$/m ³)	Potência (Capacidade Instalada) (m ³ /dia)	CAPEX (R\$)	O&M (R\$/ANO)	VPL (R\$)	TIR	Q Utilizável (toneladas m ³)
CONTRALIX	R\$ 1,099.00	3000	R\$ 3,297,000.00	R\$ 692,370.00	-R\$ 3,641,651.50	-1%	9942.6
CIPP	R\$ 699.00	7500	R\$ 5,276,246.78	R\$ 1,108,011.82	-R\$ 4,512,384.21	3%	19352.9
CIDAS	R\$ 525.00	18000	R\$ 9,450,000.00	R\$ 1,984,500.00	R\$ 2,716,668.89	12%	52897.7
SIGEINRES	R\$ 525.00	19000	R\$ 9,975,000.00	R\$ 2,094,750.00	R\$ 4,521,622.84	13%	58587.9
INTEGRAÇÃO	R\$ 337.00	24000	R\$ 8,088,000.00	R\$ 1,698,480.00	R\$ 5,997,237.59	14%	56188.1
AMVAPA	R\$ 449.00	30000	R\$ 13,470,000.00	R\$ 2,828,700.00	R\$ 9,388,475.95	14%	87338.9
CISBRA	R\$ 399.00	40000	R\$ 15,960,000.00	R\$ 3,351,600.00	R\$ 47,035,984.18	26%	116065.7
CIAS	R\$ 337.00	85000	R\$ 29,156,183.57	R\$ 6,122,798.55	R\$ 51,368,622.61	20%	244266.6
CONSIMARES	R\$ 337.00	100200	R\$ 33,767,400.00	R\$ 7,091,154.00	R\$ 64,955,161.16	21%	290629.4
CONISUD	R\$ 337.00	125000	R\$ 42,125,000.00	R\$ 8,846,250.00	R\$ 82,243,324.74	21%	365209.9
ABC	R\$ 337.00	260000	R\$ 87,620,000.00	R\$ 18,400,200.00	R\$ 183,683,191.69	22%	774942.5
CONDEMAT	R\$ 337.00	270000	R\$ 90,990,000.00	R\$ 19,107,900.00	R\$ 192,081,816.45	22%	808309.0

Fonte: Elaboração Própria.

Tabela 14: Valores encontrados para os Aterros do Estado do Rio de Janeiro para a primeira metodologia de Precificação.

Aterro	Investimento (R\$/m³)	Potência (Capacidade Instalada) (m³/dia)	CAPEX (R\$)	O&M (R\$/ANO)	VPL (R\$)	TIR	Q Utilizável (milhões de m³)
CPGRS VALE DO CAFÉ	R\$ 399.00	29000	R\$ 11,571,000.00	R\$ 2,429,910.00	R\$ 15,510,331.38	18%	86.85
SERRANA 1	R\$ 399.00	33000	R\$ 13,167,000.00	R\$ 2,765,070.00	R\$ 12,341,230.21	16%	91.23
LAGOS 1	R\$ 399.00	40000	R\$ 15,960,000.00	R\$ 3,351,600.00	R\$ 21,330,711.19	18%	121.21
CPGRS CENTRO SUL	R\$ 337.00	48000	R\$ 16,176,000.00	R\$ 3,396,960.00	R\$ 30,903,490.75	21%	139.00
CPGRS NOROESTE	R\$ 337.00	55000	R\$ 18,535,000.00	R\$ 3,892,350.00	R\$ 38,954,973.21	22%	165.31
CPGRS SERRANAS 2	R\$ 337.00	68000	R\$ 22,916,000.00	R\$ 4,812,360.00	R\$ 47,025,165.19	22%	201.12
BAIXADA FLUMINENSE	R\$ 337.00	400000	R\$ 134,800,000.00	R\$ 28,308,000.00	R\$ 294,100,224.87	23%	1212.81

Fonte: Elaboração Própria.

Tabela 15: Valores encontrados para os Aterros do Estado do Espírito Santo para a primeira metodologia de Precificação.

