**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ENERGIA E AMBIENTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA**

ANA PAULA BEBER VEIGA

**CONTRIBUIÇÃO À AVALIAÇÃO DAS BARREIRAS E
OPORTUNIDADES REGULATÓRIAS, ECONÔMICAS E
TECNOLÓGICAS DO USO DE BIOMETANO PRODUZIDO A PARTIR
DE GÁS DE ATERRO NO BRASIL**

**SÃO PAULO
2016**

ANA PAULA BEBER VEIGA

CONTRIBUIÇÃO À AVALIAÇÃO DAS BARREIRAS E OPORTUNIDADES
REGULATÓRIAS, ECONÔMICAS E TECNOLÓGICAS DO USO DE BIOMETANO
PRODUZIDO A PARTIR DE GÁS DE ATERRO NO BRASIL

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Energia do Instituto de
Energia e Ambiente da Universidade de
São Paulo para obtenção do título de
Mestre em Ciências.

Orientadora: Dr^a Sonia Seger Pereira
Mercedes.

Versão Revisada

SÃO PAULO
2016

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

FICHA CATALOGRÁFICA

Veiga, Ana Paula Beber.

Contribuição à avaliação das barreiras e oportunidades regulatórias, econômicas e tecnológicas do uso de biometano produzido a partir de gás de aterro no Brasil. / Ana Paula Beber Veiga; orientadora: Sonia Seger Pereira Mercedes. – São Paulo, 2016.

173 f.: il.; 30 cm.

Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Energia – Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo

1. Biometano. 2. Resíduos sólidos. 3. Biogás. 4. Aterros sanitários
1. Título

Nome: VEIGA, Ana Paula Beber

Título: Contribuição à avaliação das barreiras e oportunidades regulatórias, econômicas e tecnológicas do uso de biometano produzido a partir de gás de aterro no Brasil

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Orientadora: Dr^a Sonia Seger Pereira Mercedes.

Membros da Comissão Julgadora:

Dr^a. Sonia Seger Pereira Mercedes -IEE/USP
Presidente da Comissão Julgadora e Orientadora

Prof^a. Dr^a. Patricia Helena Lara dos Santos Matai – EP/USP

Prof^a. Dr^a. Sylmara Lopes Francelino Gonçalves Dias – EACH/USP

DEDICATÓRIA

Aos meus pais Maria e Augusto (*in memoriam*), pelos ensinamentos tão valiosos quanto
àqueles obtidos na academia.

AGRADECIMENTOS

Aos colegas e professores do grupo de pesquisa em práticas metodológicas “*Café com Pesquisa*”, coordenado pela Prof. Dr^a. Sylmara Gonçalves Dias, Prof. Dra. Tatiana Sakurai, Prof. Dr. Armino Teodósio e Dra. Sonia Seger Mercedes, pelas importantes trocas e aprendizados ao longo de 2015.

Aos funcionários da secretaria do PPGE, pela presteza e paciência dispensadas ao atender todas as minhas demandas.

Aos professores do Programa de Pós Graduação em Energia do Instituto de Energia e Ambiente, em especial à Professora Dr^a. Patrícia Helena Lara dos Santos Matai, pela imensa compreensão, solicitude e delicadeza que demonstrou durante o período em que estive sob sua orientação.

À minha orientadora Dr^a. Sonia Seger Pereira Mercedes, pela motivação, apoio e incentivo constantes no processo de minha orientação.

RESUMO

VEIGA, Ana Paula Beber. 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 em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

A exploração energética do biogás é dominada desde tempos remotos, e tem contribuído, mesmo que em pequena escala, para a diversificação das matrizes energéticas de muitos países, a partir da premissa da expansão no uso das energias renováveis. Mais recentemente, a necessidade de aprimoramento da gestão de resíduos e questões como a segurança no suprimento energético e mudanças climáticas impulsionaram o refinamento de técnicas de purificação de biogás, com o objetivo de produzir o biometano, potencial substituto do gás natural de origem fóssil. É de interesse desta pesquisa a purificação de biogás de aterros e sua utilização como combustível veicular e injeção em gasodutos, uma vez que o recente desenvolvimento de projetos no Brasil se dá a espelho do que ocorre em países desenvolvidos, apesar de os setores de saneamento e energia brasileiros apresentarem características distintas. O estágio de desenvolvimento atual da exploração do biometano na Alemanha, Reino Unido e Suécia foi identificado através de revisão de literatura e análise documental. O resultado foi confrontado com o contexto atual, perspectivas atuais e futuras para este recurso no Brasil, considerando em especial, a Política Nacional de Resíduos Sólidos, os planos de desenvolvimento do setor energético nacional, e políticas estaduais do Rio de Janeiro e São Paulo, que tratam especificamente da promoção do uso do biogás. As condicionantes verificadas em nível nacional e regional foram então classificadas enquanto barreiras e oportunidades para a exploração do biometano obtido a partir de gás de aterros. Como resultado, a pesquisa identificou que a implantação de mecanismos de incentivo e a definição dos usos finais selecionados em função da infraestrutura disponível foram indutores do desenvolvimento deste recurso nos países selecionados. A verificação do cenário atual de desenvolvimento do biometano de gás de aterros no Brasil demonstra que, apesar de não apresentar potencial energético significativo e a regulação em vigor limitar suas aplicações, seu desenvolvimento pode ser uma alternativa para, em última análise, contribuir para a melhoria das condições sanitárias vigentes no país.

Palavras-chave: Biometano, Resíduos sólidos, Biogás, Aterros sanitários.

ABSTRACT

VEIGA, Ana Paula Beber. Contribution to the assessment of regulatory, economic and technological challenges and opportunities for the use of biomethane produced from landfill gas in Brazil. 2016. 173 f. Dissertation (Master of Science) – Postgraduate Program in Energy, University of São Paulo, São Paulo, 2016.

Biogas as an energy source has been explored since ancient times, and has contributed, if only to a small degree, to diversify the energy mix of many countries, based on the increased use of renewable energy. Recently, the need to improve waste management and issues such as power supply safety and climate change, have driven the development of biogas purification techniques to produce biomethane, a potential substitute for fossil-based natural gas. The focus of this research is the purification of landfill biogas, its use as a fuel for vehicles and injecting it into gas pipelines, since the recent development of projects in Brazil reflect those in developed countries, even though the Brazilian sanitation and energy sectors present distinct characteristics. The current development stage of biomethane investigations in Germany, United Kingdom and Sweden, were analyzed by reviewing literature and examining documents. The result was compared with the actual situation of this resource in Brazil, as well as current and future perspectives based mainly on the National Solid Waste Policy, the development plans for the national energy sector and state policies for Rio de Janeiro and São Paulo that specifically deal with promoting the use of biogas. National and regional constraints were verified and classified in relation to challenges and opportunities for use of biomethane obtained from landfill gas. As a result, the research revealed that the implementation of incentive mechanisms and the definition of selected end uses based on the available infrastructure are drivers for the development of this resource in the selected countries. Analysis of the current scenario of biomethane development from landfill gas in Brazil demonstrates that, even though it does not present a significant energy potential and current regulations limit its applications, its development could be an alternative, at least, to help improve the prevailing sanitary conditions of the country.

Keywords: Biomethane, Solid waste, Biogas, Landfills.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Preços das RCEs no mercado internacional entre 2008 e 2013.	16
Figura 2 – Rotas de produção e aplicação do biogás e biometano.	18
Figura 3 - Proporção de biogás e gás natural no setor de transportes na Suécia entre 1995-2014, em TWh.	19
Figura 4 – Recorte metodológico do objeto de estudo da pesquisa.	25
Figura 5 – Proporção de energia renovável no consumo final mundial em 2013.	33
Figura 6 – Substratos utilizados para a produção de biogás na União Europeia, 2008 - 2013.	34
Figura 7 – Usos finais do biogás produzido na Europa, em termos de energia final.	35
Figura 8 – Empregabilidade do setor de energia renovável por tecnologia.	36
Figura 9 – Matriz de oferta de energia elétrica brasileira em 2015 – Capacidade instalada (%).	37
Figura 10 – Emissões de GEE por setor de atividade, por grupo de países, em 1970, 1990 e 2010.	39
Figura 11 – Emissões de GEE dos subsetores do setor tratamento de resíduos, 2012.	40
Figura 12 – Emissões de GEE por tipo de fontes de energia em cogeração.	43
Figura 13 – Ilustração da extração forçada e rotas de aplicação para o gás de aterro.	45
Figura 14 – Participação das principais tecnologias utilizadas na purificação de biogás em 2012.	46
Figura 15 – Diagrama ilustrativo do processo de lavagem com água.	47
Figura 16 – Diagrama ilustrativo do processo de lavagem química.	49
Figura 17 - Diagrama ilustrativo do processo PSA.	50
Figura 18 – Diagrama ilustrativo do processo de separação por membranas gás-gás.	52
Figura 19 – Desenho institucional simplificado do setor energético para o biometano.	57
Figura 20 – Participação de fontes renováveis nas matrizes energéticas brasileira e mundial.	58
Figura 21 – Total de energia elétrica, de empreendimentos novos, negociada em leilões, de 2008 a 2020.	58
Figura 22 - Desenho institucional simplificado do setor de saneamento para os resíduos sólidos.	61
Figura 23 - Municípios, segundo destinação final de resíduos sólidos.	62
Figura 24 – Hierarquia da PNRS.	63
Figura 25 - Produção mundial de biogás em 2012 e projeções até 2022.	65
Figura 26 – Plantas de purificação de biogás na Europa, em dezembro de 2014.	67

Figura 27 – Plantas de biogás para geração de energia elétrica na Alemanha, 2003 a 2013. ..	69
Figura 28 – Plantas de purificação e injeção de biometano na rede na Alemanha, 2006 a 2014.	70
Figura 29 – Participação das fontes de bioenergia na produção de eletricidade do Reino Unido de 1994 a 2014.....	73
Figura 30 - Plantas de purificação e injeção de biometano na rede no Reino Unido, 2009 a 2015.	74
Figura 31 –Produção de biogás na Suécia, por tipo de planta, 2005 a 2013.	76
Figura 32 – Usos finais do biogás na Suécia em 2009.	77
Figura 33 – Municípios com planos de gestão de resíduos sólidos aprovados em 2013.	87
Figura 34 - Evolução do programa Lixão Zero	91
Figura 35 – Participação das diversas fontes de energia na matriz energética do estado de São Paulo.	93
Figura 36 – Inauguração da Usina de Gás Metano de Belo Horizonte em 1989.	97
Figura 37 – Unidade da Methax em São João da Boa Vista.	98
Figura 38 – Ônibus da frota de transporte coletivo de São João da Boa Vista abastecido com metano.	98
Figura 39 – Consumo de gás natural, por setor, em 2014.	100
Figura 40 – Cadeia de suprimento de gás natural convencional.	101
Figura 41 – Evolução das malhas de transporte e distribuição de gás natural.	103
Figura 42 - Malha de gasodutos de transporte do Brasil, 2014.	104
Figura 43 – Evolução da conversão da frota nacional para GNV.	105
Figura 44 – Evolução dos combustíveis utilizados na frota veicular do município do Rio de Janeiro.....	106
Figura 45 – Projeção do consumo final de gás natural por setor, de 2013 a 2030.	107
Figura 46 – Produção de biometano no Brasil nos cenários estudados, 2015 – 2030.....	113
Figura 47 – Comparação de resultados do Inventário Nacional de Emissão de GEE e da pesquisa.	114
Figura 48 – Comparação dos resultados com estimativas do PNUD.	117
Figura 49 – Potencial de substituição de gás natural por biometano.	118
Figura 50 – Cronologia das proposições de políticas, planos e programas dos setores de energia e saneamento.....	127

