



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Érica Machado da Silva Guerreiro

**Potencial de Aproveitamento Energético de Biometano Gerado em Aterros
Sanitários: Estudo de Casos**

Rio de Janeiro

2020

Érica Machado da Silva Guerreiro

**Potencial de Aproveitamento Energético de Biometano Gerado em Aterros Sanitários:
Estudo de Casos**



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Saneamento Ambiental - Controle da Poluição Urbana e Industrial.

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Elisabeth Ritter

Coorientador: Dr. Bernardo Ornelas Ferreira

Rio de Janeiro

2020

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

G934 Guerreiro, Érica Machado da Silva.
Potencial de aproveitamento energético de biometano Gerado em aterros sanitários: estudo de casos / Érica Machado da Silva Guerreiro. – 2020.
102f.

Orientadora: Elisabeth Ritter.
Coorientador: Bernardo Ornelas Ferreira.
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia ambiental - Teses. 2. Gestão integrada de resíduos sólidos - Teses. 3. Aterro sanitário - Teses. 4. Biogás - Teses. 5. Energia - Fontes alternativas - Teses. I. Ritter, Elisabeth. II. Ferreira, Bernardo Ornelas. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. IV. Título.

CDU 628.4:620.95

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citada a fonte.

Érica Machado da Silva Guerreiro

Assinatura

25/11/2020

Data

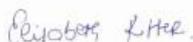
Érica Machado da Silva Guerreiro

**Potencial de Aproveitamento Energético de Biometano Gerado em Aterros Sanitários:
Estudo de Casos**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Saneamento Ambiental - Controle da Poluição Urbana e Industrial.

Aprovada em 25 de novembro de 2020.

Banca Examinadora:



Prof^ª. Dr^ª. Elisabeth Ritter (Orientadora)

Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ



Dr. Bernardo Ornelas Ferreira (Coorientador)

Companhia Municipal de Limpeza Urbana - COMLURB



Prof^ª. Dr^ª. Ana Ghislane Henriques Pereira van Elk

Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ



Prof. Dr. José Fernando Thomé Jucá

Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

Rio de Janeiro

2020

DEDICATÓRIA

À classe acadêmica brasileira, que mesmo após sofrer inexoráveis tentativas de descredibilidade, persiste resiliente e dedicada ao seu maior objetivo: buscar soluções que tragam contribuições à sociedade.

Aos meus pais, pelo apoio incondicional aos meus estudos.

AGRADECIMENTOS

À Universidade do Estado do Rio de Janeiro, pelo seu ambiente inclusivo e acolhedor, ao qual me recebeu de braços abertos em um momento de recomeço de minha vida profissional.

A todos os meus professores do Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental (PEAMB/UERJ), pelos ensinamentos. Agradeço, inclusive, aos meus colegas de turma por terem transformado nossas salas de aulas em um ambiente tão leve e agradável para estudar.

À minha família e amigos, por estarem ao meu lado em toda essa trajetória.

À minha querida orientadora Dr^a. Elisabeth Ritter, por ter acreditado em mim e apoiado o meu tema desde o início, além de dividir sua sabedoria de vida em nossas conversas.

Ao meu querido coorientador Dr. Bernardo Ornelas Ferreira, pela gentileza em dedicar seu tempo a compartilhar seus preciosos conselhos ao longo dessa incrível jornada.

À ANP, pelo fornecimento de dados tão importantes à concretização da minha pesquisa.

Ao GNR Dois Arcos e ao GNR Fortaleza, pela autorização para realização de trabalho de campo. Obrigada por abrirem suas portas à ciência!

Se você tem uma ideia que realmente acredita ser boa não deixe ninguém te fazer desistir. Porque eu acho que você só consegue fazer o seu melhor trabalho se estiver fazendo o que você quer, do jeito que você acha que tem que ser feito e se você tiver orgulho do que você acabou de fazer, não importa o que seja.

Stan Lee

RESUMO

GUERREIRO, Érica Machado da Silva. *Potencial de aproveitamento energético de biometano gerado em aterros sanitários: estudo de casos*. 2020. 102f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

Segundo o Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos (SNIS, 2017) das 60,6 milhões de toneladas de resíduos coletados no Brasil aproximadamente 64,2% foram dispostos em aterros sanitários. Um dos maiores desafios dos municípios é buscar alternativas economicamente viáveis ao gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos. Dessa forma, a purificação de biogás com vistas à produção de biometano mostra-se como uma promissora estratégia local de alternativa energética. A presente pesquisa tem como objetivo avaliar as especificações para produção e utilização energética de biometano produzido em aterros sanitários. A primeira etapa do processo de estudo envolveu a identificação das instalações produtoras de biometano autorizadas pela ANP, assim como a de normas e resoluções de regulamentação de qualidade e produção de biometano no país. Em seguida, foi realizado o levantamento de dados secundários relacionados à qualidade de biometano produzido em tais instalações e os de dados de caracterização dos aterros sanitários. Por fim, foi feito trabalho de campo às instalações produtoras de biometano com licença de operação em aterros sanitários para coleta e confirmação de dados adicionais. Foi observado durante o estudo que o aproveitamento energético do biometano mostra-se competitivo em relação às demais alternativas energéticas (como gás natural e gás liquefeito de petróleo - GLP) pois sua comercialização não sofre impactos de volatilização de moeda estrangeira, seja para finalidades de injeção na rede de distribuição de gás natural e compressão e venda, assim como de usos finais de gás de cozinha, geração de calor em indústrias e combustível veicular. O processo de purificação quando bem operado e dimensionado corretamente, resultou no atendimento e similaridade das especificações de desempenho entre o biometano e o gás natural, confirmando a capacidade de intercambiabilidade entre os mesmos. A produção de biometano em aterros sanitários se apresenta economicamente viável e factível quando as empresas, operadora do aterro e produtora de biometano, atuam como parceiras e funcionam de maneira integrada, facilitando a transparência de dados e a tomada de decisões no cotidiano operacional.

Palavras-chave: Resíduos sólidos urbanos; Aterros sanitários; Biogás; Biometano; Energia renovável.

ABSTRACT

GUERREIRO, Érica Machado da Silva. *Energy recovery potential of biomethane from landfill: case study*. 2020. 102f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

According to the National System of Sanitation Information (SNIS, 2017) of the 60.6 million tons of waste collected in Brazil approximately 64.2% were disposed in landfill. One of the biggest challenges for municipalities is to seek economically viable alternatives to the municipal solid waste management. Thus, the biogas upgrading to biomethane is a promising local strategy for alternative energy. This research aims to evaluate the specifications for the production and energy use of biomethane produced in landfills. The first stage of this study process involved the identification of biomethane production facilities authorized by the Brazilian National Agency of Petroleum, Natural Gas and Biofuels (ANP), as well as the standards and resolutions for quality regulation and production of biomethane in the country. A secondary data was collected for biomethane's quality in those facilities and the landfills characterization. Finally, it was made a field research at the biomethane facilities with an operating license in landfills in order to collect and confirm additional informations. It was noted during the study that the energy use of biomethane is competitive in relation to others energy alternatives (such as natural gas and liquefied petroleum gas – LPG) due to the commercial purposes of injection into the natural gas grid and compression for sale, both considered promising applications. The purification process when well operated and well-dimensioned resulted in the accordance with specifications and similarity of performance between biomethane and natural gas, confirming the interchangeability capacity between them. The biomethane production in landfills is economically viable and achievable when the companies operating the landfill and the biomethane production act as partners and work well-integrated, providing data transparency and easily decision-making during daily operations.

Keywords: Municipal solid waste; Landfill; Biogas; Biomethane; Renewable energy.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Rotas tecnológicas de tratamento e recuperação energética de resíduos sólidos urbanos	19
Figura 2 – Hierarquização da Gestão de Resíduos Sólidos no Brasil	20
Figura 3 – Percentual de municípios e respectivas destinações finais de resíduos domiciliares e públicos, por região geográfica.....	21
Figura 4 – Estimativa gráfica de produção de biogás de resíduos orgânicos de rápida e de difícil digestão depositados em aterros sanitários	26
Figura 5 – Efeito da baixa umidade na produção de biogás em aterros sanitários	26
Figura 6 – Sequência de fases de geração dos principais gases de aterro sanitário.....	28
Figura 7 – Estimativas de emissões de CO _{2eq} (t) do setor de resíduos no Brasil (1990-2018).....	31
Figura 8 – Estimativas de emissões de GEE em 2018 no Brasil por setor.....	32
Figura 9 – Emissões de CH ₄ evitadas por projetos MDL em aterros brasileiros	33
Figura 10 – Emissões de CH ₄ (em mil toneladas) provenientes da Disposição de Resíduos Sólidos.....	33
Figura 11 – Evolução cronológica das medidas regulatórias nacionais para o biometano	34
Figura 12 – Dreno vertical equipado com cabeçote regulável	36
Figura 13 – Queima de gás residual no <i>flare</i>	37
Figura 14 – Tecnologias de purificação de biogás	41
Figura 15 – Processo de PSA	42
Figura 16 – Processo de Lavagem com Água	43
Figura 17 – Solubilidades do dióxido de carbono e metano em água	43
Figura 18 – Processo de Lavagem com Solvente Orgânico	44
Figura 19 – Processo de Lavagem Química.....	45
Figura 20 – Processo por Permeação (Separação por Membrana).....	46
Figura 21 – Processos mais utilizados em plantas de purificação de biogás no mundo.....	48
Figura 22 – Sistema de monitoramento de uma planta de purificação de biogás.....	50
Figura 23 – Fins Comerciais do Biometano	52
Figura 24 – Possibilidades de Aproveitamento Energético do Biogás em Aterros Sanitários e de usos finais de Biometano.....	57
Figura 25 – Comparação da participação de fontes renováveis entre o Brasil e o mundo	59
Figura 26 – Fluxograma de etapas da pesquisa	62
Figura 27 – Caminhão-feixe para transporte de cilindros de biometano comprimido	67
Figura 28 – Planta de purificação de biogás GNR Fortaleza	69
Figura 29 – Planta de purificação de biogás GNR Dois Arcos	70

Figura 30 – Planta de purificação de biogás da Gás Verde no aterro sanitário de Seropédica	70
Figura 31 – Carregamento de caminhão para transporte de biometano a postos GNV.....	71
Figura 32 – Vista superior do Aterro de Dois Arcos (RJ).....	78
Figura 33 – Vista superior do Aterro de Fortaleza (CE)	78
Figura 34 – Transmissor de Pressão.....	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição física de RSU de municípios de diferentes regiões do Brasil	22
Tabela 2 – Composição média de biogás de aterros sanitários	29
Tabela 3 – Tipos de impurezas e suas respectivas tecnologias de limpeza	39
Tabela 4 – Vantagens e desvantagens dos processos de purificação de biogás	47
Tabela 5 – Estimativas de concentração de CH ₄ e possíveis perdas em processos de purificação de biogás	49
Tabela 6 – Especificações do biometano oriundo de aterros sanitários.	53
Tabela 7 – Parâmetros de verificação e os resultados esperados para confirmação dos objetivos específicos	63
Tabela 8 – Instalações produtoras de biometano autorizadas pela ANP	65
Tabela 9 – Caracterização dos aterros sanitários com instalações produtoras de biometano	68
Tabela 10 – Finalidades comerciais e usos finais de biometano de aterros sanitários	72
Tabela 11 – Comparação de valores típicos de características de desempenho (PCS, IW e Teor de Metano) entre o biometano (de aterros sanitários) e gás natural	74
Tabela 12 – Comparação de valores de siloxanos, halogenados clorados e halogenados fluorados presentes no biometano produzido em instalações de aterros sanitários	75
Tabela 13 – Comparação de percentuais de O ₂ , CO ₂ , Inertes, H ₂ S e valores de ponto de orvalho de água presentes no biometano	77
Tabela 14 – Aterros sanitários de pequeno e grande portes com instalações produtoras de biometano autorizadas pela ANP	79
Tabela 15 – Capacidades de processamento de biogás e de produção de biometano das instalações em aterros sanitários	79
Tabela 16 – Caracterização do produtor de biometano GNR Fortaleza (CE)	82
Tabela 17 – Caracterização do produtor de biometano GNR Dois Arcos (RJ)	84

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	13
1. OBJETIVOS	17
1.1 Objetivo Geral	17
1.2 Objetivos Específicos	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 Panorama dos Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil	18
2.2 Biogás de Aterros Sanitários	24
2.2.1 Formação do Biogás em Aterros Sanitários	24
2.2.2 Composição do Biogás de Aterro Sanitário	28
2.2.3 Mitigação de Emissões de Gases de Efeito Estufa	29
2.3 Transformação do Biogás em Biometano	34
2.3.1 Regulamentação do Biometano	34
2.3.2 Captação de Biogás	35
2.3.3 Tratamento de Biogás	37
2.3.3.1 Secagem de Biogás.....	39
2.3.3.2 Purificação de Biogás	40
2.4 Potencial do Biometano Oriundo de Aterros Sanitários	52
2.4.1 Especificações do Biometano	52
2.4.2 Adequação do Biometano à Qualidade de Gás Natural	55
2.5 Aplicações do Biometano Oriundo de Aterros Sanitários	57
2.5.1 Usos Finais do Biometano	57
2.5.2 Competitividade do Biometano Frente aos Demais Vetores de Energia	58
3. METODOLOGIA	61
4. RESULTADOS	64
4.1 Capacidade de Produção de Biometano em Instalações Autorizadas no Brasil.....	64
4.2 Finalidades Comerciais e Usos Finais de Biometano em Instalações Produtoras....	71
4.3 Comparação das Qualidades entre o Biometano e o Gás Natural.....	73
4.4 Produção de Biometano em Aterros Sanitários de Diferentes Portes.....	78
4.5 Incentivos e Desafios ao Biometano	86
CONCLUSÕES	89

REFERÊNCIAS	91
ANEXO A – FICHA CADASTRAL DE PRODUTOR DE BIOMETANO	97

INTRODUÇÃO

Segundo estimativas do Panorama dos Resíduos Sólidos publicado pela ABRELPE (Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais), foram geradas em 2018 cerca de 79 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos (RSU) no Brasil (ABRELPE, 2019). A quantidade significativa de dados relacionados à geração de resíduos acompanha um padrão de consumo desenfreado e que se torna ainda maior a cada dia. Em meio à cultura de desperdício, a sociedade consome além das necessidades básicas à sobrevivência. E por isso, a busca por alternativas economicamente viáveis ao gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos vem sendo um dos maiores desafios, em especial às pequenas cidades do país, que ainda sofrem com a disposição inadequada de resíduos.

Um dos maiores desafios às grandes cidades é buscar alternativas economicamente viáveis ao gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos. Para a elaboração de um plano de gestão integrada de resíduos sólidos para uma determinada localidade, é necessário coletar diversas informações importantes, como por exemplo: quantidade e composição dos resíduos gerados, possíveis impactos ambientais a serem ocasionados, local de disposição dos resíduos, alternativas de recuperação de recursos, dentre outras. Dessa forma, é possível transformar os resíduos em insumos de outros processos produtivos.

Um dos grandes obstáculos do país é agregar valor ao resíduo sólido, tornando-o economicamente viável. Algumas alternativas de valorização de resíduos vêm apresentando bons resultados, como: tratamento da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (FORSU), aproveitamento energético de biogás (com geração de energia elétrica ou de biometano), produção de combustível derivado do resíduo (CDR) e reciclagem (BNDES, 2018).

A recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos é prevista em lei, quando viável técnica e ambientalmente desde 2010, segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305/10.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010) prevê a redução de geração de resíduos através de práticas de consumo mais sustentáveis, além de instrumentos de reutilização e reciclagem. A PNRS também estabelece a disposição de resíduos aos aterros sanitários quando não há mais alternativas de viabilidade econômica para recuperação dos mesmos.

A produção de biogás em aterros sanitários ocorre de forma natural a partir da digestão anaeróbica da fração orgânica dos RSU (ORNELAS-FERREIRA, 2015) contida nas camadas do aterro, promovida por microrganismos anaeróbios.

O biogás gerado nos aterros contém, principalmente, metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂), além de outros componentes como vapor d'água, gás sulfídrico (H₂S), mercaptanas, traços de compostos orgânicos voláteis (COVs) tóxicos, dentre outros. Além de possuir componentes cancerígenos, o biogás também resulta em emissões de gases de efeito estufa (GEE). Entretanto, o seu aproveitamento energético resulta em mitigação dos impactos ambientais.

O aproveitamento energético do biogás, além de seu valor como fonte descentralizada de energia elétrica, reduz o potencial de efeito estufa dos gases emitidos na conversão do metano (CH₄) – gás que tem alto potencial de aquecimento global (GWP, da sigla em inglês para *global warming potencial*) em gás carbônico (CO₂) – com GWP mais de vinte vezes mais baixo que o CH₄, segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2014). Além disso, a recuperação energética do biogás pode substituir parcialmente as fontes fósseis e tornar a matriz energética brasileira mais renovável (IPEA, 2012).

A maior parte dos RSU gerados no Brasil, assim como em demais países em desenvolvimento, são compostos (51,4%) por materiais biodegradáveis (ALFAIA *et al.*, 2017). Dessa forma, os resíduos sólidos brasileiros são compostos majoritariamente por fração orgânica.

O aproveitamento energético dos resíduos urbanos pode ser considerado como uma alternativa para substituição em parte da demanda de combustíveis fósseis com aplicação para regiões menores. Mesmo que não seja capaz de significar uma oferta de energia elétrica ou de biocombustível com grande potencial de expansão pelo país, pode ser visto como importante estratégia energética regional ou local (EPE, 2014a).

Os impactos ambientais, assim como os custos relacionados à disposição final inadequada de resíduos, impulsionaram os mais diversos setores industriais a refletirem sobre a importância em se buscar iniciativas mais sustentáveis (ADNAN *et al.*, 2019).

O biogás pode ser usado para produzir calor, ou ainda, ser convertido em calor e energia elétrica através de uma planta de cogeração de energia - denominada como CHP, sigla em inglês para *combined heat and power* (GIZ, 2017). Outra possibilidade é a conversão de biogás em biometano por meio de etapas de purificação. Tal processo de purificação é importante, pois envolve a remoção de diversos contaminantes capazes de danificar motores e equipamentos. O biometano, cujo teor de metano é superior a 90% (ANP, 2017), por ser utilizado como um complemento ou substituto ao gás natural ganhou ainda mais importância nos últimos anos devido ao aumento da frota de veículos movidos a gás natural veicular (GNV).

O aproveitamento energético de RSU já indicava o biometano de alto poder calorífico como sendo competitivo para a aplicação de combustível veicular. Entretanto, a rota tecnológica de utilização de biometano de aterro nas redes de distribuição de gás natural apenas foi regulamentada a partir de junho de 2017, através da resolução ANP 685/2017, cujas normas de qualidade e especificações de segurança foram determinadas. Com isso, o comércio de biometano para uso veicular, residencial, industrial e comercial passou a ser permitido.

É grande a expectativa para que se abra um novo mercado para o biogás, diante dos progressos ocorridos nos últimos anos. A Resolução 685 da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), de 29 de junho de 2017, passou a permitir o uso do biometano oriundo de aterros sanitários e de estações de tratamento de esgoto para uso veicular e em substituição do gás natural. Em paralelo, o Governo criou a Política Nacional de Biocombustíveis, pela Lei 13.576 (RenovaBio), de 26 de dezembro de 2017, com vistas à expansão sustentável do mercado de biocombustíveis no Brasil. Cabe acrescentar ainda, que a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) passou a incluir em seus estudos o biogás como uma das fontes alternativas da matriz elétrica brasileira (BNDES, 2018).

A matriz energética brasileira é composta majoritariamente por fontes renováveis e por isso, buscar alternativas com potencial de substituição parcial de combustíveis fósseis apresenta-se como uma solução interessante tanto do ponto de vista econômico quanto ambiental. A presente pesquisa tem por finalidade apresentar os dados acerca das especificações para produção e utilização energética de biometano produzido em aterros sanitários. Dessa forma, o principal enfoque é a respeito da purificação do biogás para fins de aproveitamento energético do biometano, não sendo abordadas, portanto, questões relacionadas à avaliação dos resíduos dispostos, e questões relativas à construção e à operação de aterros sanitários.

No cenário brasileiro a regulação do biometano de origem de aterros foi realizada apenas em 2017. Por ser recente, o tema ainda não é amplamente abordado academicamente em função da recente implementação da tecnologia no país e por esse motivo, a maior parte das referências bibliográficas constituem informações de instituições governamentais e agências de energia. As particularidades climáticas, regionais e dos resíduos sólidos brasileiros foram fatores importantes para a priorização de estudos de origem nacional a fim de compreender os processos tecnológicos mais factíveis à realidade brasileira. Cabe ressaltar, inclusive, que a falta de acesso à transparência de dados nacionais relacionados ao setor de resíduos se mostrou um desafio adicional à condução do presente estudo.

Já no continente Europeu, referência pelo conhecimento técnico em recuperação energética de resíduos sólidos, tem sido adotado desde 2010 normativas com severas restrições ao aterramento de resíduos orgânicos e restrições à implementação de novos aterros. Por essa razão, a maior parte da produção de biometano possui sua origem no biogás de biodigestores, e não a partir de biogás de aterros sanitários, cujo assunto é a base do presente estudo. Com isso, foram encontradas dificuldades em se obter literaturas mais atualizadas a respeito do tema proposto pela presente pesquisa.

Esta dissertação encontra-se estruturada em quatro capítulos. No capítulo 1 são apresentados os objetivos. No capítulo 2, é feita revisão bibliográfica do tema, trazendo o conceito e aplicações e perspectivas futuras do biometano. Em seguida, no capítulo 3 é descrita a metodologia utilizada no trabalho, enquanto no capítulo 4, são discutidos os resultados obtidos. Ao final, são apresentadas as conclusões da pesquisa.

1. OBJETIVOS

1.1 Objetivo Geral

Apresentar as especificações para produção e utilização energética de biometano produzido em aterros sanitários.

1.2 Objetivos Específicos

- I. Estabelecer as alternativas tecnológicas de purificação de biogás aplicáveis ao Brasil para produção de biometano em aterros sanitários;
- II. Apresentar o potencial de aproveitamento energético do biometano gerado em aterro sanitário como alternativa ao gás natural;
- III. Avaliar a capacidade de produção de biometano em aterros sanitários de diferentes portes.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Panorama dos Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil

A Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS), regulamentada em 02 de agosto de 2010 através da Lei 12.305, é um importante instrumento legal que estabeleceu diretrizes para a gestão dos resíduos sólidos urbanos no Brasil. Dentre os conceitos implementados, podem-se destacar: recuperação dos gases produzidos em aterros sanitários, adoção da logística reversa dos materiais, valorização dos resíduos sólidos a partir de tecnologias de reciclagem e tratamento, práticas de compostagem, responsabilidade compartilhada pelos integrantes da cadeia produtiva e de consumo dos produtos, hierarquização na gestão de resíduos sólidos, meta de erradicação dos vazadouros a céu aberto, dentre outros.