Aterro	Investimento (R\$/m ³)	Potência (Capacidade Instalada) (m ³ /dia)	CAPEX (R\$)	O&M (R\$/ANO)	VPL (R\$)	TIR	Q Utilizável (milhões de m ³)
CONORTE	R\$ 337.00	50000	R\$ 17,261,822.21	R\$ 3,624,982.66	R\$ 29,648,342.19	20%	143.19
CONSUL	R\$ 337.00	72000	R\$ 24,264,000.00	R\$ 5,095,440.00	R\$ 48,886,551.20	22%	211.82
CONDOESTE	R\$ 337.00	120000	R\$ 40,440,000.00	R\$ 8,492,400.00	R\$ 27,539,501.97	14%	280.75

Fonte: Elaboração Própria.

Tabela 16: Valores encontrados para os Aterros do Estado de Minas Gerais para a primeira metodologia de Precificação.

Aterro	Investimento (R\$/m ³)	Potência (Capacidade Instalada) (m ³ /dia)	CAPEX (R\$)	O&M (R\$/ANO)	VPL (R\$)	TIR	Q Utilizável (milhões de m ³)
CONCASS	R\$ 1,099.00	1500	R\$ 1,648,500.00	R\$ 346,185.00	-R\$ 2,045,960.83	-3%	4.60
4 Ambiental	R\$ 1,099.00	3000	R\$ 3,297,000.00	R\$ 692,370.00	-R\$ 4,610,380.57	-5%	8.46
CIGRESS	R\$ 1,099.00	3000	R\$ 3,297,000.00	R\$ 692,370.00	-R\$ 4,492,108.36	-4%	8.66
Alto e Médio Carangola	R\$ 999.00	5200	R\$ 5,194,800.00	R\$ 1,090,908.00	-R\$ 6,469,036.76	-2%	14.77
ENTORNO DE SALINAS	R\$ 949.00	5500	R\$ 5,219,500.00	R\$ 1,096,095.00	-R\$ 4,598,510.62	2%	17.83
CPGIRS	R\$ 799.00	7000	R\$ 5,593,000.00	R\$ 1,174,530.00	-R\$ 4,073,833.25	4%	21.07
RIDES	R\$ 799.00	7000	R\$ 5,937,713.32	R\$ 1,246,919.80	-R\$ 4,497,071.15	3%	21.82
CICANASTRA	R\$ 699.00	10000	R\$ 6,990,000.00	R\$ 1,467,900.00	-R\$ 3,281,646.89	6%	29.45
CPGIRS MÉDIO PIRACICABA	R\$ 699.00	10000	R\$ 6,990,000.00	R\$ 1,467,900.00	-R\$ 3,281,956.93	6%	29.46
CIMFAS	R\$ 699.00	10500	R\$ 7,339,500.00	R\$ 1,541,295.00	-R\$ 4,661,749.32	5%	29.37