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Quadro sinótico das dimensões e condicionantes estudadas.	26
Tabela 2 – Autores considerados a partir da revisão sistemática segundo as dimensões do estudo.....	27
Tabela 3 – Quadro sinótico dos procedimentos metodológicos adotados.....	31
Tabela 4 – Composição química e poder calorífico de diferentes gases.	44
Tabela 5 – Lavagem com água: custos e parâmetros operacionais de interesse.	48
Tabela 6 – Lavagem química: custos e parâmetros operacionais de interesse.....	49
Tabela 7 – PSA: custos e parâmetros operacionais de interesse.	51
Tabela 8 – Separação por membranas: custos e parâmetros operacionais de interesse.	52
Tabela 9 – Produção de energia primária de biogás na Europa por tipo de substrato em 2013, em TJ.	67
Tabela 10 – Metas de redução da fração úmida de resíduos, em %.	81
Tabela 11 – Metas nacionais para exploração do potencial energético de gás de aterro, capacidade instalada em MW.....	82
Tabela 12 – Normas e atos da ANEEL para a promoção do biogás de aterros.....	82
Tabela 13 – Legislação ANP sobre o uso de gás natural, biogás e biometano.	85
Tabela 14 – Legislação fluminense sobre gás natural, biogás, biometano e resíduos sólidos.	89
Tabela 15 – Legislação paulista sobre gás natural, biogás e resíduos sólidos urbanos.	94
Tabela 16 – Participação do gás natural no consumo final, por setor, em 2014.	100
Tabela 17 – Valores padrão utilizados nos cálculos.....	110
Tabela 18 – Destino final de resíduos sólidos urbanos no Brasil, em 1989, 2000 e 2008.	111
Tabela 19 – Cenários considerados para destinação final de resíduos sólidos no Brasil.	111
Tabela 20 – Cenários considerados para separação prévia da fração úmida dos resíduos sólidos urbanos no Brasil.	112
Tabela 21 – Resultados emissão de metano Relatório PNUD e cenários da pesquisa, em milhões m ³ /ano.....	116
Tabela 22 – Características e condicionantes do desenvolvimento do biometano nos países selecionados.....	124
Tabela 23 – Condicionantes da dimensão legal-institucional	128
Tabela 24 – Parâmetros técnicas das principais técnicas de purificação de biogás.	129
Tabela 25 – Condicionantes da dimensão tecnológica.	130

Tabela 26 – Custos das principais técnicas de purificação de biogás.	131
Tabela 27 – Condicionantes da dimensão econômica.	133
Tabela 28 – População brasileira, 1970 a 2030.	159
Tabela 29 – Geração per capita de resíduos sólidos urbanos, 1970 a 2030.	160
Tabela 30 – Porcentagem de coleta de Resíduos Sólidos Urbanos, 1970 a 2030.	160
Tabela 31 – Composição gravimétrica média dos resíduos sólidos urbanos no Brasil.	162
Tabela 32 – Destinação final de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil, Cenário A.	163
Tabela 33 – Destinação final de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil, Cenário B.	164
Tabela 34 – Redução de emissões de GEE pela utilização de gás de aterro.	165
Tabela 35 – Parâmetros do cálculo do fator de emissão de CO ₂ do gás natural.	166
Tabela 36 - Redução de emissões de GEE pela substituição de gás natural por biometano. .	167

LISTA DE SIGLAS

GEE	Gases de efeito estufa
RCE	Redução certificada de emissão
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PL	Projeto de Lei
ANP	Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
MME	Ministério de Minas e Energia
MMA	Ministério do Meio Ambiente
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
PNE	Plano Nacional de Energia
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
UNFCCC	<i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i>
IC	Implementação Conjunta
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
GNC	Gás Natural Comprimido
GNL	Gás Natural Liquefeito
UNEP	<i>United Nations Environment Programme</i>
ISWA	<i>International Solid Waste Association</i>
USEPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
ARSES	Agência Reguladora de Saneamento e Energia do Estado de São Paulo
AGENERSA	Agência Reguladora de energia e Saneamento Básico do Estado do Rio de Janeiro
PNSB	Pesquisa Nacional de Saneamento Básico
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AMJG	Aterro Metropolitano Jardim Gramacho
EGG	Ato das Fontes Renováveis de Energia (do alemão, <i>Erneuerbare-Energien-Gesetz</i>)
SINIR	Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos
COMLURB	Companhia Municipal de Limpeza Urbana do Rio de Janeiro
TMB	Tratamento Mecânico-Biológico
URE	Unidade de Recuperação Energética
COOPCANA	Cooperativa Agrícola Regional de Produtores de Cana
REDUC	Refinaria Duque de Caxias
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	16
1.1. Introdução ao tema da pesquisa.....	16
1.2. Pergunta de pesquisa	21
1.3. Hipótese.....	21
1.4. Objetivos	23
1.5. Relevância	23
1.6. Metodologia.....	24
1.6.1. Revisão de literatura	25
1.6.2. Caracterização da experiência internacional	28
1.6.3. Caracterização do contexto brasileiro.....	29
1.7. Estrutura capitular	32
2. O USO ENERGÉTICO DO METANO OBTIDO DE RESÍDUOS	33
2.1. Contexto	33
2.1.1. O papel do biogás na matriz energética mundial e brasileira	33
2.1.2. As questões climáticas e a nova ressurgência do biogás	37
2.2. O recurso energético biometano – elementos técnicos e tecnológicos	41
2.2.1. Do biogás ao biometano	41
2.2.2. Tecnologia disponível para produção de biometano	44
2.2.2.1. <i>Lavagem com água</i>	46
2.2.2.2. <i>Lavagem química</i>	48
2.2.2.3. <i>Adsorção com modulação de pressão (PSA)</i>	50
2.2.2.4. <i>Separação por membranas</i>	51
2.2.3. Usos finais do biometano e concorrência entre fontes energéticas	53
2.2.4. Considerações sobre modelos de previsão de produção de biogás e biometano	54
2.3. O estímulo ao aumento da participação na matriz energética brasileira – os enfoques setoriais energético e sanitário	56
2.3.1. A visão do setor energético	56
2.3.2. A visão do setor de saneamento	60
2.3.2.1. <i>Estrutura institucional</i>	60
2.3.2.2. <i>Panorama da gestão de resíduos sólidos urbanos no Brasil</i>	62
2.3.2.3. Questões sociais	64

3. EXPERIÊNCIAS INTERNACIONAIS DE INSERÇÃO DE BIOMETANO EM MATRIZES ENERGÉTICAS – PAÍSES SELECIONADOS	65
3.1. Alemanha.....	68
3.2. Reino Unido	72
3.3. Suécia	76
4. CONTEXTO BRASILEIRO PARA O USO DO BIOMETANO.....	79
4.1. Cenário legal e normativo aplicável ao biometano	79
4.1.1. Conjuntura nacional.....	79
4.1.2. Conjuntura legal e normativa regional	86
4.1.2.1. <i>Rio de Janeiro</i>	88
4.1.2.2. <i>São Paulo</i>	93
4.2. Aplicações e perspectivas de expansão da produção e uso do biometano	97
4.3. Potencial de produção de biometano.....	107
5. ANÁLISES E DISCUSSÕES	120
5.1. Considerações sobre as escolhas metodológicas.....	120
5.2. A exploração energética de biometano nos países selecionados.....	121
5.3. O biometano de aterros no Brasil	125
5.3.1. Dimensão legal-institucional	125
5.3.2. Dimensão tecnológica.....	128
5.3.3. Dimensão econômica.....	131
5.3.4. Questões adicionais	133
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FINAIS	135
6.1. Sugestões para estudos futuros.....	137
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	139
APÊNDICE A – Dados utilizados no dimensionamento do potencial brasileiro de produção de biometano.	159
APÊNDICE B – Cálculo da contribuição em termos de redução de emissão de GEE	165
ANEXO A – Resolução ANP N°08/2015	168

1. INTRODUÇÃO

1.1. Introdução ao tema da pesquisa

No passado recente, com a aprovação do Protocolo de Quioto em 1997 e sua posterior ratificação e entrada em vigor em 2005, em meio a uma expectativa, à época, otimista quanto ao mercado de créditos de carbono, a apresentação de projetos de redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE) a partir da coleta e destruição ou utilização do biogás gerado em aterros sanitários parecia bastante promissora. Especificamente no Brasil, tal premissa embutia, por um lado, a possibilidade de alavancar o desenvolvimento das fontes renováveis e não convencionais, principalmente para a geração de eletricidade e, por outro, o fato de que existia (e existe) um grande potencial inexplorado, em termos de aproveitamento de metano proveniente de resíduos sólidos urbanos dispostos em aterros, em função da precariedade da gestão desses resíduos na maioria das cidades brasileiras.

Dessa maneira, nos grandes municípios brasileiros que já contavam com aterros sanitários ou naqueles em que havia condições para a regularização de vazadouros precários, transformando-os em aterros controlados, a implantação destes projetos passava a significar um potencial de receita adicional. Receita que poderia ser apropriada por qualquer ente apto a prestar ou explorar os serviços de limpeza urbana e destinação final de resíduos (concessionárias ou poder público municipal). Porém, a partir de 2009, o ambiente alterou-se diametralmente e, de maneira mais acentuada, a partir de 2011, o “mercado de carbono” perdeu quase totalmente sua atratividade em consequência da redução acentuada no preço das Reduções Certificadas de Emissão (RCEs) (Figura 1).

Figura 1 – Preços das RCEs no mercado internacional entre 2008 e 2013.

Fonte: Thomson Reuters (2013).

Nesse ínterim, a dimensão sanitária da gestão de resíduos sólidos veio, em um contexto de múltiplos interesses e motivos, ganhando protagonismo, que culminou com a promulgação, em 2010, da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Com quase vinte anos decorridos entre sua proposição e sua promulgação, a PNRS representa, ainda assim, um importante avanço na questão sanitária do país. Trata-se de um marco legal que regula, inserida em uma hierarquia da gestão de resíduos, a redução da necessidade de disposição final, baseada em revalorização energética dos resíduos como uma de suas possíveis estratégias. É a partir dele que também se estabelecem instrumentos com a finalidade de estimular e assegurar a implantação de projetos e operação de aterros sanitários em padrões muito superiores à realidade ainda constatada no Brasil.

Um dos instrumentos estabelecidos na PNRS são os planos de resíduos sólidos¹, desenvolvidos nos níveis Nacional, Estaduais e Municipais. Esses planos têm como objetivo a elaboração de diretrizes, estratégias e metas para o cumprimento dos dispositivos da PNRS, além de contribuir para a formação de uma base de dados mais robusta do setor. No entanto, decorrido o prazo para a sua apresentação, estabelecido em 02 de agosto de 2012, e a despeito das sanções decorrentes do atraso, o panorama pouco se alterou. Até o início de 2015, apenas a União, cujo Plano Nacional de Resíduos Sólidos não foi formalmente aprovado por meio de decreto, oito estados, entre eles São Paulo, Rio de Janeiro e Santa Catarina (MMA, 2015) e 1865 municípios (aproximadamente 33% do total) publicaram seus Planos (IBGE, 2014). Em consequência ao não cumprimento de estados e municípios a este requisito da Política, o Congresso Nacional aprovou em julho de 2015, o Projeto de Lei (PL) 425, que postergou os prazos para apresentação dos planos, escalonados em função da densidade demográfica dos estados e municípios, até julho de 2018 (BRASIL, 2014a).

Adicionalmente, a política prevê o encerramento e recuperação dos vazadouros a céu aberto em operação no país. Assim, considerando que o cumprimento desta política poderá incorrer em altos custos referentes à sua implantação, dado o estado de descompasso entre o ideal e o real no cenário dos resíduos sólidos urbanos no país, mais uma vez, o aproveitamento energético dos gases gerados em unidades de disposição final volta a ser uma opção atrativa, no mínimo, para equiparar esses novos custos da gestão do lixo. E, apesar de o Brasil ainda enfrentar problemas sanitários básicos, como falta de universalização do acesso aos serviços e

¹ Segundo artigo 14 da PNRS, correspondem a planos de resíduos sólidos: o Plano Nacional de Resíduos Sólidos, os planos estaduais de resíduos sólidos, os planos microrregionais de resíduos sólidos e os planos de resíduos sólidos de regiões metropolitanas ou aglomerações urbanas; os planos intermunicipais de resíduos sólidos; os planos municipais de gestão integrada de resíduos sólidos; e, os planos de gerenciamento de resíduos sólidos.

escassez de recursos (de humanos a financeiros, passando pelos institucionais), o Plano Nacional de Resíduos Sólidos, reconhecendo a subtilização do biogás nos aterros sanitários em operação atualmente no país, propôs metas específicas para sua utilização enquanto recurso energético (MMA, 2012).

Países como Alemanha, Suécia e Reino Unido, onde o uso do biogás recebeu forte impulso e correspondente crescimento e cuja experiência regional inspirou a PNRS, encontram-se, todavia, em um estágio bastante adiantado em relação ao brasileiro na implantação de arcabouço legal e institucional e apresentam um cenário econômico e tecnológico bastante distinto, no que tange à gestão de resíduos. Esse contexto em parte explica a crescente exploração do biogás para a provisão de serviços energéticos.