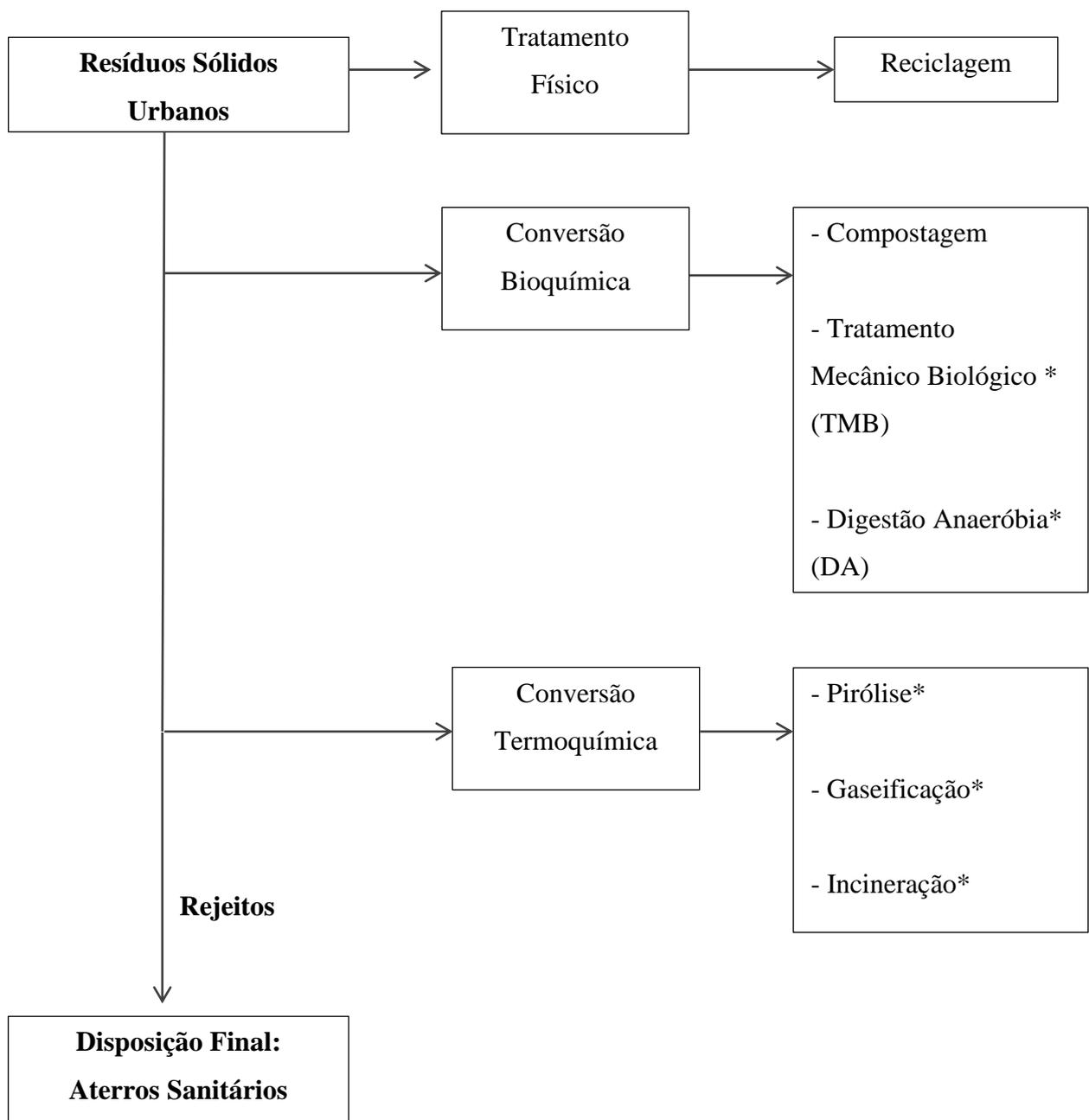
O termo rejeito é considerado no artigo Art. 3º - XV da PNRS (BRASIL, 2010) como:

“resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada”.

Dessa maneira, a disposição final é considerada como alternativa apenas após serem esgotadas todas as possibilidades de uso e tratamento dos resíduos. A principal finalidade da PNRS é destinar o mínimo possível para o aterro sanitário, dispondo apenas os rejeitos (BNDES, 2018).

Ao diferenciar as definições entre rejeitos e resíduos, a Lei permite a valorização dos resíduos sólidos, incentivando práticas de recuperação energética, as quais os resíduos se transformam em insumos de novos processos. A Figura 1 traz um esquema com as possibilidades de rotas tecnológicas de tratamentos e recuperação energética de resíduos sólidos urbanos.

Figura 1 – Rotas tecnológicas de tratamento e recuperação energética de resíduos sólidos urbanos



Fonte: Adaptado de VEIGA (2016).

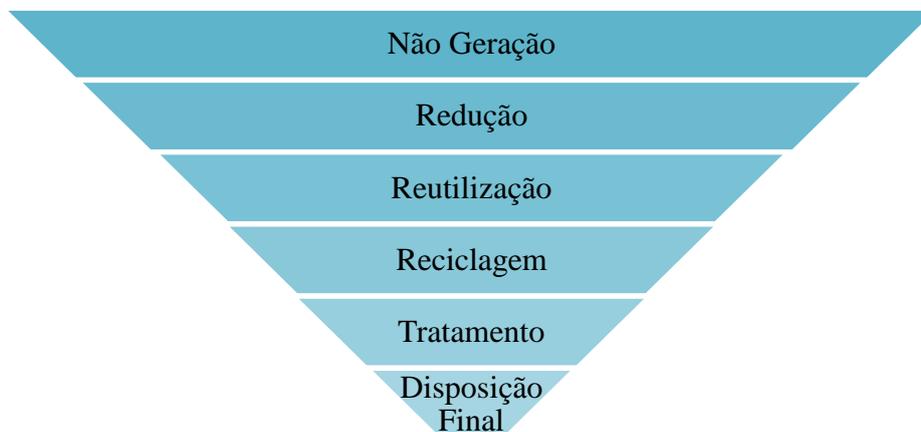
*Tecnologias de recuperação energética de resíduos (*waste-to-energy*)

Segundo GOMES *et al.* (2012) é de significativa importância conciliar a gestão adequada dos resíduos sólidos urbanos (RSU) com tecnologias que recuperem a energia presente nos resíduos e sejam capazes de reduzir a emissão dos gases causadores do efeito estufa (GEE). O

aproveitamento de biogás de aterros é a forma de mais simples e usual de uso energético de RSU (EPE, 2008).

A gestão adequada de resíduos sólidos urbanos é aspecto preliminar para a captação de biogás e produção de biometano de aterros sanitários, resoluções e demais instrumentos previstos na PNRS (VEIGA, 2016). Na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, deve ser observada a seguinte ordem de prioridade, de acordo com a PNRS: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos. A Figura 2 ilustra a hierarquização da gestão de resíduos.

Figura 2 – Hierarquização da Gestão de Resíduos Sólidos no Brasil



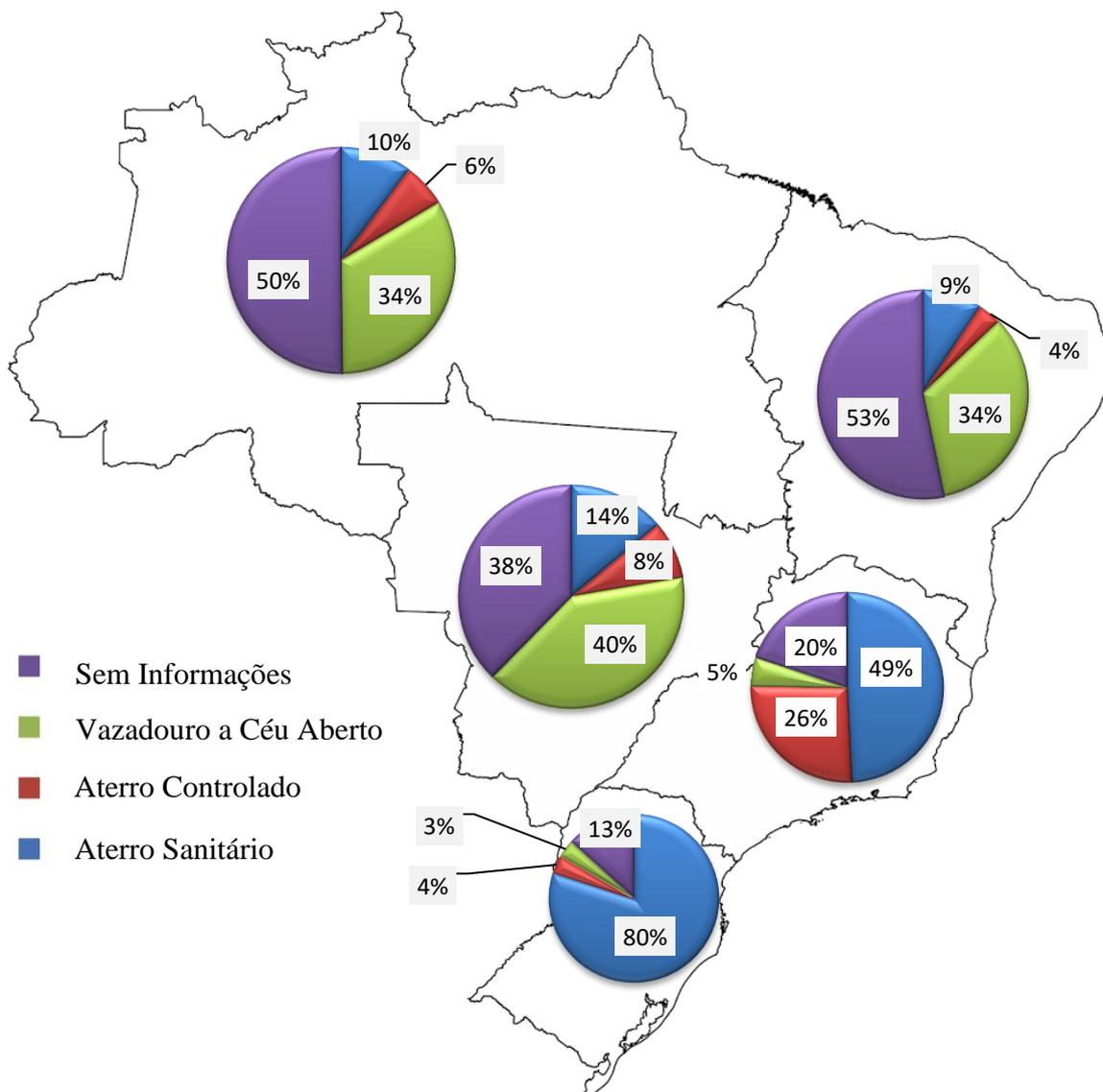
Fonte: Adaptado de BNDES (2018).

O gerenciamento de RSU tem se mostrado um grande desafio à população e às instituições públicas e privadas em função do crescimento da geração de resíduos sólidos urbanos, dificuldade de espaço para disposição final e oferta insuficiente de técnicas de tratamento (ORNELAS-FERREIRA *et al.*, 2019). Dessa maneira, cabe ressaltar que a geração de resíduos, tratamento e disposição final estão ligados ao tamanho populacional, ao PIB, ao gerenciamento de RSU pelos municípios e à gestão pelos estados e Governo Federal (BNDES, 2014).

Desde 2010, quando foi instituída a PNRS, o quadro de disposição final tem apresentado discreta melhora a cada ano, entretanto ainda distante daquele proposto pelas metas de coleta e disposição de resíduos apresentados na normativa (BNDES, 2018). Segundo o Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos (SNIS, 2017), cujas informações foram compartilhadas a

partir de 3.556 municípios brasileiros (63,8% do total do país), foi revelado que das 60,6 milhões de toneladas de resíduos coletados aproximadamente 64,2% foram dispostos em aterros sanitários. Enquanto que pelo Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil, cada brasileiro produziu em 2018, em média, 1,039 kg de resíduos por dia, o que representou uma geração total de 216.629 toneladas diárias de RSU, e deste montante, 92% (72,7 milhões de toneladas) foram coletados, sendo que apenas 59,5% tiveram disposição final adequada e foram encaminhadas para aterros sanitários (ABRELPE, 2019). A Figura 3 apresenta a representação gráfica dos percentuais de resíduos domiciliares e públicos segundo os tipos de disposição final (Aterros Sanitários, Aterros Controlados e Vazadouros a Céu Aberto) no Brasil.

Figura 3 – Percentual de municípios e respectivas destinações finais de resíduos domiciliares e públicos, por região geográfica



Fonte: Adaptado de SNIS (2017).

Na Tabela 1, pode-se observar que a matéria orgânica é a principal componente de RSU no Brasil, correspondendo a aproximadamente 51,4% de toda a composição de resíduos coletados.

Tabela 1 – Composição física de RSU de municípios de diferentes regiões do Brasil

Componente	Norte ^(a) (%)	Nordeste ^(b) (%)	Centro-Oeste ^(c) (%)	Sudeste ^(d) (%)	Sul ^(e) (%)	Brasil ^(f) (%)
Matéria Orgânica	54.68	57.00	54.02	52.00	51.27	51.4
Recicláveis:	27.46	10.31	29.72	41.70	26.87	31.9
Metal	1.09	1.74	3.64	1.66	1.46	2.9
Papel e Papelão	10.87	3.7	7.48	15.39	11.62	13.1
Plástico	14.67	3.86	16.73	21.15	11.23	13.5
Vidro	0.83	1.01	1.87	3.50	2.56	2.4
Outros	17.86	32.69	16.26	6.30	15.86	16.7
Total	100	100	100	100	100	100

Fonte: Adaptado de ALFAIA *et al.* (2017).

Dados: (a) Prefeitura Municipal de Araguaína (2013); (b) Contrato Prefeitura Municipal de Cubatí (2013); (c) Prefeitura de Paranaíba (2014); (d) Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro (2015); (e) Prefeitura de Porto Alegre (2013); (f) Ministério do Meio Ambiente (2012).

A geração de resíduos é proporcional ao crescimento populacional e ao aumento do PIB de um determinado país. Fatores como o aumento de consumo, melhorias de padrão de qualidade de vida e o poder aquisitivo das classes sociais são fatores contribuidores para esse cenário (GIZ, 2017). O excesso de resíduos gerados levou à demanda por novas tecnologias capazes de reduzir tal quantidade de resíduos, enquanto simultaneamente é possível obter um produto rico em metano (ADNAN *et al.*, 2019). Tal grupo de tecnologias para tratar resíduos é conhecido por *Waste-to-Energy* (WtE) e tem como objetivo alcançar a recuperação energética nas formas de calor, eletricidade ou combustíveis alternativos (GIZ, 2017). A recuperação energética de resíduos tem se mostrado como um forte atrativo para minimizar os efeitos da geração de

resíduos nas grandes cidades, entretanto não deve ser visto como única alternativa, mas sim, como parte de uma gestão integrada de resíduos sólidos.

2.2 Biogás de Aterros Sanitários

2.2.1 Formação do Biogás em Aterros Sanitários

A sobreposição das camadas de resíduos em aterros sanitários resulta na supressão do oxigênio (O₂), apresentando características semelhantes à de grandes reatores anaeróbios. A digestão anaeróbia (DA) é a degradação da matéria orgânica na ausência de oxigênio. A formação do biogás em aterros ocorre através da digestão anaeróbia da fração orgânica de RSU, por ação de microrganismos (tais como: bactérias e arqueias) que transformam os resíduos orgânicos em substâncias mais estáveis. A digestão anaeróbica é um processo metabólico complexo que ocorre a partir da ação de diferentes tipos de microrganismos (PROBIOGÁS, 2016).

De acordo com van Elk (2007), embora as atividades microbianas tenham grande influência sobre a produção de biogás em aterros sanitários, outros mecanismos, como a volatilização e as reações químicas, também exercem um papel importante na formação de metano. O pH (potencial hidrogeniônico), por exemplo, está intrinsecamente relacionado com a alcalinidade e o acúmulo de ácidos orgânicos no meio, valendo-se como um indicador de estabilidade do processo de digestão anaeróbia (ORNELAS-FERREIRA, 2015).

A produção de biogás a partir da digestão anaeróbia de resíduos orgânicos em aterros sanitários depende de alguns fatores centrais, como: teor de umidade, temperatura, compactação das camadas do aterro, condições climáticas, pH, características dos resíduos (composição, tamanho e idade), tipo de operações do aterro, dentre outros (MACIEL, 2003). O grau de compactação precisa ser controlado conforme o estágio de geração de biogás, já que a produção de metano estará relacionada ao grau de decomposição dos resíduos (DAMASCENO, 2018). A compactação quando realizada ao decorrer da fase de metanogênese contribuirá com o aumento de produção de metano (KO *et al.*, 2015 *apud* DAMASCENO, 2018). Já a temperatura é importante para possibilitar o desenvolvimento e sobrevivência dos microrganismos decompositores. Outro fator essencial é a presença de água, já que pouca umidade pode comprometer a digestão de matéria orgânica e conseqüentemente, a produção de biogás. Cada tonelada de resíduo depositada em aterros sanitários gera, em média, 200 m³ de biogás (ALBARRACIN, 2016).

A fração orgânica dos resíduos sólidos é heterogênea, enquanto que a produção de gás em aterros a partir da digestão anaeróbia é variável ao longo dos anos. A heterogeneidade dos macronutrientes e a biodegradabilidade da matéria orgânica favorecem a atividade microbiana.

Reichert (2005) cita alguns parâmetros que desempenham influência no desempenho da digestão anaeróbia:

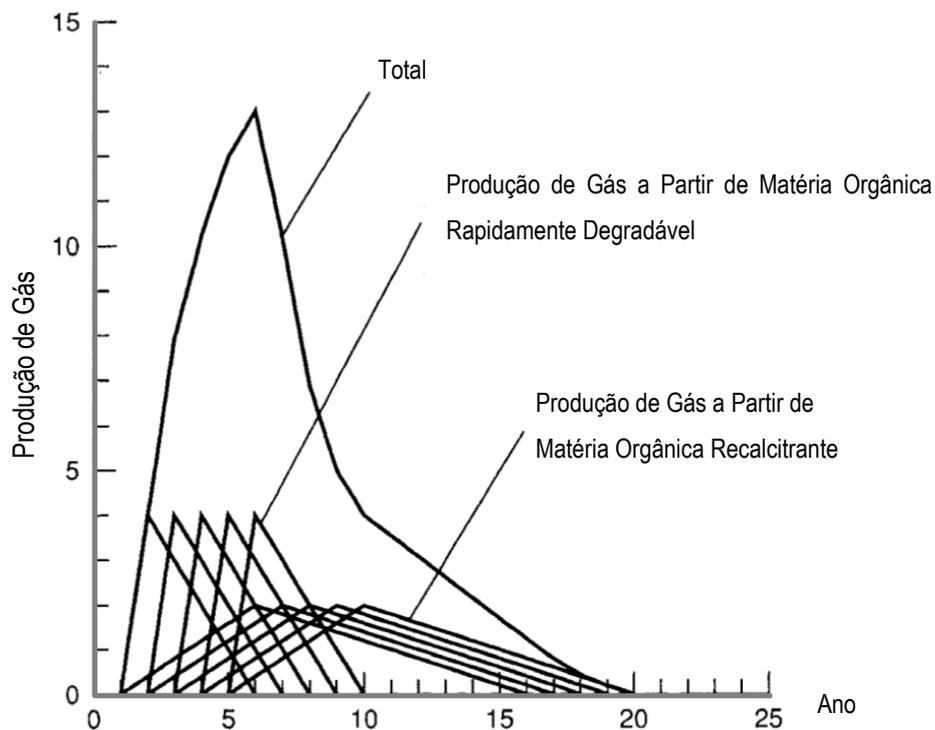
- **Composição gravimétrica dos resíduos** - A composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos (RSU), em especial os domiciliares, é heterogênea; podendo variar suas características em termos de sazonalidade, nível socioeconômico da população e eventuais variações no padrão de consumo;
- **Sólidos Voláteis (SV)** – Os sólidos voláteis (SV) são indicadores do teor de matéria orgânica seca contida em uma amostra de resíduo. A determinação dos SV é resultado da subtração dos sólidos totais (ST) pelos sólidos fixos (SF) e cinzas;
- **pH** - O valor do pH expressa a concentração de íons hidrogênio no meio. Microrganismos anaeróbios, especialmente as arqueias metanogênicas, apresentam maior sensibilidade a ambientes ácidos e podem sofrer inibição de suas atividades, sendo o pH ideal para o crescimento ótimo desses microorganismos compreendido na faixa entre 6,5 e 7,5;
- **Temperatura** - Há basicamente duas faixas de temperatura favoráveis à produção de biogás: mesofílica (entre 20°C – 40°C) e termofílica (entre 50°C – 60°C);
- **Relação Carbono Nitrogênio (C/N)** - representa a relação entre as quantidades de carbono e de nitrogênio presentes na matéria orgânica. O consumo de nitrogênio pelas bactérias metanogênicas interfere na produção de biogás.

Segundo Tchobanoglous e Kreith (2002), as taxas anuais de digestão de matérias orgânicas rapidamente e dificilmente degradáveis são baseadas em um modelo triangular de

produção de gás, cujo pico acontece geralmente entre 1 e 5 anos após o início de geração (ao término do primeiro ano de operação do aterro), podendo continuar por até 25 anos ou mais em alguns casos.

A variação na taxa de gás produzido ao longo dos anos pela DA da matéria orgânica rapidamente biodegradável (menos de 5 anos) e da matéria orgânica recalcitrante (5 – 50 anos) está ilustrada na Figura 4 seguindo o padrão triangular.

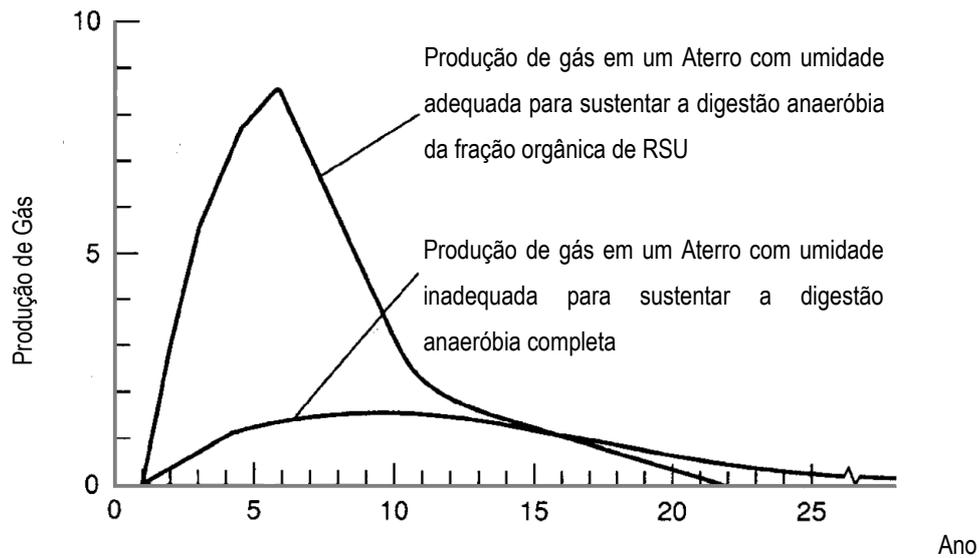
Figura 4 – Estimativa gráfica de produção de biogás de resíduos orgânicos de rápida e de difícil digestão depositados em aterros sanitários



Fonte: Adaptado de Tchobanoglous e Kreith (2002).

Quando o teor de umidade no aterro sanitário é limitado, a curva de produção de biogás é mais achatada e estendida por um período maior de tempo. O efeito de pouca umidade sobre a produção de biogás no aterro pode ser observado na Figura 5.

Figura 5 – Efeito da baixa umidade na produção de biogás em aterros sanitários



Fonte: Adaptado de Tchobanoglous e Kreith (2002).