Continua

Aterro	Investimento (R\$/m ³)	Potência (Capacidade Instalada) (m ³ /dia)	CAPEX (R\$)	O&M (R\$/ANO)	VPL (R\$)	TIR	Q Utilizável (milhões de m ³)
CORESAB BOA VISTA	R\$ 649.00	13000	R\$ 8,437,000.00	R\$ 1,771,770.00	-R\$ 2,163,343.22	8%	38.89
REGIÃO DO ALTO RIO PARDO	R\$ 639.00	14000	R\$ 8,946,000.00	R\$ 1,878,660.00	-R\$ 472,394.67	10%	44.16
CIMASAS	R\$ 599.00	15000	R\$ 8,985,000.00	R\$ 1,886,850.00	R\$ 576,695.94	10%	46.39
ECOTRES	R\$ 549.00	17000	R\$ 9,333,000.00	R\$ 1,959,930.00	R\$ 1,463,467.03	11%	50.52
CIDSEEA	R\$ 525.00	19000	R\$ 9,975,000.00	R\$ 2,094,750.00	R\$ 4,256,257.40	13%	58.15
CIAS CENTRO OESTE	R\$ 525.00	20000	R\$ 10,500,000.00	R\$ 2,205,000.00	2502043.846	12%	59.29
CONRESOL	R\$ 525.00	21000	R\$ 11,025,000.00	R\$ 2,315,250.00	R\$ 5,390,916.43	13%	65.17
CIGEDAS	R\$ 499.00	23500	R\$ 11,726,500.00	R\$ 2,462,565.00	R\$ 5,359,604.87	13%	69.33
CIRSU	R\$ 489.00	26000	R\$ 12,714,000.00	R\$ 2,669,940.00	R\$ 8,352,259.27	14%	79.03
CONVALE	R\$ 399.00	37000	R\$ 14,763,000.00	R\$ 3,100,230.00	R\$ 17,299,038.91	17%	107.39
CIAMESF	R\$ 399.00	38000	R\$ 15,162,000.00	R\$ 3,184,020.00	R\$ 17,422,700.45	17%	109.39
CORESAB CENTRAL DE MINAS	R\$ 399.00	40200	R\$ 16,039,800.00	R\$ 3,368,358.00	R\$ 9,017,427.68	14%	101.81
UNIÃO DA SERRA GERAL	R\$ 339.00	45000	15,255,000.00	3,203,550.00	33,523,640.22	23%	137.68
CIMAJE	R\$ 337.00	50000	R\$ 16,850,000.00	R\$ 3,538,500.00	R\$ 17,172,233.72	16%	122.62
CONVALES NOROESTE DE MINAS	R\$ 337.00	53000	R\$ 18,046,591.52	R\$ 3,789,784.22	R\$ 35,123,842.59	21%	155.80
CODANORTE	R\$ 337.00	69000	R\$ 23,253,000.00	R\$ 4,883,130.00	R\$ 44,959,345.37	21%	200.34
COMPARESOLURB	R\$ 337.00	69000	R\$ 23,253,000.00	R\$ 4,883,130.00	R\$ 35,996,392.58	19%	187.78
CIDES	R\$ 337.00	100000	R\$ 34,646,480.72	R\$ 7,275,760.95	R\$ 67,202,615.88	21%	298.37

Fonte: Elaboração Própria.

Tabela 17: Valores encontrados para os Aterros do Estado de São Paulo para a segunda metodologia de Precificação.

Aterro	Investimento (R\$/m ³)	Potência (Capacidade Instalada) (m ³ /dia)	CAPEX (R\$)	O&M (R\$/ANO)	VPL (R\$)	TIR	Q Utilizável (toneladas m ³)
CONTRALIX	R\$ 1,099.00	3000.00	R\$ 3,297,000.00	R\$ 692,370.00	-R\$ 1,140,116.93	7%	9942.6
CIPP	R\$ 699.00	7500.00	R\$ 5,276,246.78	R\$ 1,108,011.82	R\$ 83,770.37	10%	19352.9
CIDAS	R\$ 525.00	18000.00	R\$ 9,450,000.00	R\$ 1,984,500.00	R\$ 15,815,893.96	30%	52897.7
SIGEINRES	R\$ 525.00	19000.00	R\$ 9,975,000.00	R\$ 2,094,750.00	R\$ 19,094,113.08	21%	58587.9
INTEGRAÇÃO	R\$ 337.00	24000.00	R\$ 8,088,000.00	R\$ 1,698,480.00	R\$ 18,863,666.01	22%	56188.1
AMVAPA	R\$ 449.00	30000.00	R\$ 13,470,000.00	R\$ 2,828,700.00	R\$ 30,546,396.56	23%	87338.9
CISBRA	R\$ 399.00	40000.00	R\$ 15,960,000.00	R\$ 3,351,600.00	R\$ 18,598,069.70	17%	116065.7
CIAS	R\$ 337.00	85000.00	R\$ 29,156,183.57	R\$ 6,122,798.55	R\$ 111,159,535.56	30%	244266.6
CONSIMARES	R\$ 337.00	100200.00	R\$ 33,767,400.00	R\$ 7,091,154.00	R\$ 136,664,403.69	31%	290629.4
CONISUD	R\$ 337.00	125000.00	R\$ 42,125,000.00	R\$ 8,846,250.00	R\$ 172,247,001.31	31%	365209.9
ABC	R\$ 337.00	260000.00	R\$ 87,620,000.00	R\$ 18,400,200.00	R\$ 376,577,813.48	33%	774942.5
CONDEMAT	R\$ 337.00	270000.00	R\$ 90,990,000.00	R\$ 19,107,900.00	R\$ 392,996,693.30	33%	808309.0

Fonte: Elaboração Própria.