Além da diversidade de substratos e tecnologias exploradas por esses países para geração de biogás, tais como captação e tratamento de gás de aterro; biodigestão de resíduos agrícolas, culturas energéticas, lodo de esgoto e outros, uma maior variedade de usos primários e secundários é dada ao biogás. Em adição às aplicações tracionais em geração de eletricidade, calor ou cogeração, coexistem, mais modernamente, a injeção em gasodutos e o uso veicular, economicamente viabilizados a partir do aprimoramento de técnicas de purificação do biogás, originando o que se convencionou denominar biometano (Figura 2).

Figura 2 – Rotas de produção e aplicação do biogás e biometano.

Fonte: a autora a partir de Bordelanne (2011).

* Culturas agrícolas cultivadas com o propósito específico de geração de energia.

O biometano é conceituado como o produto do processamento do biogás e, mais significativo, independentemente do substrato usado para sua obtenção, de tal sorte que seja

equivalente ao gás natural de origem fóssil (ÅHMAN, 2010; BÖRJESSON; AHLGREN, 2012; KOORNNEEF et al., 2013; WALLS, 2013). Tal caracterização é importante pois, ao tornar indiferente a origem do produto e estimular sua padronização, caminha no sentido de possibilitar sua conversão em mercadoria internacional, como ocorre com as *commodities*.

Experiências de sucesso em injeção em rede de distribuição de gás natural e uso veicular de biometano se multiplicam na Europa (FERREIRA; MARQUES; MALICO, 2012). O consumo crescente deste recurso em relação ao gás natural de origem fóssil para uso veicular, registrado na Suécia nos últimos anos, ilustra o avanço alcançado na região (AEBIOM, 2009; FERREIRA; MARQUES; MALICO, 2012). Em 2013, 61% do combustível utilizado na frota movida a gás daquele país correspondeu ao uso de biometano (Figura 3).

Figura 3 - Proporção de biogás e gás natural no setor de transportes na Suécia entre 1995-2014, em TWh.
Fonte: a autora a partir de Swedish Energy Agency (2015)².

No Brasil, a promoção do uso energético do biometano foi colocada para a sociedade, da perspectiva da formulação e implantação de políticas públicas, de forma um tanto otimista, tanto do ponto de vista das ações de mitigação de mudanças climáticas, passando pela gestão da oferta e uso de energia, como do ponto de vista sanitário, tendo como pano de fundo uma apropriação da experiência internacional quanto às ações e resultados obtidos no uso desse

² O joule (J) é a unidade de medida adotada pelo Sistema Internacional de Unidades (SI) para expressar a grandeza energia (INMETRO, 2012, 2013). No entanto, ao longo da presente dissertação, para os dados obtidos de fontes secundárias, optou-se por manter a unidade conforme reportado pelos autores consultados. Especificamente para os dados suecos, todos os dados das diversas fontes e usos finais de energia são reportados em unidades majoritariamente utilizadas para grandezas elétricas (watt e seus múltiplos). Um Watt-hora (Wh) equivale à 3.600J (Joule).

recurso. Diante desse contexto e das distintas realidades existentes no Brasil e nos países onde se buscam referência e inspiração para o desenvolvimento do biometano, torna-se pertinente investigar o potencial para a utilização do biogás de aterro como matéria-prima para a sua produção, com vistas ao uso energético primário no Brasil, as oportunidades e barreiras; em especial, diante da problemática, ainda tão complexa, da gestão dos resíduos sólidos no país.

Uma vez que a gestão adequada de resíduos sólidos urbanos é condição precedente para captação do biogás de aterros sanitários e posterior produção de biometano, a regulamentação e aplicação dos dispositivos previstos na PNRS são importantes para que essa gestão seja mais efetiva no Brasil. Não obstante, as metas propostas em Planos Estaduais de Resíduos Sólidos e a adoção de políticas e programas regionais, observados em estados relevantes da federação, como Rio de Janeiro e São Paulo, que visam o fomento à produção e uso do biometano, podem resultar em um cenário mais promissor em relação ao aproveitamento energético do biometano, incluindo a injeção do biometano na rede de distribuição de gás natural e seu uso como combustível veicular.

Em 2012, ano em que os programas paulista e carioca de fomento ao biometano foram aprovados, projetos como o da planta de purificação de gás de aterro do Aterro Metropolitano Jardim Gramacho (AMJG), bem como outros projetos localizados na região sul do Brasil, envolvendo o aproveitamento energético do biogás obtido a partir da biodigestão de resíduos agrícolas, já estavam em fase de execução e foram apresentados à Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) (CALDEIRA, 2013). No entanto, até o início de 2015, segundo entendimento de empreendedores e instituições governamentais, as especificações das propriedades físico-químicas do biometano, exigidas para sua comercialização, eram baseadas nos ditames da Resolução ANP nº 16/2008³, que regula apenas o gás natural de origem fóssil (ANP, 2008). Essa interpretação não foi corroborada pela ANP, que no início daquele ano, aprovou a Resolução ANP nº 8/2015, a qual determina as especificações exclusivas para utilização e comercialização do biometano (ANP, 2015a).

Assim, o problema de pesquisa está relacionado ao cenário que atualmente se apresenta no Brasil para a promoção do biometano produzido a partir do gás de aterro como fonte energética – com ênfase em injeção na rede de distribuição de gás natural e uso veicular –, diante da

³ Ver entendimento presente em Nota Técnica da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a qual se refere ao biometano como substituto do gás natural, já que atenderia às especificações da Resolução ANP nº 16/2008 (EPE, 2014c), bem como Nota Técnica elaborada pela ANP e disponibilizada no momento das consultas públicas realizadas para a aprovação da Resolução ANP nº 8/2015 (CALDEIRA, 2013).

tentativa de emular as condições internacionais, realizando uma espécie de *leapfrogging*⁴. Trata-se de avaliar se há uma subestimação da realidade nacional e seus problemas nesta “transposição”, o que é especialmente relevante no caso do biometano, dada a origem de sua matéria-prima - os resíduos sólidos urbanos aterrados - e as contingências de sua gestão, além das significativas distinções quanto à condução de políticas públicas nos setores de saneamento e de energia no Brasil.

1.2. Pergunta de pesquisa

Tomando as características da experiência histórica de países selecionados no êxito do uso veicular e injeção do biometano na rede convencional de distribuição de gás natural como pano de fundo, em relação ao contexto apresentado no tópico anterior, essa dissertação propõe como pergunta de pesquisa: se existem, quais são os atributos positivos (oportunidades) e negativos (barreiras) apresentados hoje pelo Brasil para o desenvolvimento do biometano produzido a partir do gás de aterro como fonte de energia, nas dimensões legal-institucional, econômica e tecnológica?

1.3. Hipótese

As crises energéticas decorrentes das oscilações do preço do petróleo observadas nas décadas de 1970 e 1980 obrigaram muitas nações importadoras desse recurso a buscarem fontes alternativas que garantissem seu suprimento de energia, e, nesse cenário, a experiência europeia em explorar a energia obtida através da combustão de resíduos sólidos para geração de calor

⁴ *Leapfrogging* consiste na apropriação de uma nova prática mais avançada em detrimento da anterior que seja consolidada e de uso mais difundido. Um exemplo clássico deste processo é a adoção, por países em desenvolvimento, de aparelhos telefônicos móveis em substituição à implantação de uma rede de telefonia fixa (FONG, 2009; GALLAGHER, 2006; GOLDEMBERG, 1998). Especificamente para o setor de energia, Goldemberg (1998) discorre sobre os benefícios ambientais e econômicos decorrentes da adoção de tecnologias mais avançadas, como a redução na emissão de poluentes e menor consumo de matérias-primas com consequente diminuição da degradação ambiental e promoção da eficiência energética.

foi apropriada, contribuindo para que o conceito de *waste-to-energy*⁵ fosse disseminado mundialmente (UNEP, 2005).

Simultaneamente, o problema da gestão de resíduos sólidos urbanos no hemisfério norte – decorrente da sua geração crescente e desmesurada - levou à necessidade de valorização destes resíduos para reinserção no processo produtivo, pois havia uma redução de disponibilidade de áreas para destinação final e um consumo elevado de recursos naturais, cada vez mais caros. Nesse processo, ocorreu a (re)constatação de que resíduos possuem conteúdo energético e, com isso, um novo potencial de mercado, em especial nos setores energético e ambiental, foi aberto.

O recrudescimento das questões em torno da mudança climática forneceu um elemento econômico adicional para a “redescoberta” e difusão do uso energético, em escala comercial, de resíduos sólidos urbanos e seus derivados, entre os quais, o biogás extraído de aterros sanitários e, posteriormente, o biometano. Assim, ao longo de um processo histórico e social, marcado por pressões econômicas e comerciais, um novo modelo, “renovável”, de matriz energética se disseminou no planeta, no qual este insumo – biometano originário de resíduos – vem sendo promovido. Por força dessas relações, esse modelo, amparado em uma base político-conceitual que lhe dá legitimidade, chegou, em um processo exógeno, também ao Brasil.

Nesse contexto, a hipótese geral deste trabalho é que, apesar das perspectivas de sucesso que podem existir para o aproveitamento energético do biometano produzido a partir de gás de aterros no Brasil, em termos técnicos, econômicos e como agente propulsor da melhora da prestação dos serviços de saneamento básico, a partir da implantação de programas específicos destinados a promover sua maior exploração, qualquer avanço pode ser limitado, ou até postergado, por condições como a precária gestão de resíduos sólidos urbanos no país, manifestas na falta de aplicação das políticas, planos e programas governamentais, e no descompasso e ausência de integração observados entre as políticas energéticas e sanitárias vigentes. Por isso, este trabalho buscará explorar as oportunidades e barreiras existentes na exploração do biometano de gás de aterros no Brasil, analisando as condições específicas nas quais seu desenvolvimento tem se baseado, a partir da investigação de questões e perspectivas que tem cercado este processo nos últimos anos, nos setores energético e de saneamento.

⁵ A expressão *waste-to-energy* compreende qualquer processo de tratamento primário de resíduos sólidos com o objetivo de geração de energia elétrica, térmica ou combustíveis como o metano. Exemplos desses processos são a gaseificação, digestão anaeróbica, metanização, pirólise, entre outros.

1.4. Objetivos

O objetivo geral deste trabalho consiste em levantar as condicionantes, oportunidades e barreiras existentes ao emprego e consolidação do biometano produzido a partir do gás de aterro como um recurso energético viável, enfocando sua injeção na rede convencional de distribuição e seu uso veicular, como substituto ou complementar ao do gás natural de petróleo, no Brasil.

Os objetivos específicos incluem:

- Caracterização do uso energético do biometano produzido através da exploração do gás de aterro no cenário internacional, a partir da experiência verificada em países que ocupem posição de destaque na produção deste recurso;
- Levantamento do contexto nacional a partir da análise das possíveis implicações decorrentes da adoção de técnicas que visem o aproveitamento energético dos gases gerados em aterros sanitários, conforme expresso na Política Nacional de Resíduos Sólidos, da regulação do setor de energia e das condições de mercado que apresentem influência na inserção do biometano produzido a partir de gás de aterros neste cenário;
- Avaliação das políticas de incentivo ao uso do biometano dos estados de São Paulo e Rio de Janeiro, bem como de sua integração com os planos elaborados por estes estados para o setor de resíduos sólidos urbanos e energia; e,
- Elaboração de análises e reflexões sobre o potencial do uso do biometano de gás de aterros no Brasil, diante das condicionantes observadas no contexto nacional, tendo como apoio as observações resultantes do levantamento da exploração de biometano de gás de aterro nos países selecionados.

1.5. Relevância

No momento em que uma política nacional é promulgada para tratar da gestão de resíduos sólidos no país e que o discurso da diversificação energética é amplamente difundido no Brasil, torna-se importante conhecer mais profundamente o teor das propostas que surgem com um forte cunho “modernizante”. Atualmente, o aproveitamento energético dos gases gerados em unidades de disposição final para a produção de biometano, surgem como mais uma dessas

propostas, mas, ao mesmo tempo, encontram um enorme contingente de municípios sem recursos e graves problemas sanitários e sociais, bem como um mercado de gás natural ainda em seus primeiros estágios de desenvolvimento.

Assim, a relevância deste trabalho consiste em investigar e avaliar a inserção do biometano produzido a partir do gás de aterros de resíduos sólidos a fim de verificar como se afiguram as possibilidades de seu desenvolvimento como recurso energético no momento atual brasileiro, partindo da observação do contexto internacional e comparando, ao país e entre si, dois casos regionais (estados do Rio de Janeiro e São Paulo).