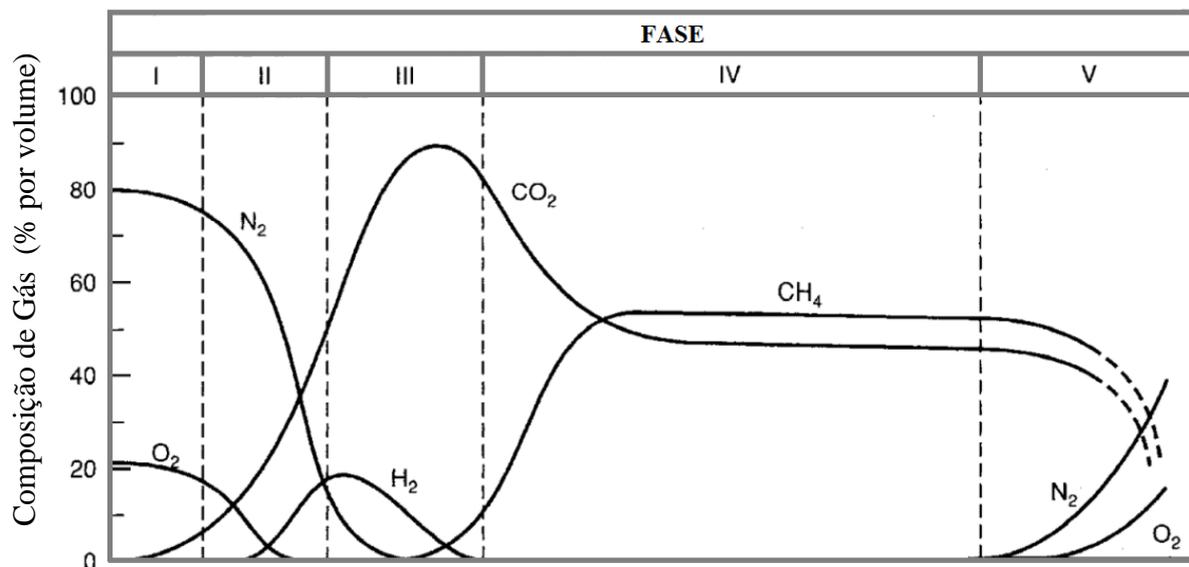
De acordo com Tchobanoglous e Kreith (2002, p. 678-680), a digestão anaeróbia dos resíduos sólidos em Aterros acontece em uma sequência de até cinco fases:

- **Fase I – Ajuste Inicial.** É a fase mais curta, em que a fração orgânica de RSU sofre digestão através de processo aeróbio devido à pequena presença de oxigênio aprisionado na fase inicial de deposição de resíduos no Aterro;
- **Fase II – Transição.** Início da conversão de compostos orgânicos complexos em ácidos orgânicos mais simples e transformação da matéria orgânica em metano, dióxido de carbono e outros gases;
- **Fase III – Ácida.** Produção de dióxido de carbono e aceleração da atividade microbiana, com produção intensa de ácidos orgânicos e, em menor quantidade, de gás hidrogênio. Por causa da produção de ácidos, o pH do lixiviado tende a permanecer em valores mais baixos (acidificado);
- **Fase IV – Metanogênica.** Conversão do ácido acético e do gás hidrogênio em metano via ação de microrganismos anaeróbios. Em função do consumo dos ácidos orgânicos, o pH do lixiviado tende a valores mais neutros;

- **Fase V – Maturação.** Conversão de todo o material orgânico biodegradável disponível em metano e dióxido de carbono. Com a redução do conteúdo de matéria orgânica, o metabolismo dos microrganismos fica mais lento e com isso, a taxa de produção de biogás diminui.

O comportamento e tempo de duração das fases não são os mesmos ao longo do tempo. A duração de cada fase durante a produção de biogás de aterro sanitário irá variar em função da presença de componentes orgânicos e nutrientes, teor de umidade dos resíduos e o grau de compactação inicial (TCHOBANOGLIOUS e KREITH, 2002). A figura 6 ilustra a evolução das fases ao longo da produção de gás nos Aterros.

Figura 6 – Sequência de fases de geração dos principais gases de aterro sanitário



Fonte: Adaptado de Tchobanoglous e Kreith, 2002.

2.2.2 Composição do Biogás de Aterro Sanitário

O biogás (ou gás de aterro) compreende um número de gases presentes em grandes quantidades (gases principais) e em quantidades muito pequenas (gases traço). Estes gases principais são produzidos a partir da digestão anaeróbia da fração orgânica biodegradável de RSU. Os Compostos Orgânicos Voláteis (COVs) embora presentes em menor percentual apresentam substâncias extremamente tóxicas e nocivas à saúde (TCHOBANOGLIOUS e KREITH, 2002).

Na Tabela 2 é possível observar os principais componentes do biogás oriundo em aterros sanitários. Segundo Tchobanoglous e Kreith (2002), os principais constituintes do Biogás são: Metano (45-60%) e Dióxido de Carbono (40-60%). Dentre os demais, pode-se destacar: Amônia (0,1-1,0%), Sulfeto de Hidrogênio (0-1,0%), Oxigênio (0,1-1,0%), Nitrogênio (2,0-5,0%), Monóxido de Carbono (0-0,2%) e Compostos Orgânicos Voláteis (0,01-0,6%).

Tabela 2 – Composição média de biogás de aterros sanitários

Componente	Fórmula Química	% em Volume
Metano	CH ₄	45 - 60
Dióxido de Carbono	CO ₂	40 - 60
Nitrogênio	N ₂	2,0 – 5,0
Oxigênio	O ₂	0,1 – 1,0
Amônia	NH ₃	0,1 – 1,0
Sulfetos, Dissulfetos e Mercaptanas	-	0 – 1,0
Hidrogênio	H ₂	0 – 0,2
Monóxido de Carbono	CO	0 – 0,2
Compostos Orgânicos Voláteis (COVs)	-	0,01 – 0,6

Fonte: Adaptado de Tchobanoglous e Kreith (2002).

A produção de metano depende das características dos RSU (como composição, tamanho das partículas, umidade, temperatura e pH) e das técnicas de operação de disposição final (NASCIMENTO *et al.*, 2019).

A existência dos siloxanos no biogás está ligada ao uso de aditivos e de produtos derivados de silício amplamente utilizados pelo homem (THRÄN *et al.*, 2014). Eles são oriundos principalmente de produtos silicatos, comumente encontrados em itens de higiene pessoal (como xampus e cremes) e em agentes de limpeza industriais. Já o sulfeto de hidrogênio, segundo Petersson e Wellinger (2009), é formado durante a redução microbológica dos compostos que contém enxofre (sulfatos, peptídeos e aminoácidos).

O gás metano, segundo Ornelas-Ferreira (2015), embora seja responsável por uma crescente parcela das emissões de GEE no mundo, detém um elevado potencial calorífico, tornando seu uso energético atrativo, seja para geração de energia elétrica, energia térmica, como biocombustível veicular e/ou para injeção na rede de gás natural, mitigando os efeitos de GEE.

2.2.3 Mitigação de Emissões de Gases de Efeito Estufa

A iniciativa pioneira de mitigação de gases de efeito estufa, responsáveis pelo aquecimento global, ocorreu em 1997 através do Protocolo de Quioto. Posteriormente, foi instituída pela Lei 12.187 a Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC, 2009), em que foi oficializado o compromisso voluntário do Brasil em reduzir as emissões de GEE até o ano de 2020 junto à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima.

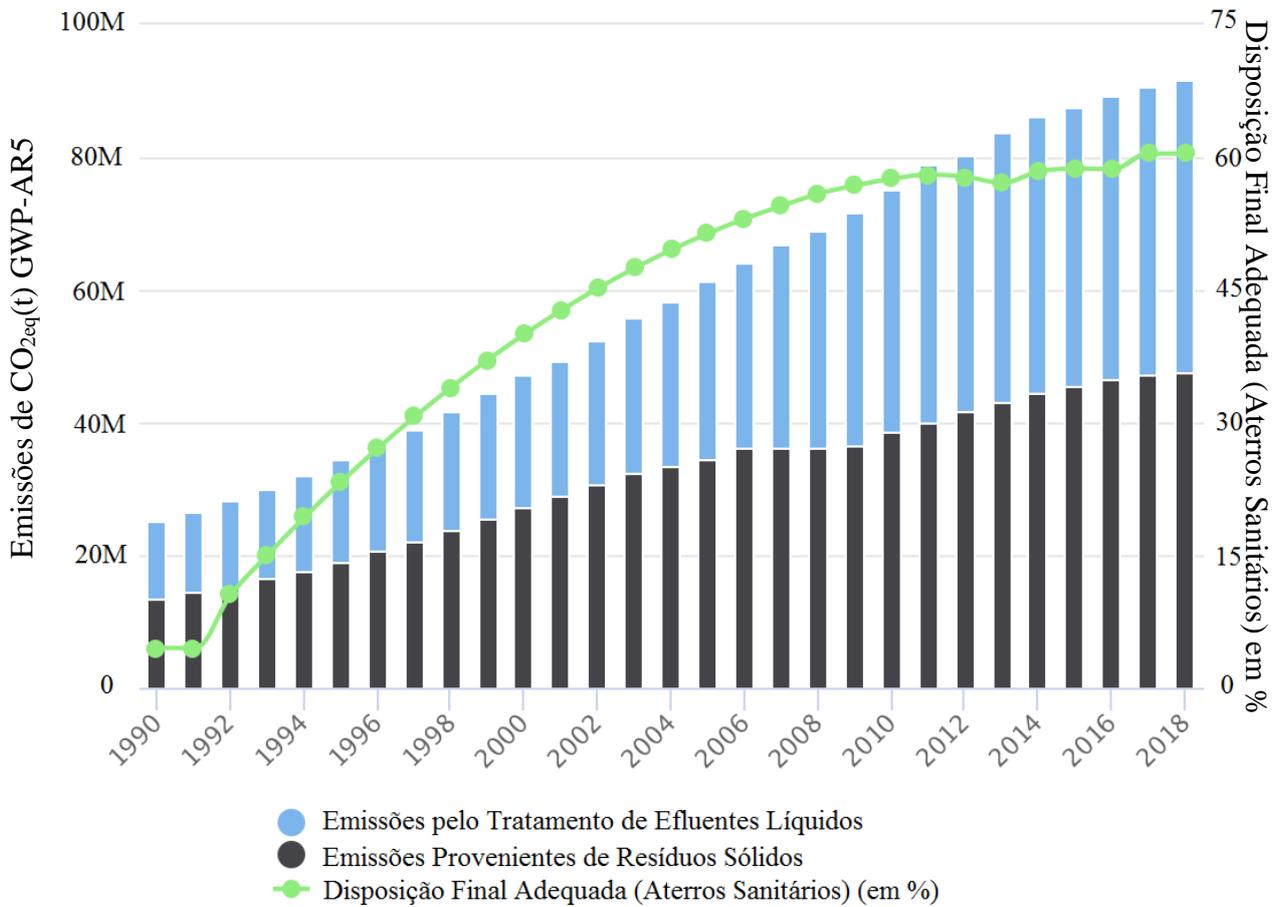
Anos depois, em 2015, durante a Conferência das Partes (COP 21), o Brasil assumiu compromissos de combate às mudanças climáticas junto a demais países através da assinatura do Acordo de Paris. As metas foram estabelecidas por meio de Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs), cujos caminhos visam conduzir à redução das emissões de GEE. As NDCs brasileiras expressam a meta de redução das emissões em 37% até 2025, em relação aos níveis de 2005, podendo chegar a 43% até 2030. Segundo informações do Ministério do Meio Ambiente (MMA), para que esse cenário seja alcançado houve um comprometimento em aumentar a participação de bioenergia sustentável na matriz energética para aproximadamente 18% até 2030, bem como alcançar uma participação estimada de 45% de energias renováveis na composição da matriz energética em 2030.

Nascimento *et al.* (2019) salienta que o cenário das mudanças climáticas torna necessário a inclusão das questões ambientais em planos governamentais, de maneira a buscar soluções ambientalmente adequadas capazes de reduzir a dependência das fontes de combustíveis fósseis. Dentro deste contexto, o metano presente no biogás além de possuir potencial para ser convertido em uma importante fonte de alternativa energética, é um gás de efeito estufa que deixa de ser lançado à atmosfera.

De acordo com o SEEG, o Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa do Observatório do Clima, o setor de resíduos sólidos foi responsável em 2018 por 47.553.664 de CO_{2eq} (t) de emissões. A disposição de resíduos sólidos urbanos é considerada a principal responsável pelas emissões do setor de resíduos (SEEG, 2019a).

Ainda segundo as estimativas do SEEG Brasil, a disposição final adequada em aterros sanitários em 2018 foi de aproximadamente 60,42%, como pode ser visto na Figura 7.

Figura 7 – Estimativas de emissões de CO_{2eq} (t) do setor de resíduos no Brasil (1990-2018)



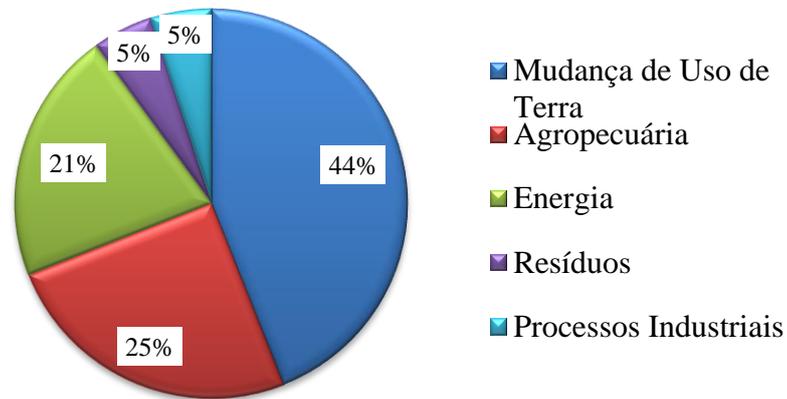
Fonte: Adaptado de SEEG (2019c).

Os gases de efeito estufa estão diretamente relacionados às mudanças climáticas e suas emissões podem ser mitigadas com a adoção de práticas tecnológicas mais sustentáveis. A maior fonte de GEE continua sendo os combustíveis fósseis, os quais são largamente utilizados em transportes, nas indústrias e na geração de energia. Dentro deste cenário, a busca por combustíveis alternativos permite a substituição gradual de parte da demanda dos derivados de petróleo. Por essa razão, o biometano é visto como biocombustível capaz de substituir parcialmente a demanda de gás natural, gás liquefeito de petróleo (GLP), óleo diesel e gasolina.

Uma possibilidade para mitigação das mudanças climáticas pode ser o uso de fontes energéticas alternativas, como o biogás e o biometano, que resultam na mitigação de emissões de GEE e conseqüentemente, na poluição atmosférica (PROBIOGÁS, 2016). O aproveitamento da biomassa dos RSU como fonte energética induz a melhoria nas condições operacionais dos aterros de resíduos e gera receita pela obtenção de créditos de carbono e venda de eletricidade

(NASCIMENTO *et al.*, 2019). Na Figura 8 é possível visualizar as emissões totais de gases de efeito estufa por setor no ano de 2018 no país.

Figura 8 – Estimativas de emissões de GEE em 2018 no Brasil por setor

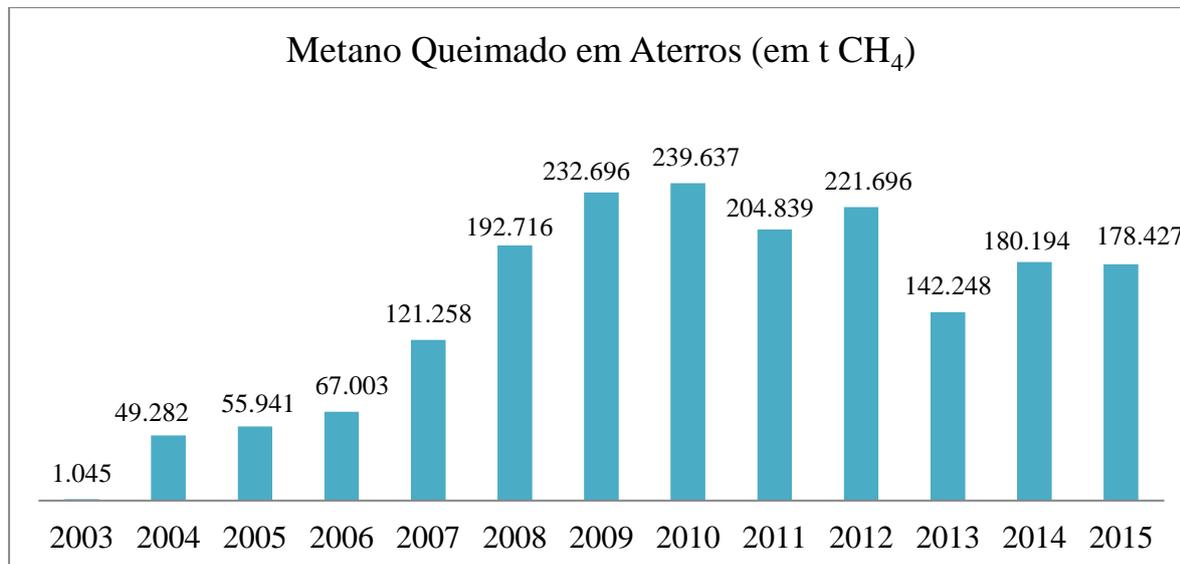


Fonte: Adaptado de SEEG (2019a).

O metano é o principal gás de efeito estufa dentre as emissões ocasionadas pela disposição final de resíduos sólidos. O IPCC (2014) indica que o metano possui um potencial de aquecimento equivalente 28 vezes superior ao dióxido de carbono em um horizonte de 100 anos ($GWP_{100} = 28$). Dessa forma, a captação e o aproveitamento energético do biogás permitem mitigar as emissões de metano na atmosfera.

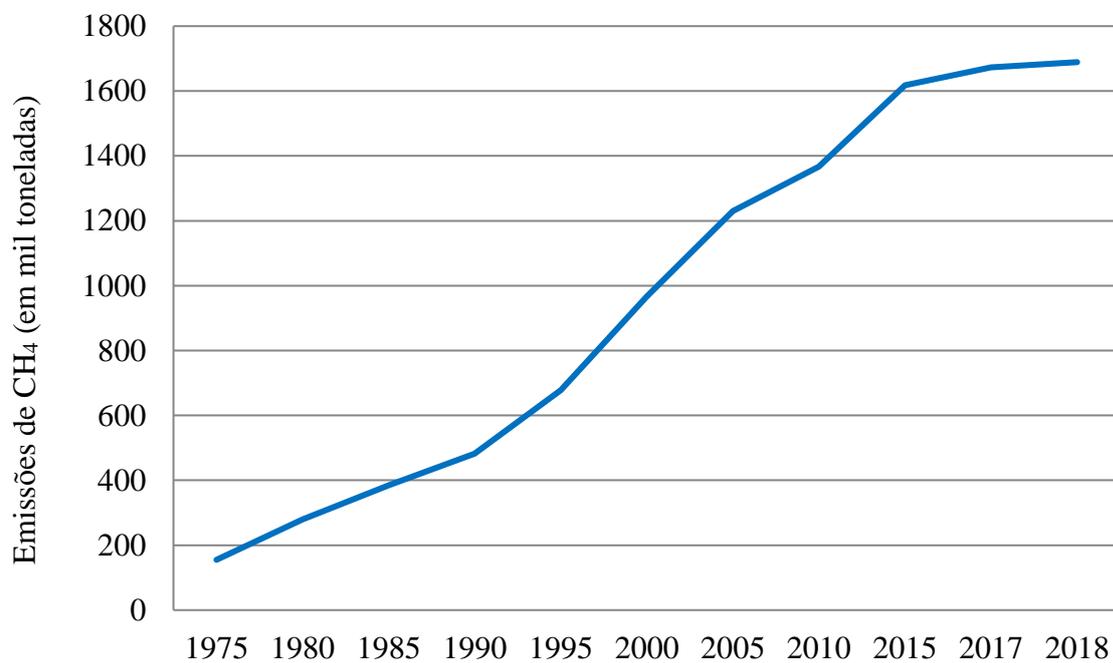
As atividades devido aos projetos de MDL contribuíram para reduzir parte das emissões nacionais de CH_4 pela disposição de RSU no solo. A Figura 9 apresenta o monitoramento do metano queimado em aterros brasileiros entre os anos de 2003 e 2015 através de projetos de MDL. As iniciativas de aproveitamento energético de biogás em aterros sanitários embora ainda incipientes apresentaram crescimento a partir de 2007, como pode ser observado na Figura 9, puxadas pela expansão do mercado de carbono. Outro fator colaborador foi o aumento de emissão de metano, representado na Figura 10 através de uma série histórica (1975 – 2018), em função do aumento da quantidade de resíduos sólidos dispostos em aterros sanitários no Brasil.

Figura 9 – Emissões de CH₄ evitadas por projetos MDL em aterros brasileiros



Fonte: Adaptado de Brasil (2017a).

Figura 10 – Emissões de CH₄ (em mil toneladas) provenientes da Disposição de Resíduos Sólidos



Fonte: Adaptado de SEEG (2019b).

Ano

2.3 Transformação do Biogás em Biometano

2.3.1 Regulamentação do Biometano

De acordo com a ANP, biometano atende à definição de biocombustível estabelecida na Lei nº 12.490/2011, teve a qualidade primeiramente regulamentada por meio da Resolução ANP nº 8/2015 e posteriormente, pela Resolução ANP nº 685/2017. Cabe ressaltar que enquanto a Resolução ANP nº 8/2015 trata da especificação do biometano oriundo de produtos e resíduos orgânicos agrossilvopastoris e comerciais, a ANP nº 685/2017 trata da especificação do biometano oriundo de aterros sanitários e estações de tratamento de esgoto. Assim, embora os parâmetros de qualidade e limites estabelecidos sejam os mesmos em ambas as resoluções, na ANP nº 685 foi acrescido o controle dos teores de siloxano, flúor e cloro. Em junho de 2018 foram regulamentados através da Resolução ANP nº 734 os requisitos para a autorização de produção de biocombustíveis, incluindo a de biometano, cuja ficha cadastral de produtor de biometano é apresentada no Anexo A da presente dissertação. A Figura 11 esboça a evolução do processo de regulação do biometano no Brasil.

Figura 11 – Evolução cronológica das medidas regulatórias nacionais para o biometano



Fonte: A autora (2020).

A Resolução ANP n° 8 de 2015 reconheceu pela primeira vez a equivalência do biometano ao Gás Natural, cuja definição ocorre no Art. 3° - II: “Biometano: biocombustível gasoso constituído essencialmente de metano, derivado da purificação do Biogás”.

Posteriormente, em 2017, a Resolução ANP n° 685 regularizou a comercialização e as especificações do biometano de origem de aterros e estações de esgoto seguindo as normas da *American Society for Testing and Materials* (ASTM), da *International Organization for Standardization* (ISO) e da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). O Sistema Internacional de Unidades (SI) é o empregado no Regulamento Técnico de acordo com a norma brasileira NBR/ISO 1000. Ao serem obedecidas todas as especificações estipuladas pela ANP, o biometano apresenta os mesmos parâmetros de qualidade e de combustão que o gás natural.

Dentre as disposições da normativa é mencionado que o produtor de biometano é obrigado a realizar análises, cujos resultados deverão constar em um certificado da qualidade, comprovando que o biometano atende às especificações dispostas na normativa. A aprovação do controle da qualidade deve ser submetida à ANP.

2.3.2 Captação de Biogás

A captação de biogás para ser bem sucedida precisa estar acompanhada de um sistema monitoramento de gás eficiente, a fim de garantir a qualidade final do biogás gerado e controle de velocidade de escoamento de biogás, assim como de possíveis perdas de carga nas paredes da tubulação. Os tipos de tecnologias e a escolha dos equipamentos exercem um papel fundamental no projeto e por isso, levam em consideração fatores importantes, tais como: volume de resíduos dispostos no aterro sanitário, condições ambientais locais, potencial de produção bioquímica de metano, eficiência dos dispositivos de captação de biogás, potencial de recuperação energética do biogás, dentre outros.

Os drenos são instalados à medida que os resíduos são depositados no aterro sanitário. Em cada dreno é acoplado um duto responsável pelo envio do biogás, feito com auxílio de sopradores, diretamente à uma estação central. É extremamente importante que as tubulações apresentem uma declividade apropriada de maneira a evitar a formação de condensados e por essa razão, a velocidade de escoamento do biogás é um fator controlado pelo monitoramento, devido à influência da perda de carga nas tubulações. Com isso, a captação de biogás pressupõe

a existência de um sistema de monitoramento eficiente, a fim de garantir as especificações de qualidade do produto final. A Figura 12 mostra um exemplo de dreno vertical.

Figura 12 – Dreno vertical equipado com cabeçote regulável



Fonte: A autora (2020).