Tabela 18: Valores encontrados para os Aterros do Estado do Rio de Janeiro para a segunda metodologia de Precificação.

Aterro	Investimento (R\$/m ³)	Potência (Capacidade Instalada) (m ³ /dia)	CAPEX (R\$)	O&M (R\$/ANO)	VPL (R\$)	TIR	Q Utilizável (milhões de m ³)
CPGRS VALE DO CAFÉ	R\$ 399.00	29000.00	R\$ 11,571,000.00	R\$ 2,429,910.00	R\$ 37,041,340.58	28%	86.85
SERRANA 1	R\$ 399.00	33000.00	R\$ 13,167,000.00	R\$ 2,765,070.00	R\$ 34,449,319.31	24%	91.23
LAGOS 1	R\$ 399.00	40000.00	R\$ 15,960,000.00	R\$ 3,351,600.00	R\$ 51,000,326.44	27%	121.21
CPGRS CENTRO SUL	R\$ 337.00	48000.00	R\$ 16,176,000.00	R\$ 3,396,960.00	R\$ 65,159,327.69	31%	139.00
CPGRS NOROESTE	R\$ 337.00	55000.00	R\$ 18,535,000.00	R\$ 3,892,350.00	R\$ 79,804,188.61	32%	165.31
CPGRS SERRANAS 2	R\$ 337.00	68000.00	R\$ 22,916,000.00	R\$ 4,812,360.00	R\$ 97,017,006.03	32%	201.12
BAIXADA FLUMINENSE	R\$ 337.00	400000.00	R\$ 134,800,000.00	R\$ 28,308,000.00	R\$ 596,049,471.67	33%	1212.81

Fonte: Elaboração Própria.

Tabela 19: Valores encontrados para os Aterros do Estado do Espírito Santo para a segunda metodologia de Precificação.

Aterro	Investimento (R\$/m ³)	Potência (Capacidade Instalada) (m ³ /dia)	CAPEX (R\$)	O&M (R\$/ANO)	VPL (R\$)	TIR	Q Utilizável (milhões de m ³)
CONORTE	R\$ 337.00	50000.00	R\$ 17,261,822.21	R\$ 3,624,982.66	R\$ 66,130,857.84	30%	143.19
CONSUL	R\$ 337.00	72000.00	R\$ 24,264,000.00	R\$ 5,095,440.00	R\$ 101,411,262.25	32%	211.82
CONDOESTE	R\$ 337.00	120000.00	R\$ 40,440,000.00	R\$ 8,492,400.00	R\$ 95,370,415.49	22%	280.75

Fonte: Elaboração Própria.

Tabela 20: Valores encontrados para os Aterros do Estado de Minas Gerais para a segunda metodologia de Precificação.