1.6. Metodologia

Esta é uma pesquisa exploratória, a qual, segundo Severino (2007), tem como objetivo o levantamento de informações sobre um determinado objeto (produção e uso energético – veicular e injeção em rede convencional de distribuição - do biometano produzido a partir do biogás extraído de aterros de resíduos sólidos urbanos no Brasil), delimitando um campo de trabalho a fim de mapear as condições de manifestação deste objeto. A abordagem será predominantemente qualitativa, com realização de algumas análises quantitativas, desenvolvida em diferentes etapas que consistiram em realizar um levantamento das dimensões tecnológica, legal-institucional e econômica que delimitaram o campo de trabalho.

É necessário fazer uma importante ressalva quanto ao objeto de estudo, já que a produção de biometano é tema recente no Brasil. Como mencionado, o biogás não somente pode ser obtido de diferentes tipos de substrato, como também é um produto da aplicação de várias rotas tecnológicas de conversão da biomassa em energia. Especificamente no tratamento de resíduos sólidos urbanos, essas rotas podem ser agrupadas em processos de conversão bioquímica, como a compostagem, tratamento mecânico-biológico e digestão anaeróbica, ou conversão térmica, como a pirólise, gaseificação e combustão direta (SIMAS et al., 2014; UNEP, 2005). O biogás é um produto dos processos de degradação da matéria orgânica em ambientes com ausência de oxigênio, que pode resultar de processos como a digestão anaeróbica conduzida em biodigestores ou em decorrência da disposição de resíduos sólidos em aterros sanitários. A presente pesquisa é restrita à produção de biometano a partir do biogás extraído de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos que, apesar de também ser gerado em condições de

ausência de oxigênio, à semelhança dos processos que ocorrem nos biodigestores, apresenta características que o distinguem em relação ao biogás obtido nos demais processos, como concentração de metano e presença de contaminantes. A Figura 4 representa graficamente o recorte metodológico com relação ao objeto de estudo.

Figura 4 – Recorte metodológico do objeto de estudo da pesquisa.

Fonte: a autora.

* *Processos que envolvem recuperação energética dos resíduos (waste-to-energy).*

1.6.1. Revisão de literatura

Algumas das técnicas empregadas em revisões sistemáticas de literatura⁶ foram adotadas para a apropriação inicial dos dados utilizados na pesquisa. Seu uso é justificado uma vez que a sistematização assegura que estudos recentes e relevantes sobre o tema da pesquisa sejam capturados, garantindo, assim, que as publicações analisadas apresentem forte aderência ao objeto de pesquisa (OKOLI; SCHABRAM, 2010). Os artigos que foram selecionados correspondem aqueles que contribuíam com as informações necessárias para a caracterização das dimensões legal-institucional, tecnológica e econômica.

A caracterização da dimensão legal-institucional buscou identificar a regulação específica

⁶ Segundo Sampaio e Mancini (2007, 84p.) a revisão sistemática de literatura corresponde à uma “forma de pesquisa que utiliza como fonte de dados a literatura sobre determinado tema”.

sobre a produção de biometano a partir de gás de aterro, nos setores energético, sanitário e econômico, que tratasse de questões relativas a produção, especificações técnicas, bem como confiabilidade no suprimento, tarifação ou tributo. Os aspectos relacionados à dimensão tecnológica abrangem o detalhamento das técnicas adotadas na produção do biometano, levantamento das principais características das técnicas consideradas (rendimento, consumo de energia, entre outros), usos finais mais relevantes do biometano e infraestrutura utilizada, ou necessária, para a sua distribuição. Por fim, uma ilustração dos custos estimados e principais mecanismos de incentivo para a produção do biometano foram identificados e são discutidos na análise da dimensão econômica. A Tabela 1 explicita os itens analisados durante a investigação de cada uma das dimensões pesquisadas.

Tabela 1 – Quadro sinótico das dimensões e condicionantes estudadas.

Dimensão	Aspecto
Legal-institucional	<ul style="list-style-type: none"> • Regulação econômica: tarifação e tributos; • Regulação sanitária: orientações quanto ao tratamento de resíduos sólidos urbanos; • Regulação energética: especificações técnicas e confiabilidade do suprimento, restrições à produção de biometano a partir de gás de aterro.
Tecnológica	<ul style="list-style-type: none"> • Técnicas empregadas na purificação de biogás de aterro: identificação e detalhamento de rendimento, consumo de energia, etc.; • Distribuição de biometano: infraestrutura utilizada para o transporte e distribuição; • Usos finais priorizados (se existir) e mais relevantes
Econômica	<ul style="list-style-type: none"> • Mecanismos de incentivo, • Custos estimados para a purificação do biogás de aterro.

Fonte: a autora.

Para Fink⁷ (2005 *apud* OKOLI; SCHABRAM, 2010), os principais atributos da revisão sistemática são a presença de uma abordagem metodológica clara, procedimentos explícitos e escopo claramente delineado de maneira que outros possam reproduzi-la. Para sua condução, alguns dos itens incluídos no protocolo de pesquisa proposto por Sampaio e Mancini (2007) foram considerados, quais sejam: as bases de dados utilizadas para a seleção dos textos considerados na revisão, os critérios que definirão se uma publicação será ou não considerada na revisão e a presença de dados e análises de interesse.

A partir da pergunta de pesquisa (*“Se existem, quais são os atributos positivos (oportunidades) e negativos (barreiras) apresentados hoje pelo Brasil para o desenvolvimento*

⁷ Fink, A. **Conducting Research Literature Reviews: From the Internet to Paper 2^a ed.** Thousand Oaks: Sage Publications, 2005.

do biometano produzido a partir do gás de aterro como fonte de energia, nas dimensões legal-institucional, econômica e tecnológica?”), as publicações foram pesquisadas através da base de dados *Science Direct*, plataforma de publicação artigos e periódicos da editora Elsevier. A pesquisa foi feita no idioma inglês, para publicações que contivessem em qualquer um de seus campos, as palavras “*biomethane*” E “*landfill gas*”, publicadas no período de 2005 até a data da busca, realizada no início de julho de 2015. As palavras-chave pesquisadas refletem o objeto de estudo, que é o biometano (no nível principal) produzido a partir de gás de aterros (em um segundo nível), enquanto o recorte temporal de 10 anos, que corresponde ao padrão sugerido pela ferramenta de busca do Science Direct, foi considerado apropriado, uma vez que o objetivo da pesquisa é identificar os avanços mais recentes na utilização do biometano produzido a partir de aterros. No total, 330 publicações foram recuperadas a partir base de dados considerada.

Os critérios de seleção foram definidos segundo as considerações de Quivy e Campenhoudt (2005). Para estes autores, as publicações selecionadas devem estar relacionadas com a pergunta de partida e devem, em seu conjunto, apresentar uma abordagem metodológica diversa entre si, elementos de análise e interpretação e não somente dados. Em uma primeira leitura dos títulos, resumos e palavras-chave, as publicações que tratavam da digestão anaeróbica em reatores para substratos diferentes de aterros sanitários foram desconsideradas. Posteriormente, foram eliminados aqueles artigos que não apresentavam conexão explícita com as dimensões consideradas para a condução da pesquisa. Por fim, apenas publicações com acesso permitido a partir da consulta da Universidade de São Paulo e artigos publicados em *journals* foram considerados.

Ao final desta etapa, 42 artigos foram selecionados para consulta, dos quais 15 apresentavam informações e dados relevantes e foram, portanto, utilizados como fonte de informação no desenvolvimento inicial da pesquisa. A Tabela 2 apresenta os artigos que foram considerados agrupados conforme as dimensões estudadas.

Tabela 2 – Autores considerados a partir da revisão sistemática segundo as dimensões do estudo.

Dimensão	Principais autores consultados
Legal-institucional	Börjesson e Ahlgren (2012), Ferreira, Marques e Malico (2012), Patterson et al. (2011) e Poeschl, Ward e Owende (2010)
Tecnológica	Åhman (2010), Deng e Hägg (2010), Läntelä et al. (2012), Makarul, Miltner e Haresek (2010), Patterson et al. (2011), Rasin, Läntelä e Rintala (2011, 2014), Ryckebosch, Drouillon, Vervaeren (2011), Salomon e Silva Lora (2009), Starr, Willalba e Gabarrel (2015), Sun et al. (2015) e Yang et al. (2014)

continua...

continuação

Tabela 2 – Autores considerados a partir da revisão sistemática segundo as dimensões do estudo.

Dimensão	Principais autores consultados
Econômica	Åhman (2010), Börjesson, Ahlgren (2012), Ferreira, Marques e Malico (2012), Poeschl, Ward e Owende (2010) e Sun et al. (2015)

Fonte: a autora.

1.6.2. Caracterização da experiência internacional

O histórico recente de desenvolvimento da exploração biometano a partir de gás de aterros foi estudado com o objetivo de identificar os países que apresentam posição de destaque no cenário internacional na exploração desse recurso. De acordo com a revisão de literatura, a Europa foi identificada como a região mais representativa em termos de utilização de biogás e produção de biometano. Esta constatação pode ser feita tanto a partir dos dados apresentados em artigos consultados, quanto através da análise da afiliação dos autores. Dos 15 artigos selecionados a partir da revisão sistemática de literatura e tomados em consideração na obtenção de informações, 13 foram executados por autores afiliados a instituições Europeias, ou analisavam o contexto de utilização do biogás na região.

Para selecionar os países que foram estudados em profundidade, foram verificados os dados estatísticos disponibilizados em meio eletrônico pelo Projeto EurObserv'ER, que divulga informações sobre o uso de fontes renováveis de energia nos países membros da União Europeia. Desde 2010, o projeto publica documentos que contemplam análises da exploração do biogás na região, intitulados de Barômetros do Biogás (do inglês, *Biogas barometers*).

Através da análise dos dados apresentados no Barômetros do Biogás, foram selecionados três (3) países, segundo os critérios destacados abaixo:

- *Alemanha*: concentra a maior quantidade de plantas de produção e purificação de biogás para injeção da rede de gasodutos da Europa;
- *Reino Unido*: maior produtor de energia a partir de gás de aterros sanitários da Europa, apesar de as poucas plantas de biometano existentes utilizarem outros substratos; e,
- *Suécia*: frequentemente mencionado como caso de sucesso no uso do biometano como combustível veicular, é o país que conta com o segundo maior número de

plantas de purificação de biogás, após a Alemanha.

Após feita a seleção dos países e em complementação aos artigos obtidos na revisão bibliográfica, documentos emitidos por suas agências de energia foram consultados para melhor caracterizar o cenário atual da produção de biometano a partir de gás de aterro. Referências às agências e documentos consultados são apresentadas no Capítulo 3, que discorre sobre as experiências de inserção do biometano nas matrizes energéticas dos países selecionados.

1.6.3. Caracterização do contexto brasileiro

O cenário atual brasileiro em relação à produção e uso do biometano foi caracterizado em termos de regulação dos setores de energia e saneamento, aplicações, potencial de produção, e perspectivas futuras, levando-se em consideração as dimensões e condicionantes apresentadas anteriormente. Além do contexto nacional, as visões expressas no planejamento energético e de saneamento dos estados do Rio de Janeiro e São Paulo, com relação às suas premissas e indicações em relação ao uso do biometano, foram avaliadas. Esses dois estados foram selecionados uma vez que, no momento de delineamento inicial da pesquisa, em 2013, já contavam com regulamentações específicas para a promoção do biometano, conforme indicado no capítulo introdutório.

Como resultado da revisão sistemática de literatura, apenas um estudo brasileiro sobre a exploração do biogás foi selecionado. O trabalho desenvolvido por Salomon e Silva Lora (2009), apresenta o potencial de geração de eletricidade a partir do biogás obtido de diferentes substratos. Assim, para que fosse possível construir o cenário atual brasileiro e regional, para os casos de São Paulo e Rio de Janeiro, informações e dados relacionados ao uso do biogás e do biometano, principais substratos e usos finais bem como as regulações específicas, caso existissem, foram consultadas em bases de dados disponíveis em meio eletrônico do Ministério de Minas e Energia (MME), Ministério do Meio Ambiente (MMA), Empresa de Pesquisa Energética (EPE) e das agências reguladoras de eletricidade (Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL) e biocombustíveis (ANP), Assembleia Legislativa do Estado de São Paulo (ALESP) e Assembleia Legislativa do Estado do Rio de Janeiro (ALERJ), além de notícias veiculadas em mídia eletrônica e a experiência profissional da autora.