As perdas difusas de biogás através da camada de cobertura de aterros sanitários são um problema prejudicial à eficiência do sistema de captação de biogás. A presença de rachaduras e/ou fissuras (fendas), as condições climáticas, o aumento do gradiente de pressão dos gases e o tipo de solo empregado na camada de cobertura são alguns dos fatores capazes de facilitar o escape do biogás para a atmosfera. O surgimento de fissuras pode ser ocasionado pelo recalque diferencial de resíduos devido à má compactação da massa heterogênea de resíduos (MACIEL, 2003) e às variações climáticas (precipitação pluviométrica e insolação), e com isso, acaba por criar condições favoráveis à migração do biogás em direção à superfície. Segundo Damasceno (2018), a emissão de CH_4 através da camada de cobertura de aterros sanitários brasileiros costuma variar, podendo atingir valores superiores a $1000\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{dia}$.

O biogás de aterros sanitários, quando não apresenta aproveitamento energético a partir de produção de biometano ou por geração de energia elétrica é, em geral, queimado em um equipamento conhecido por *flare*, podendo ser visto na Figura 13. O biogás também pode ser queimado no *flare* em caso de eventual necessidade de pausa nas operações por motivo de manutenção temporária.

Figura 13 – Queima de gás residual no *flare*



Fonte: A autora (2020).

2.3.3 Tratamento de Biogás

O potencial energético do biometano é diretamente proporcional à concentração de CH_4 , que está associado à capacidade de remoção de CO_2 durante o processo de purificação do biogás. Para transformação do biogás em biometano acontecer são necessárias primeiramente as técnicas de tratamento capazes de remover materiais particulados, excesso de umidade, impurezas e demais contaminantes presentes no biogás. Os tratamentos para remoção de condensados e particulados são pré-requisitos de qualquer tipo processo de recuperação energética e estão diretamente relacionados ao seu uso final.

A presença de impurezas, mesmo em baixas concentrações, pode afetar equipamentos causando problemas de corrosão e desgaste mecânico. O efeito dos siloxanos nos aparelhos é acumulativo, dependendo de sua precipitação durante a combustão como sílica. A sílica pode vir a se depositar em superfícies de equipamentos, em válvulas e conexões, paredes de cilindros e revestimentos, causando abrasão e entupimentos (THRÄN *et al.*, 2014).

As principais técnicas de tratamento do biogás envolvem a remoção de dióxido de carbono e de sulfeto de hidrogênio do biogás, assim como a secagem do excesso de umidade (PROBIOGÁS, 2016). Pela especificação brasileira estabelecida na ANP nº 685/2017 (Tabela 6 da dissertação) os limites e parâmetros de qualidade são diferentes para uso veicular, geração de

calor e injeção em rede de gás natural. Assim, segundo EPA (2020), o tipo e a extensão do tratamento dependem das características específicas do biogás e do tipo de rota tecnológica empregada.

O tratamento de biogás pode ser classificado em: primário (condicionamento) e secundário (purificação). O tratamento primário inclui etapas de filtração e remoção de água, e tem como objetivos eliminar partículas sólidas em suspensão e umidade. O resfriamento e compressão de gás são as técnicas geralmente utilizadas para a remoção de vapor d'água e umidade. Já o tratamento secundário envolve o incremento de poder calorífico do biogás a partir de uma limpeza mais profunda por processos físicos e químicos, os quais são dimensionados em função dos contaminantes presentes no biogás e da sua finalidade de aplicação. Após o cumprimento de cada processo, o produto resultante é denominado de biometano, sendo composto por CH₄ (95-99%) e CO₂ (1-5%), isento de H₂S (ADNAN *et al.*, 2019).

A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA, 2020) afirma que siloxanos e derivados de enxofre são alguns dos componentes capazes de serem removidos por tratamento secundário. As tecnologias mais comuns usadas para tratamento secundário são adsorção e absorção. A adsorção, além de remover os siloxanos presentes no biogás, é um processo pelo qual os contaminantes aderem à superfície de um adsorvente, como carvão ativado ou sílica gel. Existem outros tipos de métodos utilizados para remoção de siloxanos, tais como: lavagem e refrigeração abaixo de zero. A absorção (ou lavagem) remove compostos (como enxofre) do biogás com o auxílio de solvente ou reagente sólido.

Borschiver e Silva (2014) afirmam que o tratamento do biogás consiste na remoção de impurezas, tais como sulfeto de hidrogênio, siloxanos, água, oxigênio, nitrogênio e partículas em suspensão presentes em diferentes concentrações, dependendo da composição do substrato a partir do qual o biogás foi produzido. A dessulfurização é o pré requisito necessário para o posterior enriquecimento de metano (PROBIOGÁS, 2016).

Alguns siloxanos e COVs são solúveis em água e por isso, podem ser removidos primeiramente através de lavagem com líquidos, enquanto outros podem ser removidos em uma etapa de limpeza adicional a partir de filtro de carvão ativado (IRENA, 2018). Dessa forma, a aplicação de carvão ativado tem por finalidade conferir polimento ao biogás.

A Tabela 3 relaciona os tipos de tecnologia mais usadas para remover determinadas impurezas encontradas no Biogás.

Tabela 3 – Tipos de impurezas e suas respectivas tecnologias de limpeza

Impureza	Tecnologia de Limpeza
Sulfeto de Hidrogênio	Precipitação/ Absorção Química/ Adsorção em Carvão Ativado/ Tratamento Biológico/ Microaeração
Siloxanos	Resfriamento/ Absorção em Mistura Líquida de Hidrocarbonetos/ Adsorção em Carvão Ativado, Alumínio e Sílica Gel/ Coseparação com Sulfeto de Hidrogênio
Água	Resfriamento/ Compressão/ Absorção/ Adsorção
Oxigênio e Nitrogênio	Adsorção em Carvão/ Peneira Molecular ou Membranas
Amônia	Enquanto o gás é seco ou está em processo de ajuste de poder calorífico
Particulados	Filtro Mecânico

Fonte: Adaptado de Borschiver e Silva (2014).

2.3.3.1 Secagem de Biogás

A água pode ser removida por resfriamento, compressão, absorção ou adsorção. Sua remoção do biogás ocorre por condensação, seja por aumento de pressão ou por diminuição de temperatura (PETERSSON e WELLINGER, 2009). Para evitar o processo de corrosão, ocasionada pela formação de ácido sulfúrico (devido à combinação de umidade, sulfeto de hidrogênio e oxigênio), é necessário secar o biogás. Os autores do PROBIOGÁS (2016)

ressaltam que nos processos de secagem de biogás dependem da forma de tratamento, e em especial, da separação de dióxido de carbono. São eles: secagem por condensação, por adsorção e por absorção.

- a) **Secagem por Condensação** – baseada no princípio de que a refrigeração do biogás à uma temperatura inferior ao ponto de orvalho, que resulta na formação de condensado, que é posteriormente separado do biogás;
- b) **Secagem por Adsorção** – baseada no uso de adsorventes como sílica gel, carvão ativado, óxidos de alumínio e peneiras moleculares. É necessária uma secagem prévia do biogás para evitar impurezas;
- a) **Secagem por Absorção** – baseada na separação de um ou mais componentes da fase gasosa mediante adição de líquido absorvente (os mais usuais são glicol ou trietilenoglicol). Esse procedimento é comumente conhecido por “lavagem”.

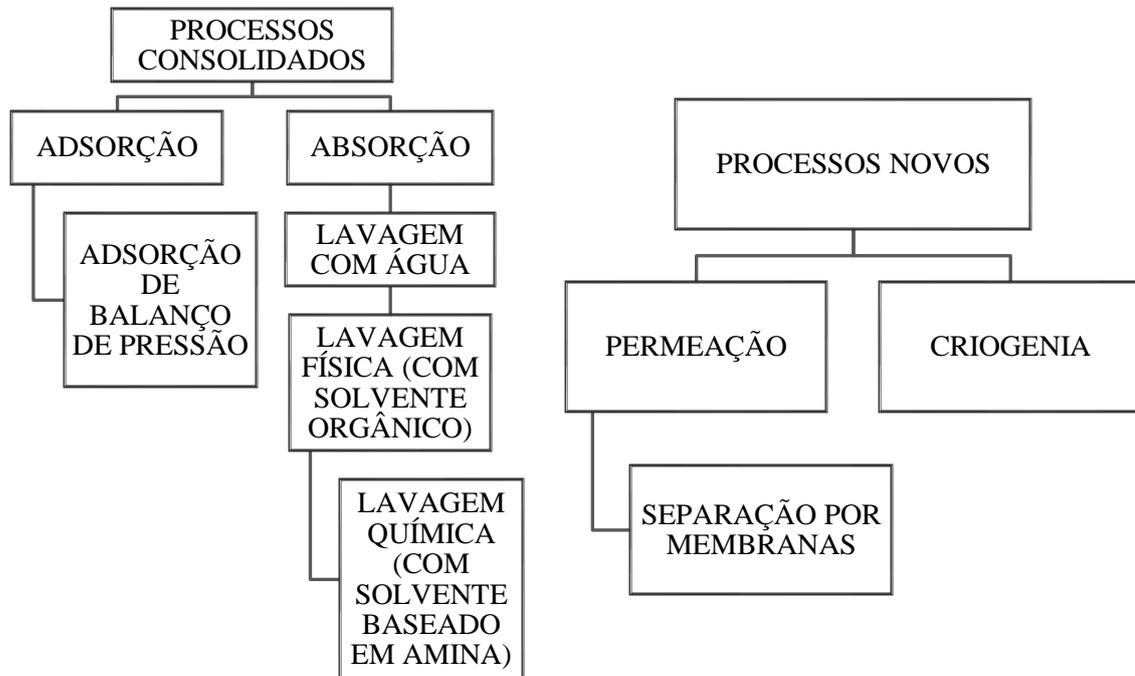
2.3.3.2 Purificação de Biogás

A purificação de biogás implica necessariamente na remoção de dióxido de carbono a fim de aumentar a densidade de energia do gás (THRÄN *et al.*, 2014), cuja consequência é o aumento da concentração de metano (PETERSSON e WELLINGER, 2009). Para aumentar a concentração de metano no biogás é fundamental a remoção do CO₂. O incremento de poder calorífico, ou purificação de biogás, é geralmente realizado a fim de cumprir as normas para o uso do biogás como combustível de veículo ou para a injeção na rede de gás natural, havendo a possibilidade de um tratamento prévio para remoção de impurezas.

É preciso salientar que quanto menor o teor de metano, maior é a importância em seguir o sequenciamento de tratamento de biogás de forma a atender os pré-requisitos à injeção de biometano como gás adicional na rede de gás natural (PROBIOGÁS, 2016).

A Figura 14 esboça um esquema com as principais tecnologias para incremento de poder calorífico de biogás. Os processos mais consolidados são os de adsorção e absorção, enquanto os mais novos são permeação (separação por membranas) e criogenia.

Figura 14 – Tecnologias de purificação de biogás

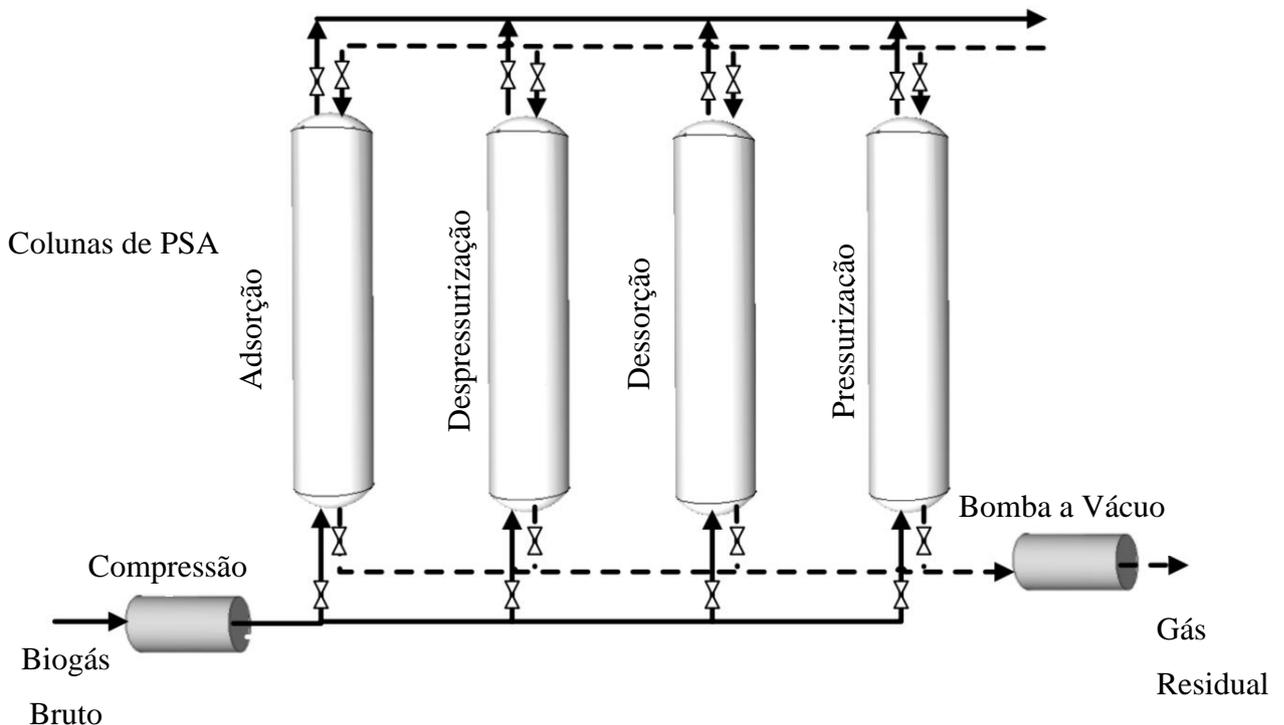


Fonte: Adaptado de Borschiver e Silva (2014).

Há quatro principais técnicas de purificação do biogás, são elas (PETERSSON e WELLINGER, 2009; BORSCHIVER e SILVA, 2014):

- a) **Adsorção por Balanço de Pressão (PSA, do inglês *Pressure Swing Adsorption*)** - A separação de gases utilizando adsorção se baseia na diferença de comportamento de adsorção dos diversos componentes do biogás em uma superfície sólida à alta pressão. Os materiais adsorventes mais usuais são os diferentes tipos de carvão ativado e peneiras moleculares (zeólitas). Esses materiais adsorvem o dióxido de carbono do biogás de alimentação e, conseqüentemente, o enriquecem em metano. O processo requer uma etapa preliminar de tratamento, incluindo secagem e dessulfurização, antes da injeção do gás de alimentação na coluna de adsorção. Os adsorventes de peneiras moleculares com tamanho médio de poro de 3,7 Å são usados para reter moléculas de CO₂ (tamanho molecular de 3,4 Å) dentro dos poros, excluindo as moléculas de CH₄ (tamanho molecular de 3,8 Å) (MUÑOZ *et al.*, 2015). Este processo tem potencial de tornar a concentração de biometano superior a 96%. A Figura 15 traz um esboço do processo PSA;

Figura 15 – Processo de PSA



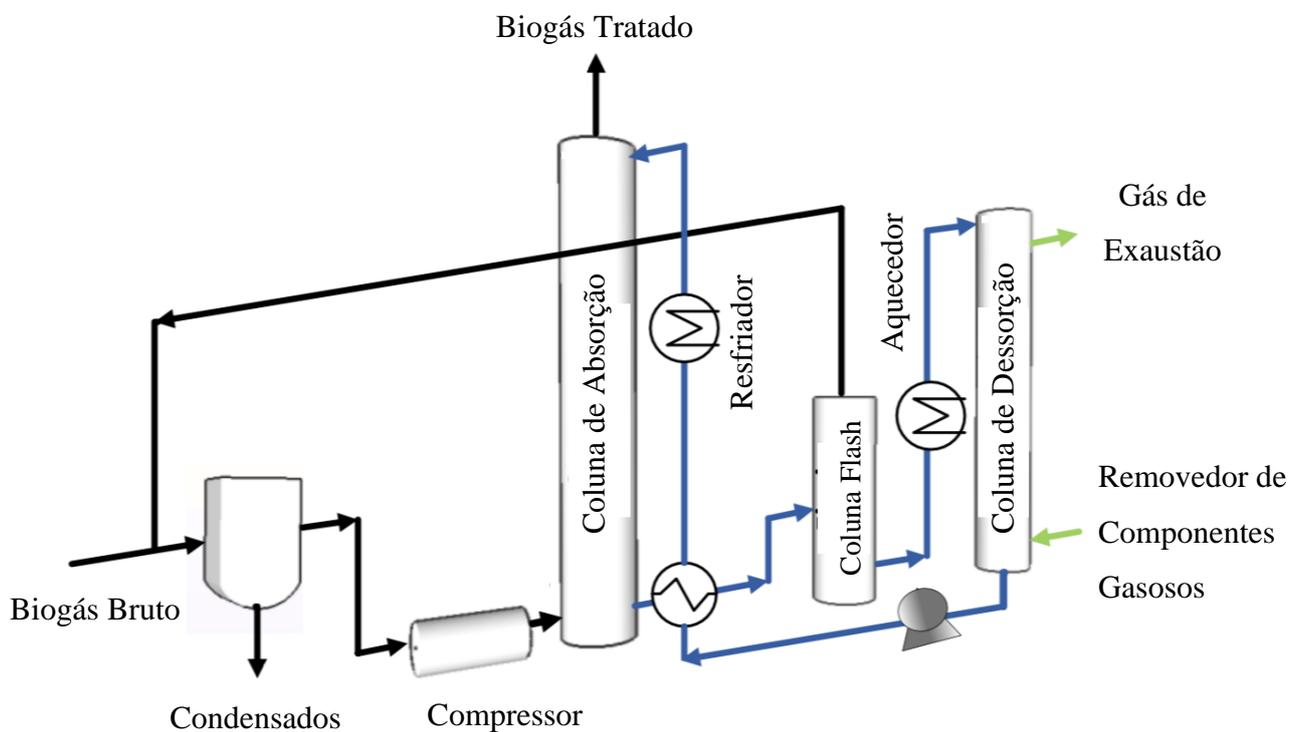
Fonte: Adaptado de Bauer *et al.* (2013) *apud* Muñoz *et al.* (2015).

- b) **Absorção** - O princípio deste processo é a baixa solubilidade do metano quando comparado com o dióxido de carbono. Neste sistema, o biogás encontra com um fluxo de líquido em uma coluna que é preenchida com um meio suporte de material plástico, de forma que o líquido retenha alta concentração de dióxido de carbono, sendo a concentração de metano aumentada. Existem três tipos de tecnologias de absorção que diferem pelo tipo de absorvente utilizado: Lavagem com Água, Lavagem Física com Solvente Orgânico e Lavagem Química.

- I. Lavagem com Água (do inglês, *Water Scrubbing*) - O dióxido de carbono é mais solúvel em água que o metano, em especial a baixas temperaturas e altas pressões, e por essa razão, o metano acaba não sendo removido. Neste processo não é requerida uma etapa preliminar de tratamento do biogás. Outros componentes como H_2S e NH_3 podem ser absorvidas concomitantemente, sendo que o H_2S necessariamente deve ser removido do biogás de saída. A quantidade de água necessária está relacionada à pressão da água e à temperatura (MUÑOZ *et al.*, 2015). A Figura 16 traz um esboço do processo de lavagem com água, enquanto a Figura 17 mostra a solubilidade do CO_2 em comparação com o CH_4 ;

- II. Lavagem Física com Solvente Orgânico (do inglês, *Organic Physical Scrubbing*) - Essa tecnologia, com fundamentação similar à de lavagem com água, utiliza absorventes à base de polietileno glicol, os quais apresentam maior afinidade por CO₂ e H₂S do que pela água (MUÑOZ *et al.*, 2015). Também podem ser removidos H₂S, NH₃ e H₂O. O Selexol é um solvente físico muito adequado para a separação de CO₂ e H₂S do biogás. Alguns outros solventes também são disponíveis comercialmente, como: Genosorb, Sepasolv, Rektisol e Purisol. A Figura 18 traz um esboço do processo de Lavagem com Solvente Orgânico;

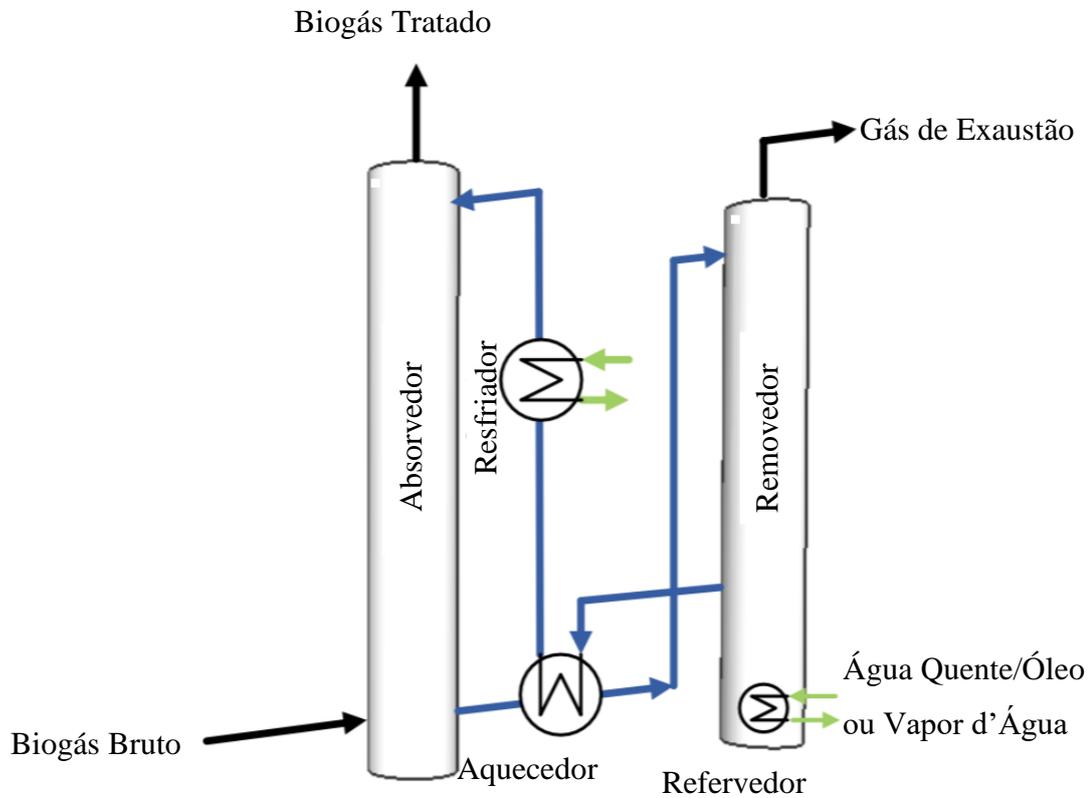
Figura 18 – Processo de Lavagem com Solvente Orgânico



Fonte: Adaptado de Bauer *et al.* (2013) *apud* Muñoz *et al.* (2015).