Aterro	Investimento (R\$/m ³)	Potência (Capacidade Instalada) (m ³ /dia)	CAPEX (R\$)	O&M (R\$/ANO)	VPL (R\$)	TIR	Q Utilizável (milhões de m ³)
CONCASS	R\$ 1,099.00	1500.00	R\$ 1,648,500.00	R\$ 346,185.00	-R\$ 896,670.10	6%	4.60
4 Ambiental	R\$ 1,099.00	3000.00	R\$ 3,297,000.00	R\$ 692,370.00	-R\$ 2,545,487.37	4%	8.46
CIGRESS	R\$ 1,099.00	3000.00	R\$ 3,297,000.00	R\$ 692,370.00	-R\$ 2,373,905.59	4%	8.66
Alto e Médio Carangola	R\$ 999.00	5200.00	R\$ 5,194,800.00	R\$ 1,090,908.00	-R\$ 2,857,161.32	6%	14.77
ENTORNO DE SALINAS	R\$ 949.00	5500.00	R\$ 5,219,500.00	R\$ 1,096,095.00	-R\$ 112,483.47	10%	17.83
CPGIRS	R\$ 799.00	7000.00	R\$ 5,593,000.00	R\$ 1,174,530.00	R\$ 1,118,019.37	11%	21.07
RIDES	R\$ 799.00	7000.00	R\$ 5,937,713.32	R\$ 1,246,919.80	R\$ 937,174.20	11%	21.82
CICANASTRA	R\$ 699.00	10000.00	R\$ 6,990,000.00	R\$ 1,467,900.00	R\$ 4,022,721.47	14%	29.45
CPGIRS MÉDIO PIRACICABA	R\$ 699.00	10000.00	R\$ 6,990,000.00	R\$ 1,467,900.00	R\$ 4,022,271.69	14%	29.46
CIMFAS	R\$ 699.00	10500.00	R\$ 7,339,500.00	R\$ 1,541,295.00	R\$ 2,459,733.04	12%	29.37
CORESAB BOA VISTA	R\$ 649.00	13000.00	R\$ 8,437,000.00	R\$ 1,771,770.00	R\$ 7,463,363.02	16%	38.89
REGIÃO DO ALTO RIO PARDO	R\$ 639.00	14000.00	R\$ 8,946,000.00	R\$ 1,878,660.00	R\$ 10,556,085.03	18%	44.16
CIMASAS	R\$ 599.00	15000.00	R\$ 8,985,000.00	R\$ 1,886,850.00	R\$ 12,127,045.67	18%	46.39
ECOTRES	R\$ 549.00	17000.00	R\$ 9,333,000.00	R\$ 1,959,930.00	R\$ 13,850,808.11	19%	50.52
CIDSEEA	R\$ 525.00	19000.00	R\$ 9,975,000.00	R\$ 2,094,750.00	R\$ 18,709,137.81	21%	58.15
CIAS CENTRO OESTE	R\$ 525.00	20000.00	R\$ 10,500,000.00	R\$ 2,205,000.00	R\$ 14,064,694.91	17%	59.29
CONRESOL	R\$ 525.00	21000.00	R\$ 11,025,000.00	R\$ 2,315,250.00	R\$ 21,674,642.61	22%	65.17
CIGEDAS	R\$ 499.00	23500.00	R\$ 11,726,500.00	R\$ 2,462,565.00	R\$ 22,510,711.85	21%	69.33
CIRSU	R\$ 489.00	26000.00	R\$ 12,714,000.00	R\$ 2,669,940.00	R\$ 28,093,141.49	23%	79.03
CONVALE	R\$ 399.00	37000.00	R\$ 14,763,000.00	R\$ 3,100,230.00	R\$ 43,647,301.36	26%	107.39

Continua

Conclusão

Aterro	Investimento (R\$/m³)	Potência (Capacidade Instalada) (m³/dia)	CAPEX (R\$)	O&M (R\$/ANO)	VPL (R\$)	TIR	Q Utilizável (milhões de m³)
CIAMESF	R\$ 399.00	38000.00	R\$ 15,162,000.00	R\$ 3,184,020.00	R\$ 44,328,078.87	26%	109.39
CORESAB CENTRAL DE MINAS	R\$ 399.00	40200.00	R\$ 16,039,800.00	R\$ 3,368,358.00	R\$ 33,237,274.26	21%	101.81
UNIÃO DA SERRA GERAL	R\$ 339.00	45000.00	R\$ 15,255,000.00	R\$ 3,203,550.00	R\$ 67,803,159.35	33%	137.68
CIMAJE	R\$ 337.00	50000.00	R\$ 16,850,000.00	R\$ 3,538,500.00	R\$ 46,085,832.36	24%	122.62
CONVALES NOROESTE DE MINAS	R\$ 337.00	53000.00	R\$ 18,046,591.52	R\$ 3,789,784.22	R\$ 73,632,501.74	31%	155.80
CODANORTE	R\$ 337.00	69000.00	R\$ 23,253,000.00	R\$ 4,883,130.00	R\$ 94,443,515.16	31%	200.34
COMPARESOLURB	R\$ 337.00	69000.00	R\$ 23,253,000.00	R\$ 4,883,130.00	R\$ 81,440,634.01	28%	187.78
CIDES	R\$ 337.00	100000.00	R\$ 34,646,480.72	R\$ 7,275,760.95	R\$ 141,029,507.11	31%	298.37

Fonte: Elaboração Própria.