Para as análises do setor de saneamento, em adição às Pesquisas de Saneamento conduzidas

pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), foram estudadas a PNRS, o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (versão disponibilizada para consulta pública e versão final pendente de aprovação por decreto), os Planos de Resíduos Sólidos dos estados do Rio de Janeiro e São Paulo.

O potencial máximo de produção de biometano a partir de gás de aterros foi estimado a partir da emissão potencial de metano de unidades em disposição final de resíduos (aterros sanitários e controlados), com resultados obtidos para o período de 2015 a 2030. Este recorte temporal para a apresentação dos dados foi considerado apropriado uma vez que se inicia na data em que os Planos de Gestão de Resíduos, e, portanto, as metas com relação à exploração de biogás, deveriam ter sido firmadas, e termina no horizonte de planejamento considerado pelo governo, conforme estabelecidas no Plano Nacional de Energia 2030 (PNE2030), ainda em vigor.

As disposições da PNRS com relação ao encerramento de lixões e separação prévia ao aterramento da matéria orgânica presente nos resíduos sólidos urbanos tem influência direta na produção de biogás em aterros, conforme discutido mais adiante. Deste modo, optou-se por realizar a projeção futura do potencial máximo de produção de biometano considerando dois possíveis cenários que compreendessem a influência dessas duas disposições.

O Cenário A considera que os objetivos da PNRS teriam sido cumpridos em 2015, ou seja, os lixões em operação no país teriam sido encerrados e a separação prévia da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos seria realizada conforme as metas estabelecidas no Plano Nacional de Resíduos. Em oposição, o Cenário B assume a manutenção da situação atual de gestão dos resíduos sólidos observada no país, ou seja, continuação da disposição de grande parte dos resíduos sólidos urbanos em lixões, com redução gradual até 2030 até que a diretriz da PNRS seja atingida, e não execução da prévia da matéria orgânica no horizonte considerado.

O Método de Decaimento de Primeira Ordem, proposto pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (do inglês, *Intergovernmental Panel on Climate Change* – IPCC) foi utilizado para o dimensionamento da disponibilidade de biogás de aterros sanitários no Brasil. Considerações sobre a escolha do método utilizado são apresentadas na seção 2.2.4. *Considerações sobre modelos de previsão de produção de biogás e biometano*. O detalhamento das variáveis, dados e fontes de informação utilizadas no cálculo, bem como a justificativa e descrição completa dos Cenários elaborados, constam da seção 4.3 *Potencial de produção de biometano*.

Os resultados obtidos nessa pesquisa para o potencial de produção de biogás em locais de

disposição final de resíduos foram então comparados com os dados apresentados em outros dois estudos que também foram conduzidos em nível nacional. O primeiro estudo utilizado como comparação foi o inventário nacional de emissões GEE do setor de resíduos preparado pela CETESB que subsidiou a formulação e encaminhamento da política nacional de mudança do clima (ALVES; VIEIRA, 2010).

O outro estudo considerado foi conduzido pelo Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD), e seus resultados foram considerados na determinação das metas relacionadas ao aproveitamento energético do biogás gerado em aterros estabelecidas no pelo Plano Nacional de Resíduos Sólidos e pela EPE no inventário do aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos e nos estudos de demanda do PNE2050 (PNUD; MMA; ARCADIS TETRAPLAN, 2010).

Por fim, a partir dos resultados obtidos para a análise do contexto nacional, as condicionantes manifestadas em cada uma das dimensões estudadas, bem como a integração entre essas condições e dimensões, foram então classificadas enquanto oportunidades e barreiras. A não necessidade ou pouca necessidade de aprimoramento da condição avaliada foi definida como oportunidade, enquanto as barreiras consistiram na ausência de determinada condição, ou pouca necessidade de aperfeiçoamento da condição identificada.

A Tabela 3 apresenta de maneira resumida os procedimentos metodológicos adotados na condução da revisão sistemática de literatura e caracterização dos cenários internacional e nacional relacionados ao objeto da pesquisa, bem como os resultados obtidos a partir de sua aplicação.

Tabela 3 – Quadro sinótico dos procedimentos metodológicos adotados.

Etapas		“Resultados”
Revisão Sistemática de Literatura	<ul style="list-style-type: none"> • Base de dados: Science Direct • Palavras-chave: “<i>biomethane</i>” e “<i>landfill gas</i>” • Horizonte: 2005 – 2015 	<ul style="list-style-type: none"> • 330 > 42 > 15 • 13 UE
Caracterização experiência internacional	<ul style="list-style-type: none"> • Europa 60% biogás em 2012 • EurObserv’ER 	<ul style="list-style-type: none"> • Países selecionados: <ul style="list-style-type: none"> – Alemanha – Reino Unido – Suécia • Agências de energia
Caracterização cenário nacional	<ul style="list-style-type: none"> • Análise documental setores energético e de saneamento • Estimativa do potencial de produção de biometano 	<ul style="list-style-type: none"> • Panorama biogás de RSU nas dimensões consideradas • Cenários para o potencial de produção de biometano

Fonte: a autora.

1.7. Estrutura capitular

A dissertação está organizada em seis capítulos. A introdução ao tema e a apresentação da questão de pesquisa, bem como os objetivos, hipótese e escolhas metodológicas são apresentadas neste capítulo, introdutório. O Capítulo 2 discute os processos de exploração do biogás, em uma perspectiva histórica, no mundo e no Brasil, levando-se em consideração aspectos regulatórios, de gestão e planejamento, e como se desenvolveu o processo de exploração de biometano, com ênfase em sua produção a partir de resíduos sólidos urbanos.

O Capítulo 3 apresenta o levantamento da experiência internacional de uso do biogás e, mais especificamente, do biometano, com destaque às experiências registradas na Alemanha, Reino Unido e Suécia. Já o Capítulo 4, o estágio atual de exploração de biogás, especialmente de aterros sanitários, no Brasil é apresentado a partir de elementos semelhantes aos levantados no Capítulo 3 para o cenário internacional. Também neste capítulo são apresentados o marco regulatório de interesse específico à exploração de biometano a partir de gás de aterros, o potencial estimado de sua produção no Brasil e o estudo dos Planos Estaduais de Resíduos Sólidos do Rio de Janeiro e de São Paulo bem como a política e programa de fomento ao uso do biometano destes estados, respectivamente.

Tendo como pano de fundo o levantamento conduzido nos capítulos anteriores, o Capítulo 5 apresenta a confrontação das experiências internacional e nacional levantadas para identificação do cenário atual e perspectivas futuras de desenvolvimento da exploração do biometano a partir de gás de aterros no Brasil, baseadas na classificação das condicionantes estudadas enquanto oportunidades ou barreiras. O Capítulo 6 apresenta as conclusões formuladas a partir da verificação do cumprimento dos objetivos propostos e da confirmação da hipótese inicialmente delineada, bem como aponta sugestões para trabalhos futuros a partir do levantamento de questões não foram tratadas nesta pesquisa.

2. O USO ENERGÉTICO DO METANO OBTIDO DE RESÍDUOS

2.1. Contexto

2.1.1. O papel do biogás na matriz energética mundial e brasileira

Nos últimos anos, a intensificação do desenvolvimento e uso de fontes alternativas de energia promoveu uma alteração na matriz energética mundial, a qual passou a contemplar de maneira mais significativa as fontes renováveis, que correspondiam, em 2013, a 19,1% do consumo final de energia mundial, dos quais os biocombustíveis, representaram apenas 0,8% (Figura 5).

Figura 5 – Proporção de energia renovável no consumo final mundial em 2013.

Fonte: adaptado de REN21 (2015).

Segundo Raboni e Urbini (2014), a produção mundial de biocombustíveis é majoritariamente composta por bioetanol e biodiesel e, em 2011, o biogás representou 0,25% do total de biocombustíveis produzidos no mundo, sendo que 60% foi produzido na Europa. Dado o destaque europeu, os autores destacam o papel fundamental das políticas governamentais no incremento da produção do biogás, uma vez que, desde 2000, diversas

regulações elaboradas especificamente para o setor de resíduos foram implementadas na região visando a diminuição, ou até mesmo, em alguns países, o banimento do aterramento de resíduos e a promoção do uso de energias renováveis.

Em complemento, Ferreira, Marques e Malico (2012) argumentam que com o passar do tempo, o setor de biogás na Europa mudou o seu objetivo primordial de tratamento de resíduos para a produção de energia, e destacam o ano de 2007 como um marco para a produção de biogás na região, uma vez que o gás de aterro, a partir de então, deixou de ser uma fonte relevante. Como se observa na Figura 6, de 2008 a 2013, outros substratos ganharam maior destaque para a produção de biogás quando comparados com a quantidade produzida por aterros e lodo de esgoto na Europa (que permaneceram praticamente estáveis, potencialmente indicando o atingimento de um ponto de saturação).

Figura 6 – Substratos utilizados para a produção de biogás na União Europeia, 2008 - 2013.

Fonte: a autora a partir de Eurobserv'er (2010, 2012, 2014).

* *Outros correspondem às unidades agrícolas de produção de biogás, digestores centralizados e unidades multiprodutos e plantas de metanização de resíduos sólidos.*

A produção de eletricidade, em sistemas de cogeração ou não, é o principal uso final do biogás na Europa, seguido do aquecimento distrital e autoprodução de calor utilizado em processos produtivos (Figura 7).

Figura 7 – Usos finais do biogás produzido na Europa, em termos de energia final.

Fonte: a autora a partir de Eurobserv'er (2014).

O uso de tecnologias de geração de energia a partir de fontes renováveis, apesar de, geralmente, apresentarem elevados custos de iniciais de investimento durante a fase em que estão sendo introduzidas, apresenta benefícios secundários que, segundo Sims *et al.* (2007) nem sempre são internalizados. Segundo os autores, oportunidades de novos empregos podem ser criadas em diferentes níveis, desde a pesquisa até a fabricação, distribuição e instalação de equipamentos. Em 2014, um levantamento conduzido pela IRENA (do inglês, *International Renewable Energy Agency*) demonstrou que, mundialmente, 7,7 milhões de pessoas trabalharam direta ou indiretamente no setor de energias renováveis (Figura 8) (IRENA⁸ apud REN21, 2015).

⁸ IRENA – *International Renewable Energy Agency*. Renewable Energy and Jobs – Annual Review 2015. IRENA: Abu Dhabi, 2015. Disponível em <www.irena.org/publications/rejobs-annual-re-view-2015.pdf>.

Figura 8 – Empregabilidade do setor de energia renovável por tecnologia.
Fonte: IRENA (2015).

Em relação aos impactos sociais decorrentes da ampliação da indústria do biogás, SCOPE (2015) destaca a importância do biogás para comunidades rurais, especialmente em países em desenvolvimento, como China e Índia, regiões em que ações dos governos locais visando reduzir as barreiras financeiras foram essenciais, na visão do autor, e resultaram na implantação de mais de 40 milhões de digestores domésticos na China e 4 milhões de digestores domésticos na Índia. FNR (2013) apresenta a contribuição da indústria do biogás na criação de empregos, que na Alemanha foi responsável pela criação de 50.000 postos de trabalho em 2012.

No Brasil, a utilização energética do biogás, enquanto oferta descentralizada de energia, foi pouco incentivada através de ações governamentais que visassem diminuir as barreiras financeiras existentes e fomentar sua expansão, o que segundo os autores, pode ser atribuído ao elevado uso da hidroeletricidade no país (SCOPE, 2015). Para Kunz e Oliveira (2006), os programas governamentais implantados no Brasil entre as décadas de 1970 e 1980 com o objetivo de facilitar a utilização da biodigestão para a produção de energia no ambiente rural não obtiveram êxito por uma série de fatores como a falta de conhecimento técnico para a operação dos equipamentos, elevados custos de implantação e manutenção, falta de equipamentos desenvolvidos especificamente para operar com biogás, o que acarretou baixa durabilidade dos equipamentos adaptados e pouca competitividade em termos econômicos com outras fontes de energia (eletricidade e Gás Liquefeito de Petróleo - GLP).

Bley Jr. *et al.* (2009) reforçam a falta de incentivos governamentais para a promoção da geração de energia a partir de resíduos agrícolas apontando que, desde o final da década de 1970, poucos projetos se mantiveram operacionais. No entanto, a utilização do biogás para fins

energéticos, aplicado em projetos de maior escala, foi fortemente impulsionada no Brasil pela adoção do Protocolo de Quioto (IPEA, 2012). A partir desse evento, o uso do biogás foi baseado especialmente na geração de eletricidade, cuja capacidade instalada era de aproximadamente 71 MW em 2015, representando 0,05% da matriz de eletricidade do país (Figura 9).