- III. Lavagem Química (do inglês, *Chemical Scrubbing*) - Esse método usa solventes baseados em aminas, como monoetanolamina (MEA), dietanolamina (DEA) e metildietanolamina (MDEA). Devido sua alta seletividade, a perda de metano é inferior a 0,1% e a concentração de metano no gás de saída é de, aproximadamente, 99%. A Figura 19 traz um esboço do processo de Lavagem Química;

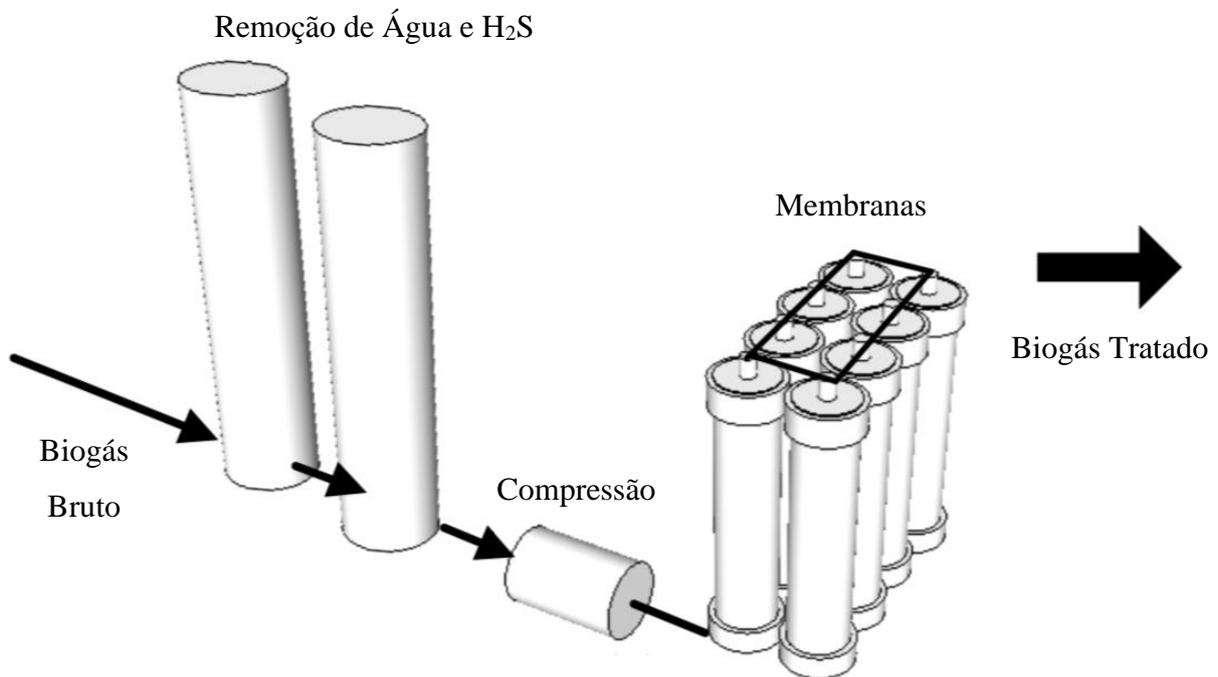
Figura 19 – Processo de Lavagem Química



Fonte: Adaptado de Bauer *et al.* (2013) *apud* Muñoz *et al.* (2015).

- c) **Permeação** – Esse processo se baseia na diferença de permeabilidade dos componentes do biogás através das membranas. O biogás após ser pressurizado é conduzido através de uma membrana por onde permeia o dióxido de carbono e o metano fica retido (EPE, 2018). Assim, compostos menos permeáveis ficam retidos na membrana, enquanto substâncias mais permeáveis passam através dela. Existem duas técnicas de separação por membrana: a separação à alta pressão, a qual separa o CO₂ e H₂S e produz biometano com 96% de pureza; adsorção gás-líquido, o qual é um novo processo desenvolvido usando uma membrana hidrofóbica. Segundo Probiogás (2016), a desvantagem do uso do processo de membrana é que até o momento existem poucas instalações para o tratamento de gás natural e biogás. A Figura 20 traz um esboço do processo de permeação;

Figura 20 – Processo por Permeação (Separação por Membrana)



Fonte: Adaptado de Bauer *et al.* (2013) *apud* Muñoz *et al.* (2015).

- d) **Criogenia** - Esse processo faz a separação de CO_2 e CH_4 e é operado a baixas temperaturas e altas pressões, sendo baseado na diferença entre o ponto de congelamento do metano (-161°C) e do dióxido de carbono ($-78,5^\circ\text{C}$). O biogás é resfriado abaixo da temperatura a qual o dióxido de carbono condensa. A separação criogênica é uma tecnologia ainda em desenvolvimento, que consiste na redução gradativa de temperatura até ser alcançado o ponto de condensação dos componentes, de maneira que os compostos com temperatura de condensação mais alta que o metano podem ser separados (EPE, 2018). O processo de criogenia pode ser realizado a pressão constante (10 bar) usando um sequenciamento de redução de temperatura para -25°C (onde: água, H_2S , siloxanos e halogênios são removidos na fase líquida), posteriormente a -55°C (onde a maioria do CO_2 é liquefeito para facilitar sua retirada) e finalmente a -85°C como etapa de polimento (onde o CO_2 restante se solidifica) (RYCKEBOSCH *et al.*, 2011 *apud* MUÑOZ *et al.*, 2015). A perda de metano é de 0,1% - 1%, enquanto a pureza do gás de saída é de 99%. O estudo Probiogás (2016) afirma que esse processo de separação é tecnicamente muito sofisticado e tem um grande consumo energético.

A Tabela 4 sintetiza as principais vantagens e desvantagens dos processos tecnológicos de purificação de biogás.

Tabela 4 – Vantagens e desvantagens dos processos de purificação de biogás

LAVAGEM FÍSICA
Principais Vantagens
<ul style="list-style-type: none"> - Processo simples; - Alta pureza de metano; - Menor perda de metano; - Baixos custos de operação e manutenção.
Principais Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> - Necessidade de enorme quantidade de água; - Necessidade de muita energia; - Chances de contaminação biológica; - Necessidade de calor externo.
LAVAGEM QUÍMICA
Principais Vantagens
<ul style="list-style-type: none"> - Mais CO₂ dissolvido por unidade de volume; - Alta pureza de metano; - Baixas perdas de metano; - Processo mais rápido que a lavagem física.
Principais Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> - Muita energia necessária para produzir vapor; - Necessidade de pré-tratamento; - Dificuldade de manuseio de solvente; - Precipitação de sal, espuma e intoxicação por amina.
ADSORÇÃO POR BALANÇO DE PRESSÃO (PSA)
Principais Vantagens
<ul style="list-style-type: none"> - Alta qualidade de gás; - Baixas perdas de metano; - Processo seco; - Baixa demanda por energia; - Sem uso de produtos químicos.
Principais Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> - Processo complexo; - Necessidade de pré-tratamento; - Necessidade alguns fluxos extras para aumentar a qualidade do biogás.
PERMEAÇÃO (SEPARAÇÃO POR MEMBRANA)
Principais Vantagens
<ul style="list-style-type: none"> - Amigável ambientalmente; - Baixo consumo de energia; - Baixo custo; - Processo simples.
Principais Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> - Baixa seletividade de membrana; - Necessidade de pré-tratamento; - Baixa pureza de metano.
CRIOGENIA
Principais Vantagens

-
- Alta qualidade de gás;
 - Baixas perdas de metano;
 - Amigável ambientalmente;
 - Produção de biometano líquido com pouca energia extra.
-

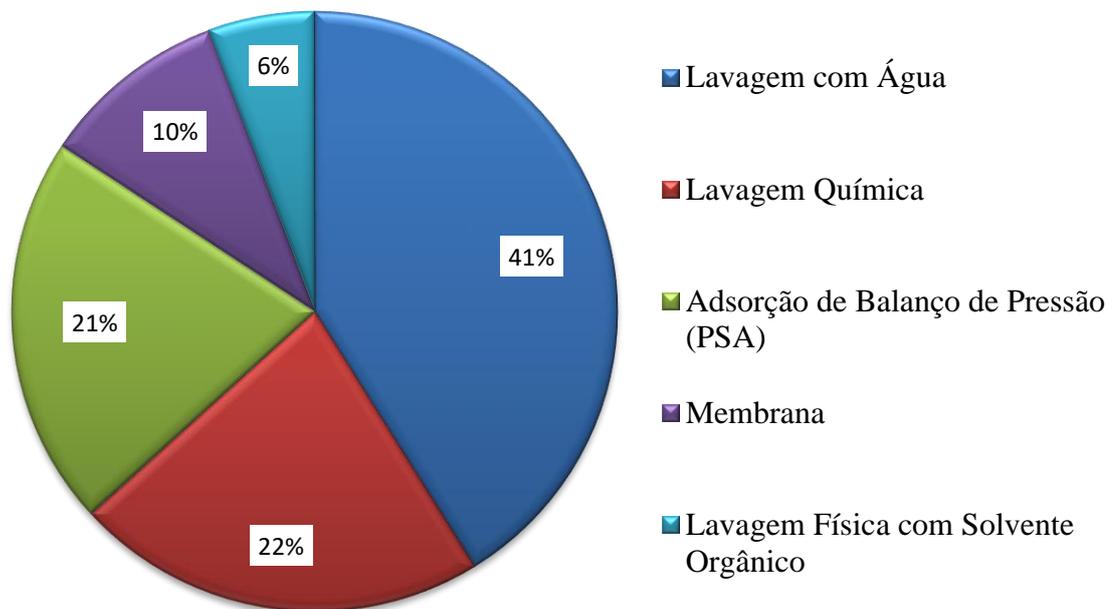
Principais Desvantagens

-
- Altos custos de investimento e de operação;
 - Necessidade de pré-tratamento;
 - Grande necessidade de energia para resfriamento;
 - Tecnologia ainda em desenvolvimento.
-

Fonte: Adaptado de Adnan *et al.* (2019).

A Figura 21 mostra as diferentes tecnologias de purificação de biogás usadas em plantas existentes em diferentes países. Pode-se observar que os processos mais usuais são lavagem com água (41%), lavagem química (22%) e adsorção por balanço de pressão (21%).

Figura 21 – Processos mais utilizados em plantas de purificação de biogás no mundo



Fonte: Adaptado de Thrän *et al.* (2014).

O grau de eficiência de uma planta é diretamente proporcional ao seu objetivo e é alcançado pela integração dos processos. Ou seja, quanto mais integrada a planta, maior será seu grau de eficiência e conseqüentemente, maior sua automação. Os custos do projeto são influenciados pelo teor de pureza do gás exigido pelo gasoduto receptor ou pelo usuário final, bem como pela dimensão do projeto (EPA, 2020).

A perda de metano ocasionada durante o processo de purificação do biogás vem sendo discutida em alguns países. Possíveis perdas de metano costumam estar relacionadas ao manuseio de válvulas, abertura de tanques e eventuais fugas durante os processos. O conteúdo de metano presente no gás residual descartado, na água usada em lavagem ou em qualquer outro tipo de corrente de saída da planta de purificação de biogás precisa ser minimizado (PETERSSON e WELLINGER, 2009). Dessa maneira, é de extrema importância reduzir as eventuais perdas de metano a fim de se obter uma planta de purificação de biogás eficiente e viável economicamente. A Tabela 5 traz estimativas de performance dos principais processos de purificação de biogás em relação à concentração de CH₄ alcançada e suas possíveis perdas.

Tabela 5 – Estimativas de concentração de CH₄ e possíveis perdas em processos de purificação de biogás

Processos	Concentração de CH₄	Perdas de CH₄
Lavagem com Água	> 96% ^(a)	1 - 2% ^(b)
Lavagem com Solvente Orgânico	96 - 98% ^(c)	< 2% ^(d)
Lavagem Química	99,5 - 99,9% ^(e)	< 0,1% ⁽ⁱ⁾
PSA	96 - 98% ^(f)	2 - 4% ^(j)
Permeação	96 - 98% ^(g)	< 1% ^(h)
Criogenia	99% ⁽ⁱ⁾	0,1 - 1% ⁽ⁱ⁾

Fonte: A autora, 2020.

Dados: (a) Muñoz *et al.*(2015);

(b) Beil (2009), Rasi (2009), Patterson *et al.* (2011), Bauer *et al.* (2013) *apud* Muñoz *et al.*(2015);

(c) Bauer *et al.* (2013), Thrän *et al.*(2014) *apud* Muñoz *et al.*(2015);

(d) Persson *et al.* (2007) *apud* Muñoz *et al.*(2015);

(e) Beil (2009), Ryckebosch *et al.* (2011), Bauer *et al.* (2013) *apud* Muñoz *et al.*(2015);

(f) Beil (2009), Bauer *et al.* (2013) *apud* Muñoz *et al.*(2015);

(g) Ryckebosch *et al.* (2011), Andriani *et al.* (2014) *apud* Muñoz *et al.* (2015);

(h) Eisenmann (2014) *apud* Muñoz *et al.*(2015);

(i) Borschiver e Silva (2014);

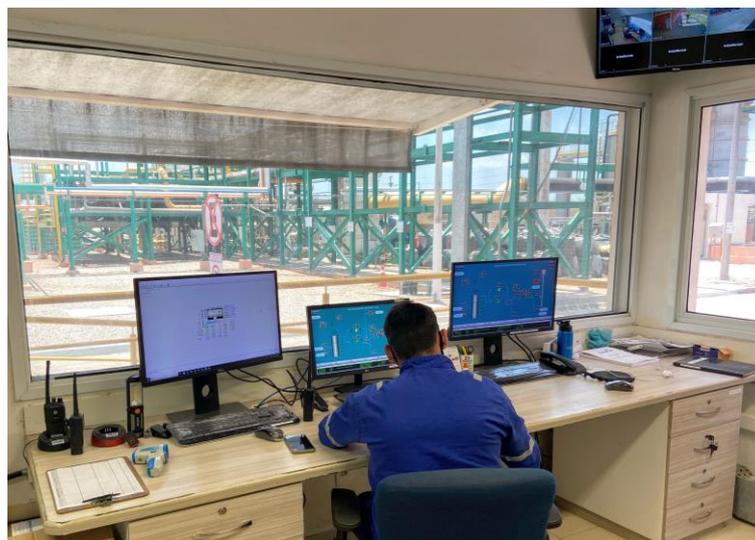
(j) Allegue (2012) *apud* Sun *et al.* (2015).

Borschiver e Silva (2014) apresentam como principais técnicas utilizadas para purificação do biogás a adsorção por balanço de pressão e os processos de absorção em água, solventes orgânicos e aminas. Entretanto, vale ressaltar que a melhor tecnologia escolhida deve se basear nos parâmetros específicos da planta, em especial, a vazão de biogás recebido.

Existem outros processos ainda em aprimoramento e que podem ser utilizados no futuro. Um deles é conhecido por Pulmão Ecológico (do inglês, *Ecological Lung*) e utiliza a enzima carboanidrase para dissolver o dióxido de carbono e a purificação de biogás pode atingir até 99% de metano, contudo, a viabilidade do processo é comprometida em função do alto custo de produção da enzima. Já a técnica chamada de Enriquecimento de Metano *In Situ* (do inglês, *In Situ Methane Enrichment*) é relativamente simples e não envolve a necessidade de muitos equipamentos, sendo indicada, entretanto, para plantas de menor porte em função da limitação do processo, podendo atingir um percentual de 95% de metano e perda de metano abaixo de 2% (PETERSSON e WELLINGER, 2009; BORSCHIVER E SILVA, 2014).

Os processos da planta de purificação são contínuos e são temporariamente pausados em casos de manutenção mecânica ou quebra de equipamentos. Para garantir o bom funcionamento da instalação e o atendimento das especificações de qualidade do biometano produzido é importante haver um sistema de monitoramento eficiente e que opere em tempo real. O controle e registro de dados permitem identificar eventuais falhas, prevenir danos e acidentes, além de permitir a adoção de boas práticas de operação. A Figura 22 ilustra um sistema de monitoramento em tempo real.

Figura 22 – Sistema de monitoramento de uma planta de purificação de biogás



Fonte: A autora (2020).

Um parâmetro muito importante a ser controlado na instalação de purificação de biogás é o controle do vácuo existente nos sopradores (do inglês, *blowers*) em um valor ideal para manter

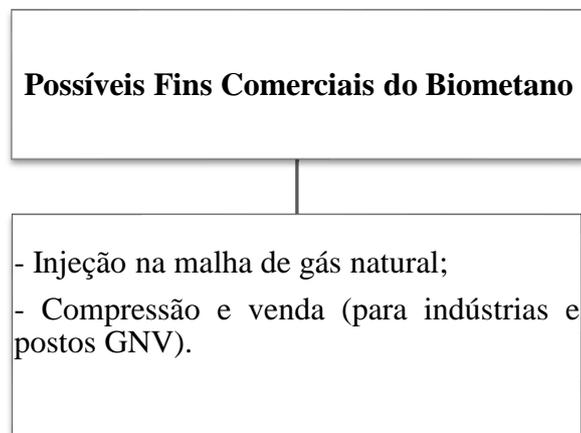
um bom escoamento do biogás na planta. O transmissor de pressão é o dispositivo responsável por detectar o nível de pressão nos sopradores.

2.4 Potencial do Biometano Oriundo de Aterros Sanitários

2.4.1 Especificações do Biometano

O biometano passou a atender à definição de biocombustível através da Lei nº 12.490/2011, e com isso, foi permitido substituir parcial ou totalmente combustíveis de origem fóssil. Posteriormente, em 29 de junho de 2017, a Resolução ANP nº 685 estabeleceu 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, às instalações residenciais, industriais e comerciais, a ser comercializado em todo o território nacional. A Figura 23 traz um resumo esquemático das formas de comercialização de biometano.

Figura 23 – Fins Comerciais do Biometano



Fonte: Adaptado de EPE (2018).

De acordo com Probiogás (2016), os parâmetros determinantes para o biometano ser aplicado como substituto do gás natural convencional são, especialmente, o poder calorífico superior (conteúdo térmico de um combustível quando é incluída a quantidade de calor liberada pela condensação do vapor d'água formado durante a combustão) e o índice de Wobbe (parâmetro para a intercambiabilidade de combustíveis gasosos, sendo muito utilizado para avaliar os combustíveis com grande potencial de substituição do gás natural). O estudo também destaca a separação de dióxido de carbono e sulfeto de hidrogênio do biogás, além do processo de secagem como etapas importantes para alcançar um teor de metano superior a 95%.

Segundo Thrän *et al.* (2014), para fim de injeção na rede de gás natural o risco à saúde é o critério mais importante na escolha dos limites de especificações. Em seguida, o segundo critério mais importante é a integridade dos gasodutos, em que são definidos os níveis de água, sulfeto de hidrogênio, amônia e oxigênio para evitar corrosão, além de existir também uma necessidade especial de níveis rigorosos de oxigênio e hidrogênio. Os limites de ponto de orvalho de água são necessários a fim de proteger contra a formação de condensados. A Tabela 6 mostra as especificações do biometano oriundo de aterros sanitários de acordo com a Resolução ANP n° 685.

Tabela 6 – Especificações do biometano oriundo de aterros sanitários.

Característica	Unidade	Limite			Método			
		Norte	Nordeste	Centroeste, Sul, Sudeste	NBR	ASTM	ISO	NF
Poder Calorífico Superior	kJ/m ³	34.000	35.000 a 43.000		15213	3588	6976	-
		a 38.400						
	kWh/m ³	9,47 a 10,67	9,72 a 11,94					
Índice de Wobbe	kJ/m ³	40.500	46.500 a 53.500		15213	-	6976	-
		a 45.000						
Metano, mín.	% mol.	90,0	90,0		14903	1945	6974	-
Etano	% mol.	anotar	anotar		14903	1945	6974	-
Propano	% mol.	anotar	anotar		14903	1945	6974	-
Butanos e mais Pesados	% mol.	anotar	anotar		14903	1945	6974	-
Oxigênio, máx.	% mol.	0,8	0,8		14903	1945	6974	-
CO ₂ , máx.	% mol.	3,0	3,0		14903	1945	6974	-
CO ₂ + O ₂ + N ₂ , máx.	% mol.	10	10		14903	1945	6974	-

Enxofre Total, máx.	mg/m ³	70	70		15631 5504	6326-3 6326-5 19739	-
Gás Sulfídrico (H ₂ S), máx.	mg/m ³	10	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)	5,0	5,0	-	-	1911	-
Fluorados, máx.	mg (F/m ³)	5,0	5,0	-	-	15713 X43-	304

Fonte: Adaptado de ANP (2017).

Segundo ANP (2017), as características de ponto de orvalho de água e ponto de orvalho de hidrocarbonetos apresentam limites de valores diferentes em razão das condições climáticas de cada região. A diferenciação de H₂S para a região Nordeste ocorre por circunstância de singularidade local, assim como, pelo mesmo motivo, o de teor de N₂. Por esse mesmo motivo, as propriedades de desempenho (índice de Wobbe e poder calorífico superior e teor de metano) também apresentam limites de valores diferenciados por região por causa das características dos reservatórios de gás natural. Como existe a possibilidade do biometano ser intercambiável com o gás natural as especificações acabam por apresentar tais similaridades. A ANP ressalta que o gás natural da região Norte não pode ser intercambiável com o especificado para as demais regiões. O gás nitrogênio encontra-se presente no biometano através da mistura (CO₂+O₂+N₂), cujo limite máximo em sua composição é de 10% mol, segundo ANP (2017).

O escoamento da produção, de acordo com a resolução ANP 734/2018, pode ser por duto dedicado, injeção na rede de distribuição de gás natural e caminhão-feixe. Pela resolução ANP N° 8/2015 o enriquecimento de biometano, quando houver, pode ser através de adição de propano, GLP ou gás natural.

2.4.2 Adequação do Biometano à Qualidade de Gás Natural

Segundo Probiogás (2016) são necessárias algumas adequações para que o biometano atinja a qualidade de gás natural. São elas:

- a) **Odorização** – O biometano é inodoro e por essa razão, para ser distribuído ao consumidor final é importante acrescentar substâncias capazes de conferi-lo odor. Essa medida é feita a fim de evitar acidentes e riscos aos usuários. Nessa etapa, o odorizante é injetado no volume de gás e costuma seguir uma dosagem conforme a quantidade. De acordo com a Resolução ANP nº 685, o biometano oriundo de aterros sanitários para ser injetado na rede de distribuição de gás precisa ser odorado pelo produtor conforme exigências da legislação estadual. Por questões de segurança a maior parte das substâncias responsáveis pela odorização contém enxofre na composição (THRÄN *et al.*, 2014). Geralmente, a odorização é feita com o uso de mercaptanas (compostos orgânicos de enxofre);
- b) **Incremento de Poder Calorífico** – São levantados os principais parâmetros relacionados às características de gás, como: grandezas do poder calorífico superior, poder calorífico inferior, densidade, índice de Wobbe, ponto de orvalho de água, ponto de orvalho de hidrocarbonetos, CH₄, H₂S, enxofre total, dentre outros;
- c) **Ajuste de Pressão** – A compressão é necessária para evitar perdas de pressão por atrito no transporte ou para atingir uma pressão relativamente alta para rede de tubulação subterrânea.

Cabe ressaltar que determinados componentes do biometano precisam ser limitados a fim de evitar corrosão de motores e fragilidade de materiais, tais como: H₂S, O₂, H₂ e siloxanos.

Pelas normas da ANP, o produtor de biometano deve analisar o teor de siloxanos e de halogenados por meio de análises laboratoriais, além de solicitar à ANP aprovação do controle da qualidade do produto para uso veicular, uso residencial e comercial, bem como sua mistura com o gás natural.

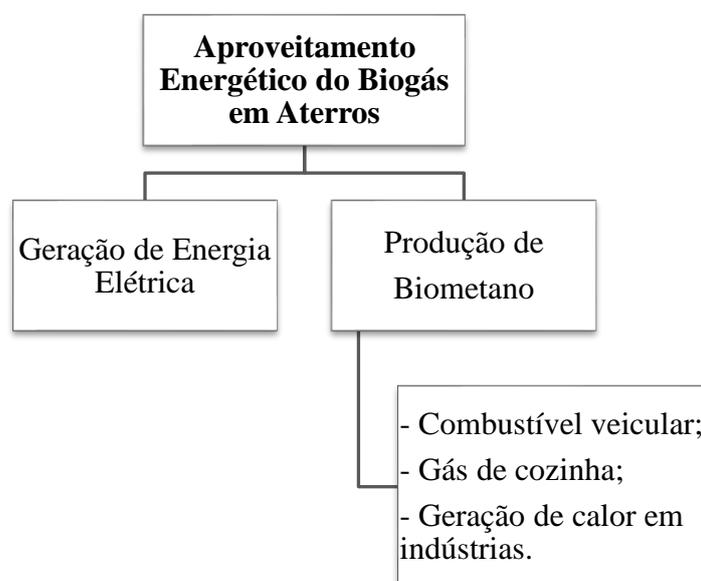
2.5 Aplicações do Biometano Oriundo de Aterros Sanitários

2.5.1 Usos Finais do Biometano

O biometano, em substituição ao gás natural, para fins comerciais tem como possibilidades os mercados de gás canalizado, residencial, industrial, veicular (EPE, 2018) e de geração de energia elétrica a partir de motores CHP. Outra maneira possível é a aplicação do biometano no abastecimento da própria frota de veículos do aterro. De acordo com EPA (2020), o uso mais simples e muitas vezes mais econômico de biometano é como um combustível para caldeiras, processos industriais e/ou motores de combustão interna. Nestes projetos, o biometano é canalizado diretamente para um cliente próximo para uso em equipamentos de combustão como combustível substituto ou suplementar. Para isso, são necessários os tratamentos de secagem e dessulfurização, embora algumas modificações no equipamento de combustão possam ser necessárias.