Figura 9 – Matriz de oferta de energia elétrica brasileira em 2015 – Capacidade instalada (%).
Fonte: a autora a partir de ANEEL (2015a).

2.1.2. As questões climáticas e a nova ressurgência do biogás

A exploração energética do metano obtido a partir da degradação anaeróbica da matéria orgânica já é conhecida e dominada pelo homem desde a antiguidade. Segundo Bond e Templeton (2011), existem indícios da utilização do biogás em civilizações antigas (Assíria e China), registros mais recentes de sua produção, a partir da digestão anaeróbica da biomassa, na Nova Zelândia e Índia, e de seu uso para iluminação pública na Inglaterra, já no final do século XIX, além de diversas iniciativas conduzidas ao longo do século XX, como a injeção de biogás em gasodutos na Alemanha em 1920.

No entanto, para estes autores, o grande impulso para a utilização do biogás ocorreu devido à elevação do preço do petróleo, durante as crises observadas na década de 1970, as quais favoreceram a pesquisa e desenvolvimento de fontes alternativas de energia. A influência das crises do petróleo na apropriação do biogás enquanto recurso energético também é destacada

por Alves (2000), para quem os inúmeros desastres ambientais registrados ao longo do século passado também contribuíram para que, concomitantemente, variados fóruns globais discutissem a necessidade do aumento da utilização de fontes renováveis como alternativa ao modelo vigente à época, predominantemente baseado em combustíveis fósseis, impulsionando consequentemente, dentre todas as opções, o uso do biogás.

A partir da realização da Conferência das Nações Unidas sobre o Ambiente Humano, realizada em Estocolmo em 1972, a agenda ambiental voltada a questões relacionadas às mudanças climáticas ganhou destaque nas negociações internacionais, à medida em que estudos alertaram para a intensificação do fenômeno do aquecimento global, em grande parte atribuídos à ações antrópicas, e de maneira mais acentuada, ao uso de combustíveis fósseis (ALVES, 2000).

Em 1992, e, portanto, relativamente pouco tempo depois da Conferência de Estocolmo, diversos países concordaram com a criação de um acordo que tratasse da prevenção da interferência prejudicial das ações humanas sobre o clima, a Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças do Clima (do inglês, *United Nations Framework Convention on Climate Change* - UNFCCC), que entrou em vigor a partir de 1994.

No âmbito da UNFCCC, em 1997, foi assinado um acordo batizado de Protocolo de Quioto, cidade onde foi realizada a conferência, no qual os países desenvolvidos, agrupados no Anexo I do acordo, com base no princípio das “responsabilidades comuns, porém diferenciadas”, se comprometeram com metas para a redução das emissões de GEE, entendidos como a principal causa da intensificação do aquecimento global. As metas, em média, significavam uma redução de 5% das emissões registradas em 1990 (ano base) (UNFCCC, 2014).

Com o objetivo de atingir as reduções de emissão assumidas nas metas firmadas pelos países Anexo I, o Protocolo de Quioto adotou três mecanismos de flexibilização: o comércio de emissões - mecanismo de incentivo baseado no mercado; a Implementação Conjunta (IC), e o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) – ambos mecanismos de incentivo baseados na implantação de projetos. As iniciativas desenvolvidas no âmbito da IC e do comércio de emissões ocorrem entre países desenvolvidos compreendidos do Anexo I do Protocolo de Quioto, enquanto o MDL é de interesse particular dos países em desenvolvimento, nações não incluídas no Anexo I do Protocolo, como o Brasil (ICLEI, 2009).

O MDL prevê a emissão de RCEs em favor de projetos localizados em países em desenvolvimento que são então negociadas com países do Anexo I do Protocolo, com o objetivo

de cumprirem com as metas determinadas para redução de emissão de GEE (MCTI, 2014a). Neste contexto, para Uddin e Taplin (2009), o MDL é, portanto, um instrumento de financiamento capaz de incentivar investimentos em tecnologias de energia limpa.

A Figura 10 apresenta a evolução das emissões de GEE por setor de atividade nos anos de 1970, 1990 e 2010, para grupos de países diferenciados por sua renda. Como pode ser observado, as emissões de GEE de países desenvolvidos em grande parte estão relacionadas à queima de combustíveis de origem fóssil, o que de fato, uma vez estabelecido o acordo internacional para redução de emissões, justifica a busca por matrizes energéticas diversificadas, baseadas em fontes renováveis e não convencionais de energia.

Figura 10 – Emissões de GEE por setor de atividade, por grupo de países, em 1970, 1990 e 2010.

Fonte: modificado a partir de Victor et al. (2014).

* AFOLU corresponde ao setor “Agricultura, Floresta e Outros Usos da Terra”, do inglês *Agriculture, Forestry, and Other Land Use*.

Como também pode ser observado na figura acima, o perfil de emissões dos países em desenvolvimento (renda baixa e renda moderada baixa), como o Brasil, é fortemente influenciado pelo setor de mudanças de uso da terra. No entanto, o discurso da diversificação da matriz energética a partir de fontes renováveis de energia também foi reproduzido no país. De fato, a partir da ratificação do protocolo de Quioto em 2005, que possibilitou a implantação

de projetos MDL no Brasil, diversas fontes de energia alternativa ganharam novamente destaque, entre elas, o biogás extraído de aterros sanitários, que compreendiam, até o final de 2014, 50 atividades de projeto MDL (15,2%), mas que em conjunto, contribuem para a redução de 23,5% das emissões de GEE (MCTI, 2014a).

Loureiro, Rovere e Mahler (2013) destacam que, em 2005, no Brasil, de acordo com o Segundo Inventário Nacional de Emissões de Gases do Efeito Estufa, a participação relativa da gestão de resíduos em termos de emissões de GEE era pequena, mas em termos de metano, era responsável por 6,1% das emissões totais do país, sendo que 63,3% destas emissões eram provenientes do setor de resíduos. Em 2012, as estimativas das emissões de GEE brasileiras demonstravam que houve a manutenção da pequena contribuição relativa do setor de resíduos para o total de emissões de GEE do país, mas as emissões do subsetor de resíduos sólidos seguem relevantes no perfil de emissões do setor de tratamento de resíduos (Figura 11).

Figura 11 – Emissões de GEE dos subsetores do setor tratamento de resíduos, 2012.

Fonte: a autora, a partir de MCTI (2014b).

Segundo estudo conduzido pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (do inglês, *United Nations Environment Programme – UNEP*) em colaboração com a Associação Internacional de Resíduos Sólidos (do inglês, *International Solid Waste Association - ISWA*), em nível mundial, o manejo de resíduos sólidos é responsável por 3% do total das emissões de GEE, mas a gestão eficiente dos resíduos, em uma perspectiva de análise de ciclo de vida, tem potencial de redução 10 a 15% do total de emissões globais de GEE, considerando iniciativas como a redução da geração, reciclagem, reutilização, diminuição do aterramento e

aproveitamento energético de resíduos (WILSON *et al.*, 2015). Nesse contexto, a implantação de medidas que visem a captura e utilização do biogás no setor de resíduos se apresenta como não somente uma oportunidade de contribuição de mitigação das emissões de GEE e diminuição da dependência de combustíveis fósseis, mas também de melhoria nas condições de saneamento.

2.2. O recurso energético biometano – elementos técnicos e tecnológicos

2.2.1. Do biogás ao biometano

A implantação de plantas de biogás, na visão de Ferreira, Marques e Malico (2012), contribui para: (i) diminuir a dependência de combustíveis fósseis; (ii) responder à gestão inadequada de resíduos industriais, agrícolas e domésticos; (iii) reduzir as emissões de metano. E em alternativa aos usos finais tradicionais destinados ao biogás, Raboni e Urboni (2014) apontam que, nos últimos anos, a utilização de processos de purificação do biogás têm se intensificado na Europa, de modo que o gás obtido, o biometano, passou a ser utilizado como substituto ao gás natural (BÖRJESSON; AHLGREN, 2012; EUROBSERV'ER, 2014).

O biogás é um combustível gasoso, obtido durante o processo de degradação anaeróbica da matéria orgânica, cujo conteúdo energético deriva da presença majoritária de metano (ENERGIGAS SVERIGE, 2011). Assim, o emprego de processos de purificação objetivando a remoção de CO₂ e H₂S, resultam na produção de biometano (BÖRJESSON; AHLGREN, 2012), definido formalmente como o gás que apresenta alta concentração de metano e qualidade suficiente para viabilizar seu uso em automóveis ou para que seja possível sua injeção em redes de distribuição de gás natural (ÅHMAN, 2010; KOORNNEEF *et al.*, 2013; MOLINO *et al.*, 2013).

Sob o ponto de vista energético, Thrän *et al.* (2014) justificam a intensificação do uso dos processos de purificação de biogás verificado na Europa como forma de diminuir as importações de gás natural. A relevância do biogás purificado na matriz energética de muitos países tem se intensificado, uma vez que a tecnologia para sua aplicação é dominada, tanto para a geração de eletricidade e calor, quanto para o uso veicular, além de apresentar infraestrutura

de distribuição robusta, decorrente do uso massificado de gás natural fóssil.

Dentre os combustíveis fósseis, o gás natural é menos intensivo na emissão de GEE e de outros poluentes, como o enxofre, além de apresentar, em algumas situações, condições de uso mais favoráveis, como por exemplo, combustão mais limpa, homogênea e eficiente (BRASIL, 2014b). Para efeito de comparação, enquanto o fator de emissão de CO₂ do gás natural é 56,1 tCO₂/TJ, o fator de emissão de CO₂ do óleo diesel e do carvão betuminoso são 74,1 tCO₂/TJ e 94,6 tCO₂/TJ, respectivamente (GARG *et al.*, 2006). Consequentemente, a substituição de gás natural por biometano apresenta o duplo benefício de evitar a emissão de metano, GEE com maior potencial de aquecimento global e principal constituinte do biogás, e substituir um combustível fóssil (gás natural) por uma fonte renovável (biometano).

O benefício da substituição do gás natural por biometano, sob a ótica de mitigação das mudanças climáticas, também é salientado por Thrän *et al.* (2014), que destacam o papel fundamental do biometano nas estratégias nacionais de alguns países, como por exemplo, a Alemanha, no cumprimento das metas para redução de emissões de GEE. Como consequência desses dois fatores (segurança energética e mudanças climáticas), a implantação de usinas de purificação de biogás foi fortemente impulsionada na Europa. Essas usinas são responsáveis, atualmente, por mais da metade do consumo de biogás da região (FERREIRA; MARQUES; MALICO, 2012; THRÄN *et al.*, 2014).

Em uma comparação das emissões de gases do efeito estufa na geração de eletricidade com diversos combustíveis, considerando a técnica de análise do ciclo de vida, Poeschl, Ward e Owende (2010) demonstraram que as emissões de GEE em plantas de cogeração que utilizam biogás como fonte de energia são negativas (Figura 12), uma vez que além de ser produzido a partir de fontes renováveis, o biogás substitui o uso de combustíveis fósseis.

Figura 12 – Emissões de GEE por tipo de fontes de energia em cogeração.

Fonte: adaptado de Poeschl, Ward e Owende (2010).

Especificamente para o gás de aterro, Johari *et al.* (2012) identificam que a concentração de metano corresponde a 50-55% do volume, sendo que o restante de sua composição é dióxido de carbono (de 30% a 50%), nitrogênio (de 0% a 20%) e oxigênio (de 0% a 1%), além de quantidades traço de outras substâncias (MUÑOZ *et al.*, 2015; RASI; LÄNTELÄ; RINTALA, 2014; RYCKEBOSCH; DROUILLON; VERVAEREN, 2011).

Outra característica inerente ao biogás extraído de aterros sanitários é a presença de siloxanos, compostos químicos formados pela ligação entre a Sílica (Si) e o Oxigênio (O), comumente encontrado em produtos cosméticos e farmacêuticos (MUÑOZ *et al.*, 2015; RYCKEBOSCH; DROUILLON; VERVAEREN, 2011). Embora estejam presentes em pequenas quantidades, que variam 0,03 mg m⁻³ a 28 mg m⁻³ (Wheless e Pierce⁹, 2004 apud RYCKEBOSCH; DROUILLON; VERVAEREN, 2011), siloxanos são prejudiciais quando o biogás é utilizado em motores, pois o dióxido de silício, um abrasivo, é originado a partir deles durante a combustão, reduzindo o seu rendimento (LÄNTELÄ *et al.*, 2012).