A Figura 24 traz um resumo esquemático das possibilidades de aproveitamento energético de biogás e de usos finais de biometano no Brasil.

Figura 24 – Possibilidades de Aproveitamento Energético do Biogás em Aterros Sanitários e de usos finais de Biometano



Fonte: Adaptado de EPE (2018).

A inserção do biometano como substituto parcial da demanda aos combustíveis fósseis também contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa, especialmente no setor de transportes. Com a evolução tecnológica dos motores, encontram-se disponíveis no mercado ônibus e caminhões capazes de serem movidos a biometano.

A distribuição de biometano desde a planta de produção aos usuários finais pode ser feita usando uma malha de gás natural, transportada como gás comprimido ou como gás liquefeito, sendo distribuído através de caminhão até os postos de combustíveis. De forma geral, a produção do gás na versão liquefeita é mais cara quando comparada à produção do gás comprimido. Com isso, a produção de biometano sob a forma de gás liquefeito seria justificada apenas em casos de transporte para distâncias muito longas (superiores a 100 km) ou longas viagens sem reabastecimento de caminhões ou navios (IRENA, 2018).

Irena (2018) ressalta que a injeção em rede de gás é a aplicação mais comum e geralmente a mais econômica caso a rede esteja à uma proximidade em até 5 km da planta de produção, envolvendo custos de capital e de operação relacionados à operação e ao transporte. Por essa razão, o ideal é que o ponto de produção de biometano esteja situado próximo ao centro de consumo.

A expansão do Novo Mercado de Gás Brasileiro tendo como objetivo formar um mercado de gás aberto e mais competitivo é acompanhada de expectativas a respeito de novas oportunidades que possam surgir com a necessidade de atendimento à demanda nacional. O aproveitamento energético de biogás pode contribuir com o aumento de oferta de gás natural, assim como a redução de sua pegada de carbono (EPE, 2019a).

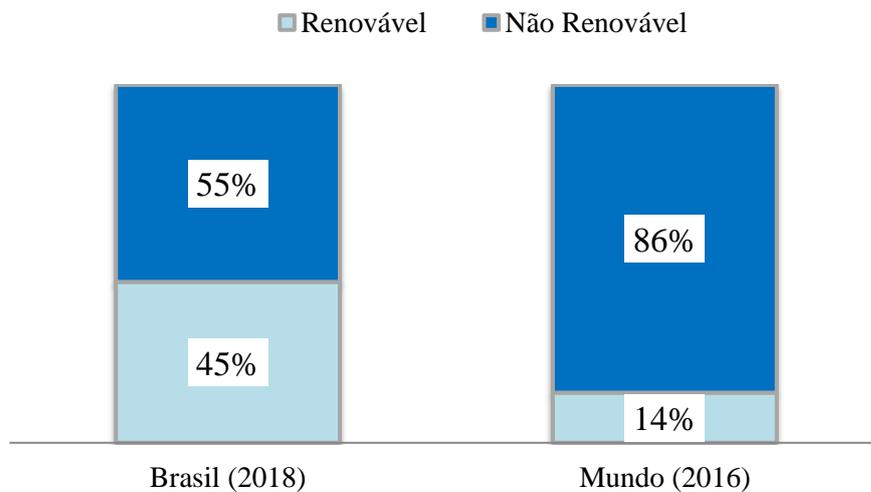
2.5.2 Competitividade do Biometano Frente aos Demais Vetores de Energia

A presença da frota de veículos movidos a gás natural, em especial os carros de aplicativos de transporte, é um grande atrativo para a aplicação de biometano como combustível, já que o gás natural sustentável apresenta preço mais competitivo quando comparado aos demais combustíveis tradicionais. Já os combustíveis de origem fóssil, embora representem a maior parte do consumo de energia no setor de transportes no Brasil, sofrem reajustes de preço constantemente por estarem sujeitos à flutuação do câmbio e do valor do barril de petróleo.

Outra vantagem do biometano frente aos demais combustíveis, além do preço atrativo, é a baixa emissão de GEE.

Embora o uso de derivados de petróleo prevaleça, o Brasil ocupa uma posição de destaque no mundo com cerca de 45% de participação de energias renováveis (EPE, 2020), em especial devido ao uso de energia hidrelétrica, que embora seja renovável resulta em amplos impactos ambientais, inclusive em emissões de GEE. O estudo (EPE, 2019a) prevê que o país deverá promover ainda mais este cenário, devido à implementação da Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) instituída pela Lei nº 13.576/2017, que abriu um novo horizonte ao reconhecer a participação dos biocombustíveis na matriz energética brasileira e estabeleceu metas de descarbonização no setor de transportes. A Figura 25 faz uma comparação entre a participação de fontes renováveis na matriz brasileira e a mundial.

Figura 25 – Comparação da participação de fontes renováveis entre o Brasil e o mundo



Fonte: Adaptado de EPE (2019b).

Conforme Brasil (2017b), o RenovaBio tem como objetivos expandir a produção de biocombustíveis no país, além de contribuir para a redução de emissões de GEE nos seus processos de produção, comercialização e aplicação. Tal política, de acordo com EPE (2020), contribuirá para aumentar a participação de biocombustíveis sustentáveis na matriz energética do país, criando mecanismos para aumentar as suas produções e usos (como etanol, biodiesel e biometano).

Probiogás (2016) ressalta que o maior obstáculo ao uso de biometano para fins de combustível é a densidade energética. Já a aplicação mais usual é sob a forma comprimida em tanques cilindros. A compressão a alta pressão é importante em função da baixa densidade energética do gás.

O consumo de biometano em veículos costuma variar de 15 – 20 km.m⁻³ em veículos leves e 1.6 – 3.3 km.m⁻³ em caminhões pesados (BRASIL, 2011; ARDOLINO *et al.*, 2018 *apud* ORNELAS-FERREIRA *et al.*, 2019).

Em países europeus o biogás após ser convertido em biometano e atingir a mesma qualidade de gás natural, pode ser transformado em eletricidade em usinas de cogeração; biometano veicular; ou injetado na rede de gás natural, a aplicação mais comum e mais promissora de acordo com o estudo do Observatório de Energias Renováveis (EurObserv'ER, 2017). No Reino Unido o biogás foi impulsionado até 2016 principalmente por sua conversão em eletricidade, já na Suécia o uso de biometano em veículos ainda lidera, enquanto na França a injeção de biometano na rede de gás natural tende a ser encorajada pelos avanços nas legislações do país (EUROBSERV'ER, 2017).

3. METODOLOGIA

A presente dissertação é uma fundamentação teórica baseada em referências clássicas da área de resíduos sólidos urbanos e aproveitamento energético de biogás, assim como visitas técnicas realizadas em plantas de biometano em escala industrial. Os dados majoritários foram obtidos através de uma abordagem qualitativa a partir de levantamento de artigos na base de Periódicos do Portal Capes, além de estudos de agências públicas e privadas de energia.

A primeira etapa do processo de estudo envolveu a identificação das instalações produtoras de biometano autorizadas pela ANP em aterros sanitários, assim como a de normas e resoluções de regulamentação de qualidade e produção de biometano no país. Em seguida, foi realizado o levantamento de dados secundários relacionados à qualidade de biometano de tais instalações, majoritariamente, com base na Lei nº 12.527 (BRASIL, 2011), conhecida como Lei de Acesso à Informação, que regulamenta a qualquer cidadão o direito constitucional de acesso a informações públicas. Dessa forma, a coleta de informações foi realizada a partir de acesso externo aos dados públicos presentes no Sistema Eletrônico de Informações (SEI) da ANP, cuja responsabilidade envolve a regulamentação e autorização dos produtores de biometano.

Os dados de caracterização dos aterros sanitários foram obtidos diretamente com as respectivas empresas operadoras dos mesmos. Por fim, foi realizada a coleta de imagens e dados adicionais através de trabalho de campo nas instalações GNR Dois Arcos (São Pedro da Aldeia, RJ) e GNR Fortaleza (Fortaleza, CE). Houve também uma visita técnica à planta da Gás Verde (Seropédica, RJ), entretanto, não foi possível a realização de imagens nem coleta de dados para fins de pesquisa.

Na seção de Resultados são apresentadas todas as informações levantadas a respeito das três instalações produtoras de biometano em aterros sanitários autorizadas pela ANP no Brasil: GNR Dois Arcos, Gás Verde e GNR Fortaleza. A Gás Verde está localizada no aterro de Seropédica (RJ), cuja capacidade de recebimento de RSU é de 10.000 t/dia. O GNR Dois Arcos está localizado no aterro de Dois Arcos (RJ), cuja capacidade de recebimento de RSU é de 762 t/dia. O GNR Fortaleza está localizado no aterro de Fortaleza, cuja capacidade de recebimento de RSU é de 5.000 t/dia. A Figura 26 traz a sequência de etapas envolvidas no processo de estudo.

Figura 26 – Fluxograma de etapas da pesquisa



Fonte: A autora (2020)

Os parâmetros de verificação e os resultados esperados para confirmação dos objetivos específicos estabelecidos na presente dissertação são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Parâmetros de verificação e os resultados esperados para confirmação dos objetivos específicos

Objetivos Específicos	Parâmetros de Verificação	Resultados Esperados
I - Estabelecer as alternativas tecnológicas de purificação de biogás aplicáveis ao Brasil para produção de biometano em aterros sanitários;	Capacidade de remoção de CO ₂ , teor de enxofre, teor de água, percentuais de concentração e de perdas de CH ₄ .	Escolha de processos de purificação de biogás eficientes e com menores perdas de metano, adequação tecnológica às capacidades das instalações nacionais e redução de custos de operação e manutenção.
II - Apresentar o potencial de aproveitamento energético do biometano gerado em aterro sanitário como alternativa ao gás natural;	Especificações (Poder calorífico superior, índice de Wobbe, enxofre total, ponto de orvalho de água e hidrocarbonetos, limitações de componentes, teores de siloxanos, clorados e fluorados) e adequações de qualidade (odorização, incremento de poder calorífico e ajuste de pressão) do biometano.	Atendimento das especificações de qualidade, similaridade de desempenho energético e intercambiabilidade entre o biometano e o gás natural.
III - Avaliar a capacidade de produção de biometano em aterros sanitários de diferentes portes.	Capacidade de plantas produtoras de biometano e estimativa de recebimento diário de RSU em aterros sanitários.	Estratégia local e/ou regional de alternativa energética em municípios de diferentes portes.

Fonte: A autora (2020).

4. RESULTADOS

4.1 Capacidade de Produção de Biometano em Instalações Autorizadas no Brasil

No Brasil, a primeira iniciativa de aproveitamento de biogás para produzir biometano ocorreu na década de 1970, na cidade do Rio de Janeiro, no antigo vazadouro a céu aberto do Caju. O sistema foi implantado pela Companhia Municipal de Limpeza Urbana do Estado do Rio de Janeiro (COMLURB), que recuperou cerca de 20 milhões de metros cúbicos de biogás, injetando-o na rede de gás natural da Companhia Estadual de Gás do Rio de Janeiro (CEG). Em 1980, passou a abastecer com sucesso parte da frota de veículos da COMLURB (MUYLAERT *et al.*, 1999 *apud* NASCIMENTO *et al.*, 2019). Entretanto, a falta de técnicas eficientes de tratamento de biogás na época não permitiu tal iniciativa avançar.

As plantas produtoras de Biometano precisam ser autorizadas pela ANP para entrarem em operação. Pela Resolução ANP N° 734/2018 há dois tipos de autorização concedida para uma instalação produtora de biometano: em construção e em operação. No Brasil, há seis instalações com diferentes tipos de autorizações para produção de biometano, sendo apenas três exclusivamente de aterros sanitários e que são estudadas na presente dissertação: GNR Fortaleza, Gás Verde e GNR Dois Arcos, todas listadas na Tabela 8.

São mostrados a identificação dos produtores de biometano, o volume de recebimento de RSU do aterro, o tipo de processo de purificação de biogás de cada produtor de biometano em aterro sanitário, volume mínimo de operação das tecnologias, capacidades máxima e regular do sistema, tipo de autorização, forma de escoamento da produção e se é feito enriquecimento de biometano por cada produtor. O GNR Fortaleza utiliza o processo de purificação de Absorção Física com Solvente Orgânico, já a Gás Verde utiliza os processos de Separação por Membranas e Separação Criogênica, enquanto o GNR Dois Arcos utiliza a Lavagem com Água Pressurizada. Em relação ao escoamento da produção de biometano, o GNR Fortaleza é o único produtor no Brasil a ter autorização pela ANP para injeção na rede de distribuição de gás natural, enquanto a Gás Verde e o GNR Dois Arcos fazem o escoamento por caminhões-feixe.

Tabela 8 – Instalações produtoras de biometano autorizadas pela ANP

Empresa ^(a)	Local ^(a)	Recebimento de RSU do Aterro (t/dia)	Volume Mínimo de Biogás para as Tecnologias Operarem (m ³)	Capacidade Máxima ^(a) (Nm ³ /dia)	Capacidade do Sistema para Produção de Biometano (Nm ³ /dia)	Tipo de Autorização ^(a)	Processo de Purificação de Biogás ^(e)	Enriquecimento de Biometano ^(e)	Escoamento da Produção de Biometano ^(e)
GNR FORTALEZA VALORIZAÇÃO DE BIOGÁS LTDA.	Caucaia, CE	5.000	3.750 ^(b)	110.000	0 – 100.000 ^(b)	OPERAÇÃO	Absorção Física com Solvente Orgânico	Não enriquece	Injeção na rede de distribuição de gás natural
GÁS VERDE S.A.	Seropédica, RJ	10.000	Não informado	204.000	0 – 150.000 ^(c)	OPERAÇÃO	Separação por Membranas e Separação Criogênica	Não enriquece	Caminhão-Feixe
GNR DOIS ARCOS VALORIZAÇÃO DE BIOGÁS LTDA.	São Pedro da Aldeia, RJ	762	700 ^(d)	16.000	0 – 14.000 ^(d)	OPERAÇÃO	Lavagem com Água Pressurizada	Não enriquece	Caminhão-Feixe

*ZEG BIOGÁS E ENERGIA S.A. (resíduos de aterros e agroindústrias)	São Paulo, SP	-	-	100.800	-	CONSTRUÇÃO	-	-	-
*SINERGÁS GNV DO BRASIL LTDA. (resíduos do setor sucroalcooleiro)	Tamboara, PR	-	-	2.040	-	CONSTRUÇÃO	-	-	-
*COCAL COMÉRCIO INDÚSTRIA CANAÃ AÇÚCAR E ÁLCOOL LTDA. (resíduos do setor sucroalcooleiro)	Narandiba, SP	-	-	24.384	-	CONSTRUÇÃO	-	-	-

*Processos em andamento de construção e ampliação de planta de produção de biometano. Se todos os processos de construção tiverem seus processos decorrentes de autorização de operação concluídos com êxito, a capacidade aumentará em 127.224 Nm³/d.

Fonte: A autora (2020).

Dados:

- (a) Dados públicos fornecidos pela ANP (2020). Acesso em: 16/09/2020;
- (b) Obtidos em visita técnica ao GNR Fortaleza (2020). Acesso em: 15/09/2020;
- (c) A autora, a partir de dados públicos fornecidos pela ANP (2020). Acesso em: 01/08/2020;

- (d) Obtidos em visita técnica ao GNR Dois Arcos (2020). Acesso em: 09/09/2020;
- (e) Dados públicos fornecidos pela ANP (2020). Acesso em: 15/08/2020.

A Figura 27 traz a imagem de um caminhão-feixe, responsável pelo transporte de cilindros de biometano comprimido.

Figura 27 – Caminhão-feixe para transporte de cilindros de biometano comprimido



Fonte: A autora (2020)

A caracterização dos aterros sanitários com instalações produtoras de biometano no Brasil é apresentada na Tabela 9 a partir da coleta de dados sobre operação, porte e municípios atendidos. De acordo com a Ecometano (2020), o aterro de Dois Arcos recebe diariamente uma média de 762 toneladas de resíduos dos municípios de Armação de Búzios, Cabo Frio, Arraial do Cabo, Iguaba Grande, Casimiro de Abreu, Araruama, Silva Jardim e São Pedro da Aldeia. O empreendimento de Dois Arcos representa um modelo que vem sendo adotado no Brasil, em que é centralizado o recebimento de RSU de vários pequenos municípios em um único município. O aterro sanitário de Seropédica recebe diariamente cerca de 10 mil toneladas de resíduos dos municípios de Itaguaí, Seropédica, Mangaratiba, São João de Meriti, Piraí, Miguel Pereira e Rio de Janeiro (CICLUS AMBIENTAL, 2020). Enquanto o Aterro de Fortaleza recebe aproximadamente 5 mil toneladas de resíduos oriundos dos municípios de Caucaia e Fortaleza.

Tabela 9 – Caracterização dos aterros sanitários com instalações produtoras de biometano

Aterro Sanitário de Fortaleza (Caucaia, CE) ^(a)	
*O Aterro é constituído em duas partes: uma antiga e outra mais nova	
Massa de resíduos recebida por dia (t/dia)	5.000 (onde 70% é destinada ao aterro novo e 30% ao aterro antigo)
População atendida pelo aterro sanitário (habitantes)	3 milhões
Municípios atendidos	Fortaleza e Caucaia
Ano de construção do aterro sanitário	1990 (aterro antigo) 2019 (aterro novo)
Ano de operação do aterro sanitário	1991 (aterro antigo) 2019 (aterro novo)
Previsão de encerramento do aterro sanitário	2021 (aterro antigo) 2040 (aterro novo)
Área ocupada pelo aterro sanitário (ha)	123 (aterro antigo) 52,6 (aterro novo)
Aterro Sanitário de Seropédica (Seropédica, RJ) ^(b)	
Massa de resíduos recebida por dia (t/dia)	10.000
População atendida pelo aterro sanitário (habitantes)	7.053.808 ^(d)
Municípios atendidos	Rio de Janeiro, Seropédica, Itaguaí, Mangaratiba, São João de Meriti, Piraí e Miguel Pereira
Ano de construção do aterro sanitário	2010
Ano de operação do aterro sanitário	2011
Previsão de encerramento do aterro sanitário	2039
Área ocupada pelo aterro sanitário (ha)	300
Aterro Sanitário de Dois Arcos (São Pedro da Aldeia, RJ) ^(c)	
Massa de resíduos recebida por dia (t/dia)	762
População atendida pelo aterro sanitário (habitantes)	530.000
Municípios atendidos	São Pedro da Aldeia, Cabo Frio,

Búzios, Casimiro de Abreu, Silva Jardim, Araruama, Iguaba Grande e Arraial do Cabo	
Ano de construção do aterro sanitário	2007
Ano de operação do aterro sanitário	2008
Previsão de encerramento do aterro sanitário	2043
Área ocupada pelo aterro sanitário (ha)	75

Fonte: A autora (2020).

- (a) Dados internos, Marquise Ambiental (2020). Acesso em: 24/08/2020;
- (b) Ciclus Ambiental (2020). Acesso em: 31/08/2020;
- (c) Dados internos, GNR Dois Arcos (2020). Acesso em: 27/08/2020;
- (d) IBGE (2010). Acesso em: 01/09/2020.

O projeto GNR (Gás Natural Renovável) Fortaleza tem capacidade para captar e tratar o biogás produzido no Aterro Sanitário Municipal Oeste de Caucaia – CE, além de produzir até 110 mil m³ de biometano por dia, cerca de 36,5 milhões de m³ por ano. Com isso, podem ser evitadas até 610.000 toneladas equivalentes de CO₂ lançadas na atmosfera anualmente, mitigando emissões de gases de efeito estufa (ECOMETANO, 2020). A Figura 28 ilustra a planta de purificação de biogás GNR Fortaleza.

Figura 28 – Planta de purificação de biogás GNR Fortaleza



Fonte: GNR Fortaleza (2020).

A Usina de Tratamento de biogás do Aterro Dois Arcos (em São Pedro da Aldeia, RJ) foi pioneira na produção de biometano oriundo de aterros sanitários no Brasil, tendo o controle de qualidade do biometano aprovado pela ANP em setembro de 2017. Segundo Ecometano (2020), ela recebe um pouco mais de 700 toneladas de resíduos sólidos urbanos por dia e tem capacidade

de produzir até 16 mil m³ de biometano por dia. Além disso, a planta possui projeto de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) e evita que cerca de 76.000 toneladas equivalentes de CO₂ sejam lançadas na atmosfera anualmente, ajudando a minimizar a emissão de GEE. A Figura 29 mostra a planta de purificação de biogás GNR Dois Arcos.

Figura 29 – Planta de purificação de biogás GNR Dois Arcos



Fonte: GNR Dois Arcos (2020).

A Unidade da empresa Gás Verde em Seropédica (RJ) tem capacidade máxima para produzir até 200 mil m³ de biometano por dia, o qual tem sido comprimido e transportado em caminhões-feixe em um momento inicial para clientes industriais e distribuidores de combustíveis (ABEGÁS, 2019). Segundo a companhia siderúrgica Ternium são recebidos até 72 mil Nm³ de biometano por dia para uso térmico, com capacidade de substituição de até um terço o uso de gás natural fóssil. A Figura 30 traz a imagem da planta de purificação de biogás do aterro sanitário de Seropédica, no Rio de Janeiro.

Figura 30 – Planta de purificação de biogás da Gás Verde no aterro sanitário de Seropédica



Fonte: Ciclus Ambiental (2020).

4.2 Finalidades Comerciais e Usos Finais de Biometano em Instalações Produtoras

Pelo artigo Art. 20º da Resolução ANP Nº 734/2018, foi estabelecido que o produtor de biometano somente poderá comercializar biometano em:

- concessionária estadual de gás natural canalizado;
- distribuidor de Gás Natural Comprimido (GNC) a granel autorizado pela ANP;
- distribuidor de Gás Natural Liquefeito (GNL) a granel autorizado pela ANP;
- comercializador de gás natural registrado pela ANP ou consumidor final de gás natural, nos termos da legislação vigente.

A etapa de abastecimento de caminhões com biometano comprimido é denominada de carregamento e acontece por conexão de mangueira à uma pressão em torno de 250 bar, segundo a ANP. Em seguida, o biometano é transportado a postos GNV e/ou a indústrias. A etapa de carregamento pode ser visualizada na Figura 31.

Figura 31 – Carregamento de caminhão para transporte de biometano a postos GNV



Fonte: A autora (2020)

A Tabela 10 mostra as respectivas finalidades comerciais das instalações produtoras de biometano de aterros sanitários autorizadas pela ANP. O GNR Fortaleza faz injeção do biometano na rede de distribuição de gás natural, a Gás Verde realiza a compressão com o intuito de venda às indústrias locais e aos postos GNV, enquanto o GNR Dois Arcos faz a compressão e venda de biometano a postos GNV.

Tabela 10 – Finalidades comerciais e usos finais de biometano de aterros sanitários

Empresa	Local	Finalidade Comercial	Uso Final
GNR FORTALEZA VALORIZAÇÃO DE BIOGÁS LTDA.	Caucaia, CE	Injeção na rede de distribuição de gás natural ^(a)	Gás de cozinha, geração de calor em indústrias e combustível veicular ^(a)
GÁS VERDE S.A.	Seropédica, RJ	Compressão e venda para indústrias e postos GNV ^(b)	Geração de calor em indústrias e combustível veicular ^(b)

GNR DOIS ARCOS VALORIZAÇÃO DE BIOGÁS LTDA.	São Pedro da Aldeia, RJ	Compressão e venda para postos GNV ^(c)	Combustível veicular ^(c)
--	----------------------------	--	--

Fonte: A autora (2020)

(a) Dados internos, GNR Fortaleza (2020). Acesso em 15/09/2020;

(b) Dados internos, Gás Verde (2020). Acesso em: 03/09/2020;

(c) Dados internos, GNR Dois Arcos (2020). Acesso em: 09/09/2020.

De acordo com a ANP, a instalação GNR Fortaleza (Caucaia, CE) é a única produtora de biometano do Brasil em 2020 com licença de operação e com autorização para injetar biometano em rede de distribuição de gás natural, podendo abastecer indústrias, postos GNV, residências e estabelecimentos comerciais. Um gasoduto de 23 km foi construído pela Companhia de Gás do Ceará a fim de transportar o biometano produzido no GNR Fortaleza, localizado no aterro sanitário de Caucaia, até a central de distribuição de gás natural (CEGÁS, 2018).

Em 2019, o biometano foi utilizado pela primeira vez em uma empresa siderúrgica no Brasil. Para fins de geração de calor, tem sido feita a substituição de até 30% do consumo de gás natural de origem fóssil pelo gás renovável oriundo da purificação de biogás do Aterro de Seropédica (RJ). O biometano injetado na tubulação de gás do complexo industrial tem sido aplicado para uso térmico em etapas do processo de produção de aço, sendo consumidos até 72 mil Nm³ de biometano por dia (TERNIUM, 2019).

4.3 Comparação das Qualidades entre o Biometano e o Gás Natural

Conforme estabelecido pelas Resoluções ANP nº 8/2015 e ANP nº 685/2017 para o biometano e pela Resolução ANP nº 16/2008 para o gás natural, a faixa de variação de poder calorífico superior (PCS) do biometano é de 34.000 a 38.400 kJ/m³ para a região Norte e de 35.000 a 43.000 kJ/m³ para as demais regiões. A faixa de variação do índice de Wobbe (IW) do biometano é de 40.500 a 45.000 kJ/m³ para a região Norte e de 46.500 a 53.500 kJ/m³ para as demais regiões.

A Tabela 11 mostra os valores típicos de alguns parâmetros de qualidade para o biometano produzido por instalações em aterros sanitários autorizadas pela ANP e o gás natural,

podendo ser observado que os valores de poder calorífico superior e índice de Wobbe estão dentro do intervalo permitido pelas normativas (ANP nº 8/2015 e ANP nº 685/2017), assim como o teor de metano atingido.

Tabela 11 – Comparação de valores típicos de características de desempenho (PCS, IW e Teor de Metano) entre o biometano (de aterros sanitários) e gás natural

Biometano (Produção Nacional, jan/2019 – abr/2020)									
(Não há importação de biometano)									
Instalação	Poder Calorífico Superior			Índice de Wobbe			Teor de Metano		
	(kJ/m³)			(kJ/m³)			(% mol)		
	Mínimo	Máximo	Média	Mínimo	Máximo	Média	Mínimo	Máximo	Média
São Pedro da Aldeia (RJ)	35.048,10	36.944,50	35.796,64	46.500,80	49.022,40	47.205,17	94,80	99,50	96,46
Caucaia (CE)	35.618,88	39.970,15	36.068,97	46.522,43	48.975,47	47.224,23	94,41	98,06	95,92
Seropédica (RJ)	35.015,90	36.940,00	35.608,28	46.507,00	49.482,00	47.379,43	94,42	99,53	95,97
Gás Natural (Produção Nacional e Importado, jan/2019 – dez/2019)									
Origem	Poder Calorífico Superior			Índice de Wobbe			Metano		
	(kJ/m³)			(kJ/m³)			(% mol)		
	Mínimo	Máximo	Média	Mínimo	Máximo	Média	Mínimo	Máximo	Média
Nordeste	36.241,32	41.004,00	37.861,23	46.702,64	51.963,00	48.811,40	85,19	98,01	91,06
Sudeste	37.910,91	51.203,44	40.295,18	49.165,39	52.717,48	50.531,02	85,32	94,33	88,31
Norte	34.202,31	37.715,12	35.443,25	41.723,63	44.734,71	43.650,40	71,87	79,20	77,17
GNL Importado	36.782,00	40.952,00	37.851,23	46.720,00	51.933,00	48.812,57	88,35	99,71	91,79
GASBOL	38.822,69	40.606,00	39.542,43	49.499,25	50.589,00	49.987,70	85,88	91,42	89,88

Fonte: Adaptado, dados públicos fornecidos pela ANP (2020).
Acesso em: 01/08/2020.

Pode-se observar que os valores atingidos para os parâmetros PCS, IW e teor de metano são consoantes aos estabelecidos pelas normativas da ANP. De acordo com os dados fornecidos pela ANP, as características de desempenho (PCS, IW e teor de metano), ponto de orvalho de

água e ponto de orvalho de hidrocarboneto são as mesmas tanto para o biometano quanto para o gás natural. O biometano produzido no GNR Fortaleza apresenta o valor mais alto para poder calorífico superior (36.068,97 kJ/m³), enquanto que o biometano produzido pela Gás Verde apresenta um índice de Wobbe ligeiramente mais elevado dentre os demais produtores (47.379,43 kJ/m³) e o biometano produzido no GNR Dois Arcos é o que atingiu maior percentual de metano (96,46% mol). A similaridade entre os limites de valores existe em razão da capacidade de intercambiabilidade entre o biometano e gás natural em gasodutos de transporte ou em rede de distribuição de gás.

A Tabela 12 apresenta os valores de siloxanos e halogenados presentes no biometano das plantas produtoras em aterros sanitários do Brasil. Pode-se observar que os halogenados clorados, cujo maior valor está presente no GNR Dois Arcos, apresentam valores mais altos em função do teor de cloro oriundo da fração de matéria orgânica dos resíduos. Os halogenados fluorados, os quais estão mais fortemente presentes no GNR Dois Arcos, tem origem relacionada por causa da água. Já os siloxanos, cujo valor mais alto é o do GNR Fortaleza, estão presentes em menor quantidade por serem mais comumente encontrados em estações de tratamento de esgoto do que em resíduos destinados a aterros sanitários.

Tabela 12 – Comparação de valores de siloxanos, halogenados clorados e halogenados fluorados presentes no biometano produzido em instalações de aterros sanitários

Resultados dos Certificados da Qualidade de Biometano								
Resolução ANP 685/2017								
GNR Fortaleza (Janeiro/2019 – Março/2020)								
Siloxanos (mgSi/m³)			Halogenados Clorados (mgCl/m³)			Halogenados Fluorados (mgF/m³)		
Mínimo	Máximo	Média	Mínimo	Máximo	Média	Mínimo	Máximo	Média
0,01	0,16	0,09	0,16	0,51	0,42	0,00	0,25	0,04
Gás Verde (Junho/2019 – Junho/2020)								
Siloxanos (mgSi/m³)			Halogenados Clorados (mgCl/m³)			Halogenados Fluorados (mgF/m³)		
Mínimo	Máximo	Média	Mínimo	Máximo	Média	Mínimo	Máximo	Média
0,01	0,30	0,08	0,06	0,24	0,14	0,00	0,02	0,01

GNR Dois Arcos (Janeiro/2019 – Março/2020)								
Siloxanos (mgSi/m³)			Halogenados Clorados (mgCl/m³)			Halogenados Fluorados (mgF/m³)		
Mínimo	Máximo	Média	Mínimo	Máximo	Média	Mínimo	Máximo	Média
0,00	0,13	0,05	0,00	3,01	0,67	0,00	0,33	0,09

Fonte: Adaptado, dados públicos fornecidos pela ANP (2020).
Acesso em: 24/08/2020.

A Tabela 13 mostra os percentuais de O₂, CO₂, Inertes, H₂S e valores de ponto de orvalho de água presentes no biometano produzido em instalações de aterros sanitários. Pode-se perceber que os percentuais de O₂ (0,45% mol) e de ponto de orvalho de água (-93,34 °C) são maiores no biometano produzido pela Gás Verde (RJ), assim como o de H₂S (0,05 mg/m³), ainda que em quantidade discreta. Já o produtor GNR Fortaleza (CE) apresenta maior percentual de CO₂ (2,04% mol), assim como o de inertes (4,08% mol).

Tabela 13 – Comparação de percentuais de O₂, CO₂, Inertes, H₂S e valores de ponto de orvalho de água presentes no biometano produzido em instalações de aterros sanitários

Resultados dos Certificados da Qualidade de Biometano														
Resolução ANP 685/2017														
GNR Fortaleza (Janeiro/2019 – Abril/2020)														
Oxigênio (% mol)			CO ₂ (% mol)			Inertes (CO ₂ +O ₂ +N ₂) (% mol)			Gás Sulfídrico (mg/m ³)			Ponto de Orvalho de Água a 1 atm (°C)		
Mínimo	Máximo	Média	Mínimo	Máximo	Média	Mínimo	Máximo	Média	Mínimo	Máximo	Média	Mínimo	Máximo	Média
0,02	0,63	0,06	1,30	2,45	2,04	1,94	5,00	4,08	0,00	0,07	0,00	-79,53	-52,00	-64,40
Gás Verde (Junho/2019 – Junho/2020)														
Oxigênio (% mol)			CO ₂ (% mol)			Inertes (CO ₂ +O ₂ +N ₂) (% mol)			Gás Sulfídrico (mg/m ³)			Ponto de Orvalho de Água a 1 atm (°C)		
Mínimo	Máximo	Média	Mínimo	Máximo	Média	Mínimo	Máximo	Média	Mínimo	Máximo	Média	Mínimo	Máximo	Média
0,14	0,90	0,45	0,00	0,11	0,01	0,47	6,43	3,60	0,00	1,00	0,05	-100,00	-49,00	-93,34
GNR Dois Arcos (Janeiro/2019 – Abril/2020)														
Oxigênio (% mol)			CO ₂ (% mol)			Inertes (CO ₂ +O ₂ +N ₂) (% mol)			Gás Sulfídrico (mg/m ³)			Ponto de Orvalho de Água a 1 atm (°C)		
Mínimo	Máximo	Média	Mínimo	Máximo	Média	Mínimo	Máximo	Média	Mínimo	Máximo	Média	Mínimo	Máximo	Média
0,03	0,80	0,38	0,03	2,79	1,04	1,02	4,61	3,54	0,00	0,00	0,00	-94,48	-48,03	-67,07

Fonte: Adaptado, dados públicos fornecidos pela ANP (2020). Acesso em: 24/08/2020.

4.4 Produção de Biometano em Aterros Sanitários de Diferentes Portes

A Figura 32 traz a imagem aérea do Aterro de Dois Arcos (RJ), cuja capacidade de recebimento de RSU é de 762 t/dia, enquanto a Figura 33 mostra a imagem aérea do Aterro de Fortaleza, cuja capacidade de recebimento de RSU é de 5.000 t/dia.

Figura 32 – Vista superior do Aterro de Dois Arcos (RJ)



Fonte: Dois Arcos (2020).

Figura 33 – Vista superior do Aterro de Fortaleza (CE)



Fonte: Delfim Martins/Tyba (2020).

A Tabela 14 traz as três instalações autorizadas pela ANP para produção de biometano oriundo de aterros sanitários de diferentes portes e conseqüentemente, diferentes capacidades de

recebimento diário de RSU. É possível observar a existência de instalações produtoras de biometano em aterros tanto de pequeno quanto de grande porte.

Tabela 14 – Aterros sanitários de pequeno e grande portes com instalações produtoras de biometano autorizadas pela ANP

Município	População Atendida (habitantes)	Massa de RSU recebida (t/dia)	Empresa	Capacidade Máxima de Produção de Biometano ^(e) (Nm ³ /dia)
Caucaia, CE	2.777.626 ^(a)	5.000 ^(b)	GNR FORTALEZA VALORIZAÇÃO DE BIOGÁS LTDA.	110.000
Seropédica, RJ	7.053.808 ^(a)	10.000 ^(c)	GÁS VERDE S.A.	204.000
São Pedro da Aldeia, RJ	530.000 ^(d)	762 ^(d)	GNR DOIS ARCOS VALORIZAÇÃO DE BIOGÁS LTDA.	16.000

Fonte: A autora (2020).

(a) IBGE (2010). Acesso em: 01/09/2020;

(b) Dado internos, Marquise Ambiental (2020). Acesso em 24/08/2020;

(c) Ciclus Ambiental (2020);

(d) Dados internos, GNR Dois Arcos (2020). Acesso em 27/08/2020;

(e) ANP (2020). Acesso em 09/09/2020.

A Tabela 15 traz as capacidades de processamento de biogás e de produção de biometano em cada instalação nos aterros sanitários.

Tabela 15 – Capacidades de processamento de biogás e de produção de biometano das instalações em aterros sanitários

Empresa	Local	Capacidade de Processamento de Biogás^(a) (m³/dia)	Capacidade de Produção de Biometano^(a) (m³/dia)
GNR FORTALEZA VALORIZAÇÃO DE BIOGÁS LTDA.	Caucaia, CE	300.000	110.000
GÁS VERDE S.A.	Seropédica, RJ	480.000	150.000
GNR DOIS ARCOS VALORIZAÇÃO DE BIOGÁS LTDA.	São Pedro da Aldeia, RJ	35.000	16.000

Fonte: A autora (2020)

(a) Dados públicos fornecidos pela ANP (2020). Acesso em: 01/08/2020.

A correlação entre a massa de RSU recebida no aterro sanitário e a capacidade de processamento de biogás em cada instalação mostrada na Tabela 15 é melhor representada em forma de um indicador A:

$$\text{indicador A} = \frac{\text{capacidade de processamento de biogás}}{\text{massa diária de RSU recebida}}$$

- O Aterro de Caucaia (CE) tem capacidade de recebimento de 5.000 t/dia de RSU, permitindo uma capacidade de processamento de biogás no GNR Fortaleza de 300.000 m³/dia. Dessa forma, pode-se obter um indicador de 60 (m³ de biogás)/(t dia de RSU).

$$\text{indicador A1} = \frac{300.000 \text{ m}^3 \text{ de biogás}}{5.000 \text{ t dia de RSU}} = 60 \frac{\text{m}^3 \text{ de biogás}}{\text{t dia de RSU}}$$

- O Aterro de Seropédica (RJ) tem capacidade de recebimento de 10.000 t/dia de RSU, permitindo uma capacidade de processamento de biogás na Gás Verde de 480.000 m³/dia. Dessa forma, pode-se obter um indicador de 48 (m³ de biogás)/(t dia de RSU).

$$\text{indicador A2} = \frac{480.000 \text{ m}^3 \text{ de biogás}}{10.000 \text{ t dia de RSU}} = 48 \frac{\text{m}^3 \text{ de biogás}}{\text{t dia de RSU}}$$

- O Aterro de Dois Arcos (RJ) tem capacidade de recebimento de 762 t/dia de RSU, permitindo uma capacidade de processamento de biogás no GNR Dois Arcos de 35.000 m³/dia. Dessa forma, pode-se obter um indicador de 46 (m³ de biogás)/(t dia de RSU).

$$\text{indicador A3} = \frac{35.000 \text{ m}^3 \text{ de biogás}}{762 \text{ t dia de RSU}} = 46 \frac{\text{m}^3 \text{ de biogás}}{\text{t dia de RSU}}$$

É possível observar que o GNR Fortaleza, embora apresente capacidades intermediárias de recebimento diário de RSU e de capacidade de processamento de biogás, apresenta um índice A de maior valor em relação às demais instalações. Cabe também ressaltar que tanto o aterro de menor capacidade de recebimento diário de resíduos (Aterro de Dois Arcos) quanto o aterro de maior capacidade de recebimento de resíduos (Aterro de Seropédica) apresentam valores semelhantes para o indicador A.

A correlação entre as capacidades de processamento de biogás e de produção de biometano em cada instalação observada na Tabela 16 é também representada em forma de um indicador B:

$$\text{indicador B} = \frac{\text{capacidade de produção de biometano}}{\text{capacidade de processamento de biogás}}$$

- O GNR Fortaleza (CE) tem capacidade de processamento de 300.000 m³/dia de biogás, permitindo uma produção de biometano de até 110.000 Nm³/dia. Dessa forma, pode-se obter um indicador de 0,36 (Nm³ de biometano)/(m³ de biogás).

$$\text{indicador B1} = \frac{110.000 \text{ Nm}^3 \text{ de biometano}}{300.000 \text{ m}^3 \text{ de biogás}} = 0,36 \frac{\text{Nm}^3 \text{ de biometano}}{\text{m}^3 \text{ de biogás}}$$

- A Gás Verde (RJ) tem capacidade de processamento de 480.000 m³/dia de biogás, permitindo uma produção de biometano de até 150.000 Nm³/dia. Dessa forma, pode-se obter um indicador de 0,31 (Nm³ de biometano)/(m³ de biogás).

$$\text{indicador B2} = \frac{150.000 \text{ Nm}^3 \text{ de biometano}}{480.000 \text{ m}^3 \text{ de biogás}} = 0,31 \frac{\text{Nm}^3 \text{ de biometano}}{\text{m}^3 \text{ de biogás}}$$

- O GNR Dois Arcos (RJ) tem capacidade de processamento de 35.000 m³/dia de biogás, permitindo uma produção de biometano de até 16.000 Nm³/dia. Dessa forma, pode-se obter um indicador de 0,45 (Nm³ de biometano)/(m³ de biogás).

$$\text{indicador B3} = \frac{16.000 \text{ Nm}^3 \text{ de biometano}}{35.000 \text{ m}^3 \text{ de biogás}} = 0,45 \frac{\text{Nm}^3 \text{ de biometano}}{\text{m}^3 \text{ de biogás}}$$

Pode-se perceber que, embora o GNR Dois Arcos seja uma instalação de menores capacidades de produção de biometano e de processamento de biogás, apresenta um indicador de mais alto valor em relação aos outros dois produtores, cujos portes são maiores.

Observa-se a partir dos indicadores A e B que as tecnologias de purificação de biogás apresentam diferentes desempenhos. Dentre diversos parâmetros, a perda de metano durante todo o processo de purificação de biogás é o fator principal responsável por afetar a eficiência energética total (SUN *et al.*, 2015). Ainda de acordo com Sun *et al.* (2015), o processo de purificação de biogás de Absorção Física com Solvente Orgânico apresenta o intervalo de eficiência de 90,0 – 95,5%, o de Lavagem com Água possui intervalo de eficiência de 88,9 - 92,8%, já os processos de Separação por Membranas e de Separação Criogênica apresentam intervalos de eficiência de 82,4 – 98,0% e 84,9 – 96,7%, respectivamente. Tais processos cabe recordar, são os adotados pelos produtores de biometano GNR Fortaleza, GNR Dois Arcos e Gás Verde, respectivamente.

A Tabela 16 traz os dados obtidos a partir de trabalho de campo na instalação produtora de biometano do GNR Fortaleza (Fortaleza, CE) em setembro de 2020.

Tabela 16 – Caracterização do produtor de biometano GNR Fortaleza (CE)

GNR Fortaleza (Caucaia, CE)	
Área da instalação de produção de biometano (m ²)	26.000
Quantidade de drenos instalados	440
Capacidade do sistema para produção de biometano (Nm ³ /dia)	0 – 100.000
Volume mínimo de biogás para as tecnologias	3.750

operarem (m ³)	
Existência de emissões em camada de cobertura do aterro sanitário	Sim
Composição média de biogás do aterro sanitário	CH ₄ : 56 - 59 % CO ₂ : 38 - 42 % N ₂ : 1,0 - 4,5 % O ₂ : 0,1 - 0,2 % H ₂ S: inferior a 1.500 ppm
Perdas de metano nos processos e possíveis causas	< 10%, em função de possíveis fugas através do manuseio de equipamentos (em geral, compressores) e perdas de eficiência
Insumos energéticos	Carvão ativado (para conferir polimento), <i>Selexol</i> (para remoção de siloxanos, CO ₂ e compostos orgânicos voláteis) e <i>Sulfatreat</i> (filtro de polimento para remoção de H ₂ S)
Consumo de energia elétrica (kWh/mês)	1.318.911,82
Demanda de água	Sim, em razão do funcionamento de dessulfurizador
Pressão de armazenamento (bar)	Não faz armazenamento
Pressão de transporte (bar)	9 (início da tubulação da rede de distribuição de gás)
Técnica de secagem	Umidade removida durante a lavagem de siloxanos e COVs

Fonte: A autora (2020).

Dados: obtidos em visita técnica ao GNR Fortaleza (2020). Acesso em: 15/09/2020.

Como informações adicionais do GNR Fortaleza, pode-se ressaltar:

- O biometano produzido na instalação representa 22% de consumo de gás do estado do Ceará;
- Busca-se manter na planta o vácuo nos sopradores de sucção de biogás em (-200mBar);
- As capacidades de processamento de biogás e produção de biometano atuais e de metas futuras:

Processamento de Biogás:

1ª Fase: 7.500 Nm³/h, podendo atingir 9.000 Nm³/h

2ª Fase (meta futura): 12.500 Nm³/h

Produção de Biometano:**1ª Fase:** 4.150 Nm³/h, podendo atingir 100.000 Nm³/h**2ª Fase (meta futura):** 6.870 Nm³/h, podendo atingir 165.000 Nm³/h

A Tabela 17 traz os dados obtidos a partir de trabalho de campo na instalação produtora de biometano do GNR Dois Arcos (São Pedro da Aldeia, RJ) em setembro de 2020.

Tabela 17 – Caracterização do produtor de biometano GNR Dois Arcos (RJ)

GNR Dois Arcos (São Pedro da Aldeia, RJ)	
Área da instalação de produção de biometano (m ²)	3.000
Quantidade de drenos instalados	145 em funcionamento, de um total de 191 em campo
Capacidade do sistema para produção de biometano (Nm ³ /dia)	0 – 14.000
Volume mínimo de biogás para as tecnologias operarem (m ³)	700 m ³
Existência de emissões em camada de cobertura do aterro sanitário	Sim
Composição média de biogás do aterro sanitário	CH ₄ : 58 % CO ₂ :40,8 % N ₂ : 1% O ₂ : 0,2 % H ₂ S: 200 ppm
Perdas de metano nos processos e possíveis causas	< 3%, em função de manuseio de válvulas, abertura de tanque e possíveis perdas de processo Carvão ativado
Insumos energéticos	(para conferir polimento)
Consumo de energia elétrica (kWh/mês)	230.000
Demanda de água	Sim
Pressão de armazenamento (bar)	Não faz armazenamento
Pressão de transporte (bar)	220 – 250
Técnica de secagem	Condensação após a compressão do biogás e uso de TSA (adsorção por incremento de temperatura - <i>Termal Swing Adsorption</i>) para secagem final

Fonte: A autora (2020).

Dados: obtidos em visita técnica ao GNR Dois Arcos (2020). Acesso em: 09/09/2020.

Como informações adicionais do GNR Dois Arcos, pode-se destacar:

- O biometano produzido é comercializado para 3 - 4 postos GNV da região;
- O CO₂ apresenta melhor dissolução em água gelada e por isso, busca-se manter a planta a qualidade de resfriamento da água em 8°C;
- Busca-se manter na planta o vácuo nos sopradores de sucção de biogás em (-26mBar), podendo ser observado na Figura 34.

Figura 34 – Transmissor de Pressão



Fonte: A autora (2020).

É possível observar através das tabelas 16 e 17, as diferentes áreas e capacidades das respectivas instalações. O GNR Fortaleza, instalado em aterro de grande porte com capacidade de recebimento de 5.000 toneladas de RSU por dia, possui área de 26.000 m², capacidade de produção de biometano de até 100.000 Nm³/dia e finalidade de injeção em rede de distribuição de gás natural. Enquanto o GNR Dois Arcos, pertencente a um consórcio de aterros, tem capacidade de recebimento média de 762 toneladas de RSU por dia, possui área de 3.000 m², capacidade de produção de biometano de até 14.000 Nm³/dia e finalidade de produção de combustível veicular.