A Tabela 4 apresenta a composição química e estabelece uma comparação entre o poder calorífico do biogás de aterros de resíduos sólidos urbanos, biogás, biometano e do gás natural. Como detalhado, estas características configuram o biometano como potencial substituto do gás natural de origem fóssil.

⁹ Wheless, E.; Pierce, J. **Siloxanes in Landfill and Digester Gas Update**. Los Angeles County Sanitation Districts and SCS Energy: Whittier, Long Beach, 2004. Disponível em <http://www.scsengineers.com/Papers/Pierce_2004Siloxanes_Update_Paper.pdf>. Acesso em: jan. 2011.

Tabela 4 – Composição química e poder calorífico de diferentes gases.

Propriedade	Biogás de aterro	Biogás^(a)	Biometano^(b)	Gás Natural
CH ₄ (% , mol)	50-55	>55	95 – 97	85-92
CO ₂ (% , mol)	37-41	34-38	1-3	0,2-1,5
N ₂ (% , mol)	1-17	-	2-10	0,3
H ₂ S (mg/m ³) ^(c)	0 – 1.000	100 – 10.000	<5-23	0 - 5
Siloxanos (mg/m ³)	1-400	-	<0.03-28	-
Poder Calorífico (MJ/Nm ³)	16	23	35	39

Fonte: a autora a partir de Deng e Hägg (2010), Energigas Sverige (2011), Rasi, Lantelä e Rintala (2011), Ryckebosch, Drouillon e Vervaeren (2011), Sun et al. (2015).

(a) composição típica de biogás obtido de digestão anaeróbica; (b) parâmetros mínimos para que seja efetivamente considerado como substituto do gás natural de origem fóssil; (c) para biogás de aterro, biogás e gás natural a composição indicativa reportada por DIN (2011) foi adotada. Esse documento possui acesso livre mas corresponde a uma versão em avaliação e pode ter sido alterado em sua versão final, cujo acesso é restrito,

2.2.2. Tecnologia disponível para produção de biometano

A extração do gás de aterro é realizada por um sistema composto por tubulações horizontais e verticais (drenos) que penetram as células onde estão depositados os resíduos sólidos urbanos nos aterros sanitários. A extração do gás para produção de biometano é conduzida de maneira forçada, com o auxílio de sopradores que, através de um diferencial de pressão, maximizam a extração do gás, alcançando, em média, 75% de eficiência de coleta do gás, com um custo de implantação aproximado de 1 milhão de dólares e operação e manutenção anual de 180 mil dólares¹⁰ (USEPA, 2008, 2015). Esses sistemas incluem uma unidade de queima, que costuma estar operacional quando há gás em excesso ou quando o gás não é utilizado, por exemplo, durante paradas na planta de purificação. Após a extração, o gás pode ser encaminhado para simples queima ou utilização, sendo a produção de biometano através de processos de purificação uma das opções disponíveis (Figura 13).

¹⁰ Para um sistema com capacidade média de extração de aproximadamente 1.020 m³/h de biogás.

Figura 13 – Ilustração da extração forçada e rotas de aplicação para o gás de aterro.

Fonte: modificado de ICLEI (2009).

O processo de purificação de biogás para produção de biometano tem como principal objetivo o aumento da concentração de metano através da remoção de CO_2 e de outros componentes presentes em concentrações traço, mas que podem limitar os usos finais do biometano (MAKARUK; MILTNER; HARASEK, 2010; RASI; LÄNTELÄ; RINTALA, 2014). As tecnologias para purificação de biogás são as mesmas usadas para o tratamento do gás natural, que estão em uso há mais de 20 anos e, portanto, disponíveis comercialmente. Assim, a escolha do método depende de diferentes fatores, tais como os custos, a composição e as características do fluxo de gás (por exemplo, temperatura, pressão), pureza exigida e vazão total de gás (KOORNNEEF et al., 2013). Para Patterson et al. (2011), a quantidade de energia necessária para produção e o nível de perdas de metano associadas ao processo também devem ser critérios para a definição da tecnologia, já que não apenas ocasionam perda de receita, mas também contribuem com emissões de GEE.

As tecnologias mais importantes atualmente disponíveis no mercado para o processo de purificação de biogás incluem: lavagem com água, lavagem química, adsorção com modulação de pressão (*do inglês, pressure swing adsorption - PSA*) e separação por membranas (MAKARUK; MILTNER; HARASEK, 2010; PATTERSON et al., 2011). Segundo IEA BIOENERGY TASK 37 ([s.d.]), os fornecedores de equipamentos estão, em sua maioria localizados no hemisfério norte, embora alguns desses já contem com representantes no Brasil. A participação dessas tecnologias, quanto ao seu emprego na purificação de biogás, é apresentada na Figura 14.

Figura 14 – Participação das principais tecnologias utilizadas na purificação de biogás em 2012.

Fonte: a autora a partir de Thrän et al. (2014).

Mais recentemente, novos processos de purificação de biogás vêm sendo testados, tais como a absorção alcalina com regeneração (AwR) e *bottom ash for biogas upgrading* (BABIU). Ambas as tecnologias são capazes de capturar o CO₂ regenerado no processo de purificação do biogás, no entanto utilizam as cinzas oriundas do processo de incineração de resíduos sólidos urbanos, tecnologia não avaliada pela presente pesquisa (STARR; VILLALBA; GABARRELL, 2015). Para todas essas tecnologias, sempre que estejam presentes no biogás elevadas concentrações de contaminantes, tais como o H₂S ou siloxanos, pode ser necessária sua remoção/redução inicial antes de realizar a purificação (PATTERSON et al., 2011). As próximas seções apresentam, de maneira sucinta, a descrição dos processos de purificação mais empregados atualmente bem como os principais parâmetros operacionais e seus custos.

2.2.2.1. Lavagem com água

O método de lavagem com água (do inglês, *water scrubbing*) é utilizado para purificação do biogás, uma vez que o dióxido de carbono e sulfeto de hidrogênio são mais solúveis em água do que o metano. O princípio desta técnica está no fato de que a solubilidade dos gases aumenta em função de fatores como pressão, temperatura e razão líquido/gás¹¹ (MUÑOZ et al., 2015; RASI; LÄNTELÄ; RINTALA, 2014). Muñoz et al. (2015) destacam que o CO₂ é 26 vezes

¹¹ De acordo com a lei de Henry. Para mais detalhes, ver (RASI; LÄNTELÄ; RINTALA, 2014).

mais solúvel em água a 25°C que o CH₄.

As etapas do processo são ilustradas na Figura 15. Antes de sua aplicação, é feita a remoção da umidade ou partículas presentes no biogás, o qual é, em seguida, (1) comprimido e injetado na parte inferior da torre de purificação, enquanto (2) a água entra na parte superior da torre. À medida que o biogás bruto se move, em contracorrente, na coluna, o CO₂ e o H₂S são dissolvidos. O biometano é obtido no topo da coluna (3). O metano dissolvido na água (10-20%) é capturado por despressurização dentro de um tanque flash e retorna à torre de purificação (4). A água, após o tanque flash, passa pela última coluna (5), onde ocorre a injeção de ar (6) para sua descompressão e retorno ao processo (7) e a liberação do CO₂ removido no processo (8). O biometano obtido é então seco e comprimido para posterior armazenamento e distribuição (MUÑOZ et al., 2015; PATTERSON et al., 2011).

Figura 15 – Diagrama ilustrativo do processo de lavagem com água.

Fonte: modificado a partir de (MUÑOZ et al., 2015).

Para Läntelä et al. (2012), a vantagem do processo de lavagem com água é que esta é uma tecnologia relativamente simples e pode remover H₂S e CO₂ simultaneamente, enquanto a desvantagem, para Zhao et al. (2010), é propriamente o elevado uso de água, mesmo quando técnicas de regeneração são aplicadas, e limitada remoção de H₂S. Os custos de investimento, de operação e manutenção, bem como os principais parâmetros operacionais de uma planta de purificação que aplique esta técnica variam de acordo com a capacidade da planta e estão descritos na

Tabela 5.

Tabela 5 – Lavagem com água: custos e parâmetros operacionais de interesse.

	Capacidade da planta (Nm³/h)	Custo (EUR/Nm³ h⁻¹)
<i>Custos</i>		
Investimento	100 – 500*	5.000 – 2.500
	Acima de 1.000	1.800-2.000
Operação e Manutenção**		2-3% do investimento
<i>Parâmetros operacionais</i>		
Concentração final de CH ₄		>97%
Perda de CH ₄ no processo		1-2%
Consumo de eletricidade		0,2-0,3kWh/Nm ³

Fonte: a autora a partir de Muñoz et al. (2015) e Thrän et al. (2014).

* Nesta faixa de capacidade da planta o custo decresce linearmente conforme a capacidade da planta for maior.

** Custos de operação essencialmente decorrentes do consumo de eletricidade

2.2.2.2. Lavagem química

Uma variação da técnica de lavagem é a utilização de compostos químicos (soluções aquosas de amina, como monoetanolamina ou dietanolamina, ou soluções de sais básicos como sódio, potássio ou hidróxidos de cálcio) como solventes, baseado em sua maior capacidade de absorção seletiva do CO₂ contido no biogás, quando comparados com o processo de lavagem com água (MUÑOZ et al., 2015; ZHAO et al., 2010).

De maneira semelhante ao processo de lavagem com água, o biogás é injetado na base da coluna de absorção e é “lavado”, em contracorrente, pela solução absorvente na coluna de absorção. Na coluna de regeneração o composto químico utilizado no processo é recuperado pela dessorção do CO₂ com a adição de calor Figura 16 (MUÑOZ et al., 2015; ZHAO et al., 2010).

Figura 16 – Diagrama ilustrativo do processo de lavagem química.

Fonte: adaptado a partir de Muñoz et al. (2015) e Zhao et al. (2010).

As principais vantagens desse processo, quando comparado ao processo com água, são a redução do tamanho das plantas de purificação, completa remoção de H_2S , menor necessidade de energia para a compressão, e altas taxas de recuperação de metano (99,5 – 99,9%), dada sua baixa solubilidade em aminas. As desvantagens residem no fato de o processo requerer constante adição de químicos que não são totalmente recuperados, calor para recuperar os solventes antes de sua recirculação, necessidade de tratamento adicional dos efluentes, além da alta demanda de energia para recuperar os solventes, o que é destacado por alguns autores como fator limitante de sua aplicação (MUÑOZ et al., 2015; PATTERSON et al., 2011; ZHAO et al., 2010). A Tabela 6 apresenta os custos e principais parâmetros operacionais da purificação do biogás com a utilização da técnica de lavagem química.

Tabela 6 – Lavagem química: custos e parâmetros operacionais de interesse.

	Capacidade da planta (Nm ³ /h)	Custo (EUR/Nm ³ h ⁻¹)
<i>Custos</i>		
Investimento	600	3.200
	1.800	1.500
Operação e manutenção		2-3% do investimento
<i>Parâmetros operacionais</i>		
Concentração final de CH ₄		99,5-99,9%
Perda de CH ₄ no processo		0.05-0.1%
Consumo de eletricidade		0,12-0,15 + 0,55 kWh/Nm ³

Fonte: a autora a partir de Muñoz et al. (2015) e Thrän et al. (2014).

2.2.2.3. Adsorção com modulação de pressão (PSA)

Desde o desenvolvimento deste processo, na década de 1960, essa tem sido uma das tecnologias de separação de gás mais utilizada em processos industriais, principalmente dada a sua flexibilidade, relativamente baixo custo de capital e eficiência (PATTERSON et al., 2011).

A técnica de adsorção com modulação de pressão (do inglês, *Pressure Swing Adsorption - PSA*) está baseada na capacidade dos vários materiais adsorventes, comumente carbono ativado, reterem de maneira seletiva, um ou mais componentes de uma mistura de gases em condições de pressão variadas (LÄNTELÄ et al., 2012; MUÑOZ et al., 2015; PATTERSON et al., 2011). Deste modo, os processos PSA, quando aplicados na purificação de biogás, são responsáveis pela remoção seletiva do CO₂ resultando em um conteúdo de metano no biometano entre 96-98% (MUÑOZ et al., 2015; ZHAO et al., 2010).