Tanto o GNR Fortaleza quanto o GNR Dois Arcos embora tenham adotado tecnologias estrangeiras, tiveram todo o planejamento de projeto de suas respectivas instalações desenvolvidos nacionalmente, de maneira a escolher as técnicas de purificação mais adequadas a

atender a capacidade de operação das plantas em função da vazão e características do biogás gerado nos aterros sanitários, e conseqüentemente, as especificações de qualidade do biometano final. Outro fator diferencial a ser destacado em ambas as instalações é a integração entre a empresa operadora de cada aterro e a empresa responsável por cada instalação produtora de biometano, permitindo agilidade em tomada de decisões, facilidade de comunicação e transparência de dados entre as mesmas. Por fim, foi observado que no GNR Dois Arcos, instalação em aterro de pequeno porte, as empresas responsáveis pela operação da planta produtora de biometano e a de distribuição do biocombustível aos postos GNV atuam como empresas parceiras, facilitando a fluidez de todos os processos da cadeia desde a produção à venda.

O menor aterro sanitário avaliado no presente estudo, Dois Arcos (RJ), tem o volume mínimo de biogás para as tecnologias de purificação operarem de 700 m³ e recebimento médio de RSU de 762 t/dia. Enquanto o outro aterro avaliado, Fortaleza (CE), apresenta o volume mínimo de biogás para as tecnologias de purificação operarem de 3.750 m³ e recebimento médio de RSU de 5.000 t/dia. Dessa maneira, pode-se perceber que, quando bem planejada e operada adequadamente, havendo parceria entre o produtor de biometano e a operadora do aterro sanitário, o aproveitamento energético de biogás para produção de biometano mostra-se viável economicamente e factível como estratégia local de alternativa energética em instalações tanto de aterros sanitários de pequeno quanto de grande porte.

4.5 Incentivos e Desafios ao Biometano

O armazenamento e transporte de gás envolvem cuidados de infraestrutura e logística, e por isso, longas distâncias implicam em custos mais altos. Dessa forma, para que a produção seja economicamente rentável é extremamente importante que a planta tecnológica de purificação do biogás esteja próxima à malha de distribuição de gás natural. O tratamento de purificação do biogás envolve custos ainda muito altos para atender as especificações para fins de injeção, tornando o biometano menos competitivo frente ao gás natural veicular, GLP e aos demais biocombustíveis (como etanol e biodiesel).

A maior fragilidade do setor é o domínio de conhecimento técnico, em especial, em função da ausência de tecnologias desenvolvidas especificamente para tratamento de biogás. Grande parte das plantas de recuperação energética envolve alta complexidade e

consequentemente, geram altos gastos de operação e manutenção. Dessa forma, os fornecedores de tecnologia precisam atuar como parceiros e transferir conhecimento operacional, assim como fornecer a garantia de desempenho dos equipamentos. Cabe também acrescentar que devido ao elevado custo Brasil, é muito importante a nacionalização das plantas. Outro fator importante a ser colocado são os altos custos relacionados às análises laboratoriais e testes obrigatórios de qualidade de biometano, pois, em geral, costumam ser feitos por um único laboratório, visto que não há oferta suficiente de empresas com capacidade técnica no mercado.

Tais custos poderiam ser reduzidos caso os governos estaduais, responsáveis por regular a distribuição de gás canalizado, oferecessem um subsídio direto aos produtores de biogás e biometano, assim como ocorre em países europeus aonde a implantação da tecnologia é bem sucedida. No Brasil, as diferentes legislações vigentes em cada estado configuram barreiras adicionais ao início de operação de instalações produtoras. Tais legislações estaduais se tornam um impedimento especialmente no caso de a instalação produtora tenha fins de injeção de biometano na rede de distribuição de gás natural, já que em alguns estados a companhia estadual de gás possui o direito de explorar com exclusividade a distribuição de gás canalizado sob contrato de concessão.

Um dos fatores que contribuíram para o bom desempenho do biometano na Europa foi a adoção do pagamento de tarifas feed-in (mecanismo de incentivo às energias renováveis) pelos produtores (VEIGA, 2016), as quais se apresentavam diferenciadas e mais vantajosas a partir de contratos de longo prazo. Outra solução seria a ampliação de iniciativas de financiamento de projetos com cobrança de taxas de juros reduzidos.

Para haver a difusão do biometano como combustível é importante destacar a rentabilidade total da cadeia de valor agregado desde a geração do biogás, as etapas de tratamento até a distribuição do biometano através de redes de gás e postos de abastecimento (PROBIOGÁS, 2016). O estudo ressalta ainda sobre a importância em existir uma venda mínima do combustível de forma a assegurar a sua rentabilidade.

São muitos os desafios, dentre eles: estímulos de contratação de linhas financiamento, alto custo inicial para a construção e de manutenção das plantas de purificação, capacidade técnica insuficiente, continuidade das medidas regulatórias e evolução de normas técnicas, maior atuação das agências reguladoras, carência de informações e dados, comportamento de

resistência à mudança e incertezas sobre a expansão do mercado de gás natural. Outra questão é que os aterros sanitários são projetados de forma a viabilizar uma capacidade de geração de biogás eficiente e duradoura, fazendo com que os investimentos em biometano necessitem de contratos de longo prazo.

CONCLUSÕES

De maneira geral, a presente pesquisa mostrou que a iniciativa de purificação de biogás em aterros sanitários se apresenta como uma promissora estratégia local e/ou regional de alternativa energética com potencial em ascensão, tendo seu produto final, o biometano, como um combustível renovável capaz de substituir parte da demanda do gás natural de origem fóssil. Uma das possibilidades mais promissoras de penetração no mercado é a partir da compressão e venda de gás comprimido, além da injeção na rede de distribuição de gás natural.

Foram propostos os indicadores A e B, que representam, respectivamente: (a relação entre a capacidade de processamento de biogás na instalação e a massa de RSU recebida diariamente pelo aterro sanitário) e (a relação entre a capacidade de processamento de biogás e a produção de biometano na instalação). Foi possível observar que uma instalação produtora de biometano com capacidades intermediárias de processamento de biogás e de recebimento diário de RSU de seu respectivo aterro apresentou um indicador A com valor superior em relação às demais instalações, assim como os aterros de menor e maior capacidades de recebimento diário de resíduos apresentaram valores semelhantes para o indicador A. Também foi constatado que uma instalação, embora com menores capacidades de produção de biometano e de processamento de biogás e que recebe RSU de vários pequenos municípios da região, como a do GNR Dois Arcos, apresentou um indicador B de valor mais alto em relação aos outros dois produtores de maiores portes. Dessa forma, foi verificado a partir dos indicadores A e B, que as tecnologias de purificação de biogás apresentaram diferentes desempenhos.

- As alternativas tecnológicas de purificação de biogás aplicáveis ao Brasil foram estudadas em função da eficiência de desempenho e percentual de perdas de metano. Os processos de produção de biometano adotados nas instalações produtoras de biometano autorizadas pela ANP em aterros sanitários são Absorção Física com Solvente Orgânico, Lavagem com Água, Separação por Membranas e Separação Criogênica, os quais foram escolhidos de acordo com o tamanho e capacidade da instalação, vazão e características do biogás do aterro e uso final de biometano pretendido por cada produtor;
- O aproveitamento energético do biometano mostra-se competitivo em relação às demais alternativas energéticas (como gás natural e gás liquefeito de petróleo -

GLP), pois sua comercialização não sofre impactos de volatilização de moeda estrangeira, seja para finalidades de injeção na rede de distribuição de gás natural e compressão e venda, assim como de usos finais de gás de cozinha, geração de calor em indústrias e combustível veicular. O processo de purificação de biogás quando bem operado e dimensionado corretamente, atende às especificações e à similaridade de desempenho energético entre o biometano e o gás natural, confirmando a capacidade de intercambiabilidade entre os mesmos. Cabe ressaltar, entretanto, que as diferentes legislações estaduais em vigor no país conferem um impedimento ao produtor de biometano em caso de finalidade de injeção na rede de distribuição de gás natural, já que em alguns estados a companhia estadual de gás possui o direito exclusivo de exploração e distribuição de gás canalizado;

- A produção de biometano em aterros sanitários de diferentes portes se apresenta economicamente viável e factível quando a empresa operadora do aterro e o produtor de biometano atuam como parceiros, permitindo a transparência de dados e a integração dos processos desde a captação à etapa final de purificação de biogás. As instalações produtoras de biometano estudadas eram localizadas em aterros sanitários de diferentes portes, em que o de menor tamanho tem recebimento de RSU de 762 t/dia e o de maior tamanho com massa de resíduos recebidos de 10.000 t/dia. Outro fator a ser destacado é que, embora sejam adotadas tecnologias estrangeiras, é muito importante que o planejamento de projeto da instalação, especialmente em aterros de pequeno porte, seja desenvolvido nacionalmente, a fim de reduzir custos de operação e manutenção.

REFERÊNCIAS

ABEGÁS - Associação Brasileira de Empresas Distribuidoras de Gás Canalizado. Disponível em: < <https://www.abegas.org.br/arquivos/73011>>. Acesso em: 31 de maio de 2020.

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2018/ 2019**. São Paulo, 2019.

ADNAN, A. I.; ONG, M. Y.; Nomanbhay, S.; Chew, K. W.; Show, P. L. **Technologies for Biogas Upgrading to Biomethane: A Review**. Bioengineering, an Open Access Journal from MDPI, 2019, volume 6, issue 4, p. 92. Basel, Suíça, 2019.

ALBARRACIN, A. L. T. **Biogás oriundo de Resíduos como Vetor Energético no Brasil**. 2016. 116 f. Dissertação (mestrado). Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas. Campinas (SP), 2016.

ALFAIA, R. G. S. M.; COSTA, A. M.; CAMPOS, J. C. **Municipal solid waste in Brazil: A Review**. Waste Management & Research, 2017, Vol. 35(12), p.1195 – 1209. International Solid Waste Association. Reino Unido, 2017.

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

_____. **Autorização para produção de biocombustíveis**. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/producao-de-biocombustiveis/autorizacao-para-producao-de-biocombustiveis>>. Acesso em 16 de set de 2020. ANP, 2020.

_____. Resolução ANP Nº 734/2018. Regulamenta a autorização para o exercício da atividade de produção de biocombustíveis e a autorização de operação da instalação produtora de biocombustíveis. Brasília, 2018. ANP, 2018.

_____. Resolução ANP 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. Brasília, 2017. ANP, 2017.

_____. Resolução ANP nº 8, de 30 de Janeiro de 2015. **Especificações sobre a produção e utilização do biometano**. 2015. Disponível em: < <http://legislacao.anp.gov.br/?path=legislacao-anp/resol-anp/2015/janeiro&item=ranp-8--2015>>. Acesso em 10 de maio de 2020. ANP, 2015.

_____. Resolução ANP nº 16/2008. Estabelece a especificação do gás natural, nacional ou importado, a ser comercializado em todo o território nacional. Brasília 2008. ANP, 2008.

BNDES - Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social.

_____. **VISÃO 2035: Brasil, País Desenvolvido. Agendas Setoriais para Alcance da Meta.** Rio de Janeiro. BNDES, 2018.

_____. **Análise das Diversas Tecnologias de Tratamento e Disposição Final de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil, Europa, Estados Unidos e Japão.** Fundação de Apoio ao Desenvolvimento da Universidade Federal de Pernambuco (FADE/UFPE). BNDES, 2014.

BORSCHIVER, S.; SILVA, A.L.R. DA. **Mapeamento Tecnológico Para Purificação De Biogás e Seu Aproveitamento: Panorama Mundial e Iniciativas Nacionais.** XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química (COBEQ). Santa Catarina, 2014.

BRASIL. MCTI. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. **Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil.** 4ª Edição. Brasília, 2017. BRASIL, 2017a.

_____. Ministério de Minas e Energia. **Política Nacional de Biocombustíveis.** Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017. Diário Oficial da União. Brasília, 2017. BRASIL, 2017b.

_____. **Lei de Acesso à Informação.** Lei nº 12.527, de 18 de novembro de 2011. Regula o acesso a informações prevista na Constituição Federal; e dá outras providências. Diário Oficial da União. Brasília, 2011. BRASIL, 2011.

_____. Ministério do Meio Ambiente. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos.** Lei nº 12.305 de 02 de agosto de 2010; altera a lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial da União. Brasília, 2010. BRASIL, 2010.

_____. Ministério do Meio Ambiente. **Política Nacional sobre Mudança do Clima.** Lei 12.187 de 29 de dezembro de 2009; institui a PNMC e dá outras providências. Brasília, 2009. BRASIL, 2009.

CEGÁS – Companhia de Gás do Ceará. Disponível em: <<http://www.cegas.com.br/2018/04/>>. Acesso em: 28 de jul de 2020.

CICLUS AMBIENTAL. Disponível em: < http://ciclusambiental.com.br/pt_BR/>. Acesso em: 31 de ago de 2020.

DAMASCENO, L. A. G. **Emissão Fugitiva de Metano Através do Sistema de Cobertura de um Aterro Sanitário Considerando a Ocorrência de Zonas com Fissuramento**. 2018. 188 f. Dissertação (mestrado). Escola Politécnica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal Da Bahia (BA). Salvador, 2018.

ECOMETANO. Ecometano Empreendimentos Ltda. ECOMETANO[s.d.].Disponível em: <<http://www.ecometano.com.br/ecometano/projetos.html>>. Acesso em: 28 de jul de 2020. ECOMETANO, 2020.

EPA - Environmental Protection Agency. **LFG Energy Project Development Handbook**. Landfill Methane Outreach Program. 2020.

EPE - Empresa De Pesquisa Energética. Ministério de Minas e Energia. Rio de Janeiro.

_____. **Atlas da Eficiência Energética Brasil 2019 - Relatório de Indicadores**. Nota Técnica EPE/DEA/SEE/001/2020. Rio de Janeiro, 2020. EPE, 2020.

_____. **Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis**. Rio de Janeiro, 2019. EPE, 2019a.

_____. **Balanco Energético Nacional**. Rio de Janeiro, 2019. EPE, 2019b.

_____. **Estudo sobre a Economicidade do Aproveitamento dos Resíduos Sólidos Urbanos em Aterro para Produção de Biometano**. Nota Técnica DEA 019/2018. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **Inventário Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos**. Nota Técnica DEA 18/14. Rio de Janeiro, 2014. EPE, 2014a

_____. **Economicidade e Competitividade do Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos**. Nota Técnica DEA 16/14. Rio de Janeiro, 2014. EPE, 2014b.

_____. **Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos de Campo Grande, MS**. Nota Técnica DEA 06/08. Rio de Janeiro, 2008.

EurObserv'ER – Observatório de Energias Renováveis da União Européia. **Biogas Barometer**. União Européia, 2017.

GIZ - Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit. **Opções em Waste-to-Energy na Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos: Um Guia para Tomadores de Decisão em Países Emergentes ou em Desenvolvimento**. Eschborn, Alemanha, 2017.

GOMES, F. C. S. P.; AQUINO, S. F.; COLTURATO, L. F. D. B. **Biometanização Seca De Resíduos Sólidos Urbanos: Estado da Arte e Análise Crítica das Principais Tecnologias. Engenharia Sanitária Ambiental.** Brasil. Vol. 17. 2012.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <<http://www.https://cidades.ibge.gov.br>>. Acesso em: 01 de set de 2020.

IEA - The International Energy Agency. **IEA Bioenergy Annual Report 2018.** . IEA Bioenergy: EXCO: 2019: 01. IEA Bioenergy, 2019.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2014 Mitigation of Climate Change.** Cambridge University Press. United States of America, 2014.

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Ministério da Economia. Brasília – DF.

_____. **ODS 13 Tomar Medidas Urgentes Para Combater A Mudança Do Clima E Seus Impactos.** Cadernos ODS. Brasília, 2019.

_____. **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Urbanos.** Brasília, 2012.

IRENA - The International Renewable Energy Agency. **Biogas For Road Vehicles. Technology Brief.** Abu Dhabi, 2018.

MACIEL, F. J. **Estudo da Geração, Percolação e Emissão de Gases no Aterro de Resíduos Sólidos da Muribeca/PE.** 2003. 153 f. Dissertação (mestrado). Departamento de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco. Recife (PE), 2003.

MARQUISE AMBIENTAL. Disponível em: <<http://www.marquiseambiental.com.br/servicos-e-tecnologia/gerenciamento-de-aterro-sanitario>>. Acesso em: 18 de out de 2020.

MUÑOZ, R.; MEIER, L.; DIAZ, I.; JEISON, D. **A Review On The State-Of-The-Art of Physical/Chemical and Biological Technologies for Biogás Upgrading.** Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 2015.

NASCIMENTO, M. C. B.; FREIRE, E. P.; DANTAS F. A. S.; GIANSANTE, M. B. **Estado Da Arte Dos Aterros De Resíduos Sólidos Urbanos Que Aproveitam Biogás Para Geração De Energia Elétrica E Biometano No Brasil**. Engenharia Sanitária Ambiental. Brasil. Vol. 24. 2019.

ORNELAS-FERREIRA, B.; LOBATO, L. C. S.; COLTURATO, L. F. D.; TORRES, E. O.; POMBO, L. M.; PUJATTI, F. J. P.; ARAÚJO, J. C.; CHERNICHARO, C. A. L. **Strategies for Energy Recovery and Gains Associated with the Implementation of a Solid State Batch Methanization System for Treating Organic Waste from City of Rio de Janeiro – Brazil**. Renewable Energy 146 (p. 1976-1983), Science Direct. Elsevier, 2019.

ORNELAS-FERREIRA, B. **Avaliação De Um Sistema De Metanização De Resíduos Alimentares Com Vistas Ao Aproveitamento Energético Do Biogás**. 2015. 124 f. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia da UFMG. Belo Horizonte (MG), 2015.

PETERSSON, A.; WELLINGER, A. **Biogas Upgrading Technologies – Developments And Innovations**. Task 37 - Energy from biogas and landfill gas. IEA Bioenergy. 2009.

PROBIOGÁS. **Biometano como Combustível Veicular**. Em parceria com a Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ). Ministério das Cidades. Brasília, 2016.

REICHERT, G. A. **Aplicação Da Digestão Anaeróbia De Resíduos Sólidos Urbanos: Uma Revisão**. 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Campo Grande/ MS, 2005.

SEEG – Sistema de Estimativa de Emissão de Gases de Efeito Estufa.

_____. **Análise das Emissões Brasileiras de Gases de Efeito Estufa e suas Implicações para as Metas do Brasil 1970-2018**. 2019. SEEG, 2019a.

_____. **Nota Metodológica SEEG 7.0 – Setor de Resíduos**. 2019. SEEG, 2019b.

_____. **Novas Estimativas do SEEG BRASIL**. SEEG, 2019c. Disponível em: <<http://plataforma.seeg.eco.br/sectors/residuos>>. Acesso em: 02 de jun de 2020.

SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Ministério de Desenvolvimento Regional. **Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos**. Brasília, 2017.

SUN, Q.; LI, H.; YAN, J.; LIU, L.; YU, Z.; YU, X. **Selection of Appropriate Biogas Upgrading Technology – A Review of Biogas Cleaning, Upgrading and Utilisation**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 51 (p. 521-532), Science Direct. Elsevier, 2015.

TCHOBANOGLIOUS, G.; KREITH, F. **Handbook of Solid Waste Management**. McGRAW-HILL, USA, 2002.

TERNIUM. [S.I.] [2019]. Disponível em: <<https://br.ternium.com/pt/novidades/noticias/biometano-na-siderurgia--17096859519>>. Acesso em: 05 de maio de 2020.

THRÄN *et al.* 2014. **Biomethane – status and factors affecting market development and trade**. IEA (International Energy Agency) Task 40 and Task 37 Joint Study. Setembro, 2014.

TYBA. Foto feita por Delfim Martins com drone do Aterro Metropolitano Oeste de Caucaia (ASMOC) em agosto de 2018. Caucaia, Ceará. Disponível em: <http://tyba.com.br/br/resultado/?busca=Asmoc&foto=on&video=on#pag-1>. Acesso em: 15 de out de 2020.

VAN ELK, A. G. H. P. **Mecanismo de Desenvolvimento Limpo Aplicado a Resíduos Sólidos. Redução de Emissões na Disposição Final**. IBAM – Instituto Brasileiro de Administração Municipal, Rio de Janeiro, 2007.

VEIGA, A. P. B. **Contribuição à Avaliação das Barreiras e Oportunidades Regulatórias, Econômicas e Tecnológicas do Uso de Biometano Produzido a Partir de Gás de Aterro no Brasil**. 2016. 173 f. Dissertação (mestrado). Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2016.

ANEXO A – FICHA CADASTRAL DE PRODUTOR DE BIOMETANO



RESOLUÇÃO ANP Nº 734/2018
FICHA CADASTRAL DE
PRODUTORES DE BIOMETANO

Identificação da Instalação Solicitante

Nome Empresarial:	
CNPJ da Instalação:	
CNPJ da Matriz:	

Endereço da Empresa Matriz

CEP:	
Logradouro:	
Número:	
Complemento:	
Bairro:	
Município:	
UF:	

Meios de Comunicação da Empresa Matriz

Correio Eletrônico:	
Telefone Comercial:	
Complemento:	

Endereço da Instalação Industrial

--

CEP:	
Logradouro:	
Número:	
Complemento:	
Bairro:	
Município:	
UF:	

Meios de Comunicação da Instalação Industrial

Correio Eletrônico:	
Telefone Comercial:	
Complemento:	

Endereço para Correspondência

Contato:	
CEP:	
Logradouro:	
Número:	
Complemento:	
Bairro:	
Município:	
UF:	

Capital Social

Valor (R\$):	
---------------------	--

Identificação dos Sócios/Administradores/Diretores

Sócio/Administrador/Diretor

Tipo de Pessoa:	Escolher um item.
Nome:	
CPF/CNPJ:	
Qualificação:	Escolher um item.

Sócio/Administrador/Diretor

Tipo de Pessoa:	Escolher um item.
Nome:	
CPF/CNPJ:	
Qualificação:	Escolher um item.

Sócio/Administrador/Diretor

Tipo de Pessoa:	Escolher um item.
Nome:	
CPF/CNPJ:	
Qualificação:	Escolher um item.

Sócio/Administrador/Diretor

Tipo de Pessoa:	Escolher um item.
Nome:	
CPF/CNPJ:	
Qualificação:	Escolher um item.

Sócio/Administrador/Diretor

Tipo de Pessoa:	Escolher um item.
Nome:	
CPF/CNPJ:	
Qualificação:	Escolher um item.

Identificação dos Representantes Legais

Representante Legal

Tipo de Pessoa:	Escolher um item.
------------------------	-------------------

Nome:	
CPF/CNPJ:	
Sexo:	
Qualificação:	Escolher um item.
Correio Eletrônico:	
Telefone:	

Representante Legal

Tipo de Pessoa:	Escolher um item.
Nome:	
CPF/CNPJ:	
Sexo:	
Qualificação:	Escolher um item.
Correio Eletrônico:	
Telefone:	

Representante Legal

Tipo de Pessoa:	Escolher um item.
Nome:	
CPF/CNPJ:	
Sexo:	
Qualificação:	Escolher um item.
Correio Eletrônico:	
Telefone:	

Identificação dos Contatos

Contato Área Industrial

Nome:	
Qualificação:	
Correio Eletrônico:	
Telefone:	

Contato Envio de Dados

Nome:	
Qualificação:	
Correio Eletrônico:	
Telefone:	

Dados da Instalação Produtora de Biometano

Origem: Produtos e resíduos orgânicos agrossilvopastoris e comerciais.
 Aterros sanitários e estações de tratamento de esgoto.

Detalhamento do material utilizado:

Capacidade processamento de biogás (a 20°C e 1 atm): _____ m³/d

Capacidade produção de biometano (a 20°C e 1 atm): _____ m³/d

Processo de purificação:

- Adsorção com modulação de pressão (PSA)
 Lavagem com água pressurizada
 Absorção física com solvente orgânico
 Absorção química com solução de amina
 Separação por membranas
 Separação criogênica
 Outro:

Enriquecimento:

- Gás Natural
 GLP
 Propano
 Não enriquece

Escoamento da produção:

- Duto dedicado
 Injeção na rede de distribuição de gás natural
 Caminhão-feixe
 Outro:

Listagem de Tanques

Identificação do	Tipo de Produto	Volume (m ³)	Altura (m)	Diâmetro (m)
------------------	-----------------	--------------------------	------------	--------------

Tanque				

_____, ____ de _____ de _____

Assinatura do Representante Legal da Sociedade Empresária