A Figura 17 ilustra as etapas do processo de PSA, conduzido em colunas que operam em paralelo em um ciclo de adsorção e regeneração. Inicialmente, o CO₂ contido no biogás bruto, é adsorvido pelo material adsorvente contido na coluna de adsorção. Este processo ocorre a partir do aumento da pressão na coluna de pressurização. Quando o nível de saturação do material de adsorção é atingido, o gás purificado é extraído e a coluna de dessorção é despressurizada com o objetivo de liberar o CO₂ retido no material adsorvente (MUÑOZ et al., 2015; ZHAO et al., 2010).

Figura 17 - Diagrama ilustrativo do processo PSA.

Fonte: modificado a partir de Muñoz et al. (2015).

Zhao et al. (2010) destacam que as principais vantagens do método de adsorção com modulação de pressão são o alto grau de purificação obtido e a pouca demanda de energia para

conduzir o processo. No entanto, os autores elencam como principal desvantagem a necessidade de remoção do H_2S antes do início do processo. Os custos e principais parâmetros operacionais associados ao processo de PSA estão descritos na Tabela 7.

Tabela 7 – PSA: custos e parâmetros operacionais de interesse.

	Capacidade da planta (Nm ³ /h)	Custo (EUR/Nm ³ h ⁻¹)
<i>Custos</i>		
Investimento	600	2.700
	2000	1.500
Operação e manutenção *		2-3% do investimento
<i>Parâmetros operacionais</i>		
Concentração final de CH ₄		>96-98%
Perda de CH ₄ no processo		<3%
Consumo de eletricidade		0,25 – 0,3 kWh/Nm ³

Fonte: a autora a partir de Muñoz et al. (2015) e Thrän et al. (2014).

* Corresponde ao consumo de eletricidade.

2.2.2.4. Separação por membranas

O potencial de utilização de membranas para produção e purificação de biogás foi observado há mais de trinta anos por Schell & Houston¹² (1983 apud MAKARUK; MILTNER; HARASEK, 2010), que estudaram um sistema composto de membranas de acetato celulósico em espiral. O processo de purificação do biogás com a aplicação desta técnica é baseado na transferência preferencial de um gás através de uma membrana semipermeável, enquanto outros componentes são retidos (PATTERSON et al., 2011).

Segundo Patterson et al. (2011), as membranas podem ser agrupadas em dois tipos: membranas de alta pressão (gases presentes em ambos os lados da membrana, sistema gás-gás) e sistemas de baixa pressão (adsorvente líquido de um lado da parede da membrana, sistema gás-líquido). O biogás pode ser purificado em um único estágio ou em múltiplos estágios, e a concentração final de CH₄ no produto obtido pode alcançar níveis superiores a 98% (MUÑOZ et al., 2015). A Figura 18 ilustra o processo de purificação de biogás por membranas do sistema gás-gás. Neste esquema, o biogás bruto recebe um tratamento preliminar para remoção de água e H_2S , é comprimido e encaminhado ao sistema de membranas, que retém o CO₂ (eliminado

¹² W.J. Schell, C.D. Houston, Use of membranes for biogas treatment, Energy Progress 3 (1983) 96–100.

como gás residual), resultando na produção do biometano.

Figura 18 – Diagrama ilustrativo do processo de separação por membranas gás-gás.
Fonte: modificado de Muñoz et al. (2015).

Segundo Makaruk, Miltner e Harasek (2010), há uma série de vantagens no uso de sistemas de membrana para a purificação de biogás, sendo os mais importantes a segurança e simplicidade de operação e manutenção. No entanto, assim como os demais processos de purificação, estes sistemas requerem o pré-tratamento do biogás para remoção de contaminantes, como H_2S e umidade, particularmente importante no caso do biogás produzido em aterros, que contém substâncias nocivas, que podem prejudicar as membranas (MAKARUK; MILTNER; HARASEK, 2010; MUÑOZ et al., 2015; PATTERSON et al., 2011). Os custos e principais parâmetros do método de purificação de biogás a partir de membranas estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Separação por membranas: custos e parâmetros operacionais de interesse.

	Capacidade da planta (Nm^3/h)	Custo ($EUR/Nm^3 h^{-1}$)
<i>Custos</i>		
Investimento	100	6.000
	400	2.500
	Acima 1.000	2.000
Custos operacionais *		0,13-0,22 EUR/Nm^3
Custos de manutenção		3-4% do investimento
<i>Parâmetros operacionais</i>		
Concentração final de CH_4		98 – 99%
Perdas de CH_4 no processo		<2%
Consumo de eletricidade		0,2-0,38 kWh/Nm^3

Fonte: a autora a partir de Muñoz et al. (2015) e Thrän et al. (2014).

* Compreende o custo de substituição de membranas, cuja vida útil é de 5 a 10m anos, pré-tratamento do biogás e consumo de eletricidade para compressão.

2.2.3. Usos finais do biometano e concorrência entre fontes energéticas

A aplicação de processos de purificação ao biogás ampliaram as opções de usos finais disponíveis para este recurso energético e lhe conferiram maior valor econômico, uma vez que o tornaram compatível, em termos energéticos, com o gás natural de origem fóssil (EZE; AGBO, 2010). Considerando o intercâmbio possível entre o biometano e o gás natural, Thrän et al. (2014) identificam a produção de calor, eletricidade, cogeração, além da utilização como matéria-prima da indústria química ou como combustível veicular como importantes usos finais. Os autores ressaltam que a produção de eletricidade e calor a partir do biometano só é realizada quando não é possível fazê-la com o uso direto do biogás, uma vez que o recurso oferece uma gama de usos maior que aquele.

A utilização do biometano como combustível veicular é antiga e foi registrada pela primeira vez durante a Segunda Guerra Mundial, sendo retomada no início da década de 1990, em países como a Suíça e Suécia (THRÄN et al., 2014). Atualmente, a Europa utiliza 10% do biometano produzido como combustível veicular, mas importantes avanços são registrados em outras regiões, como na Coreia do Sul, onde 600 ônibus já utilizam o biometano como combustível (REN21, 2015).

Com relação às vantagens da utilização do biogás purificado como combustível veicular em comparação com combustíveis derivados de petróleo (gasolina e diesel), Energigas Sverige (2011) ressalta que a maior temperatura de ignição do biogás contribui para a redução de explosões e incêndios acidentais. Adicionalmente, o autor apresenta como vantagens do biogás frente aos outros combustíveis derivados de petróleo, a menor emissão de particulados, vibração do motor, emissão de gases do efeito estufa.

Por apresentarem usos finais compatíveis, a infraestrutura necessária para a o transporte e distribuição do biometano se assemelha à do gás natural. Assim, essas etapas podem ser efetuadas por gasodutos, quando estes estiverem presentes, ou por cilindros, após compressão, quando a malha de transporte e distribuição de gás estiver ausente ou não for extensa. No entanto, ao compartilhar a infraestrutura de gás natural, o biometano precisa não apenas ser competitivo em relação à gasolina e ao diesel, mas também precisa de algum tipo de política de incentivo para torná-lo competitivo com gás natural no sistema de distribuição (ÅHMAN, 2010).

Adicionalmente aos combustíveis fósseis convencionais, a intensificação da exploração e

uso de gás de folhelho (*shale gas*) apresenta influência sobre o incremento da produção de biometano. A adoção do gás de folhelho como recurso energético contribui positivamente para a expansão da rede de distribuição de gás natural o que, conseqüentemente, favorece a cadeia de suprimento de biometano. No entanto, ao deslocar o consumo de combustíveis fósseis como o carvão e gás natural utilizados, por exemplo, na geração de eletricidade, diminui o preço desses combustíveis tornando-os mais competitivos frente à exploração de fontes renováveis como o biometano (SCOPE, 2015; THRÄN et al., 2014).

A questão da influência de outros combustíveis na viabilidade da produção de biometano também é discutida por Patterson et al. (2011), para quem a viabilidade da adoção do biometano para uso direto como combustível nos transportes depende de sua competitividade econômica também em relação aos outros combustíveis não fósseis, incluindo o biodiesel e o bioetanol. No entanto, os autores notam que a competitividade do biometano aumenta quando subsídios financeiros são implementados, refletindo seus benefícios ambientais, especialmente se os custos de gás natural aumentam.

Para Koornneef et al. (2013), um preço de gás natural inferior tem um impacto negativo sobre o potencial econômico do biometano, mas Åhman (2010) sugere que uma vantagem competitiva poderia ser alcançada, por exemplo, por uma legislação que criasse uma quota “gás verde” ou algo similar ou ainda com um incentivo econômico, por exemplo, imposto baseado em emissão de CO₂.

2.2.4. Considerações sobre modelos de previsão de produção de biogás e biometano

A produção de biogás em aterros pode ser estimada através de diferentes modelos. Kamalan, Sabour e Shariatmadari (2011) avaliam que existem dois tipos de funções empregadas pelos modelos disponíveis para a descrição do decaimento da matéria orgânica em aterros: as funções de ordem zero, para as quais a formação de metano permanece constante ao longo dos anos independentemente do tipo de resíduo e tempo decorrido desde sua disposição, e as funções de primeira ordem, consideram não apenas o tipo de resíduos, mas também as características do local de disposição.

Os modelos baseados em funções de primeira ordem são os mais amplamente disponíveis e utilizados (KAMALAN; SABOUR; SHARIATMADARI, 2011; RTI INTERNATIONAL,

2010; SANTOS, 2014), sendo os mais aplicados para estimar a emissão de metano em aterros o modelo proposto pelo IPCC e o LandGEM, proposto pela Agência de Proteção Ambiental Norte Americana (do inglês, *United States Environmental Protection Agency* – USEPA) (RTI INTERNATIONAL, 2010).

Santos (2014) conduziu um estudo comparativo entre as emissões de gases do efeito estufa provenientes de aterros sanitários estimadas a partir de diferentes versões do modelo do IPCC e do LandGEM, entre outros. Como resultado, não foram encontradas diferenças significativas no resultado final obtido com a aplicação das versões mais recentes do modelo do IPCC e da USEPA. Para RTI INTERNATIONAL (2010), as vantagens do uso do modelo do IPCC são que os diferentes tipos de resíduos podem ser modelados ao mesmo tempo, enquanto o autor aponta como desvantagem deste método, o fato de apenas apresentar resultados de emissão de CH₄, e não CO₂. A falta de modelagem para o dióxido de carbono não é limitante para a condução da pesquisa, uma vez que o gás de interesse é, de fato, o metano. Kamalan, Sabour e Shariatmadari (2011) ressaltam ainda que o modelo americano, apesar de apresentar uma interface amigável, está baseado na composição média dos resíduos dispostos em aterros nos Estados Unidos.

A partir destas considerações, os cálculos da estimativa de emissões de gases do foram feitos considerando a planilha disponibilizada pelo IPCC, que corresponde à utilizada pelos países, que assim o desejarem, no cálculo de emissões devido à disposição de resíduos na elaboração dos inventários nacionais de emissões de GEE. Esta planilha fornece duas opções de cálculo que dependem da completude das informações. Na primeira opção, o cálculo das emissões é feito considerando a composição gravimétrica dos resíduos sólidos, enquanto o cálculo segundo a opção restante, utiliza valores agregados de produção de resíduos. A primeira opção foi adotada em função de um dos cenários elaborados na pesquisa considerar a separação prévia da fração úmida dos resíduos sólidos urbanos, anteriormente à sua disposição final em aterros sanitários.

2.3. O estímulo ao aumento da participação na matriz energética brasileira – os enfoques setoriais energético e sanitário

2.3.1. A visão do setor energético

O Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) é o órgão que assessora a Presidência da República na formulação de políticas e diretrizes voltadas ao desenvolvimento do setor energético do país. Essa instituição é presidida pelo Ministro de Estado de Minas e Energia. O MME, por sua vez, é o responsável por desenvolver e acompanhar a formulação e implantação de políticas públicas no setor energético, bem como dentre outras atribuições “*zelar pelo equilíbrio conjuntural e estrutural entre a oferta e a demanda de recursos energéticos no País*” (MME, 2016a). É, portanto, no âmbito do MME e de suas entidades vinculadas que se desenvolvem as ações e programas direcionados à promoção de fontes renováveis de energia no país.

A elaboração de estudos que subsidiam o planejamento do setor energético do país é competência da EPE, empresa pública vinculada ao MME. Entre os principais estudos conduzidos pela EPE, que subsidiam o planejamento energético do país, destacam-se (MME, 2016b):

- *Plano Nacional de Energia*: estudo que fornece subsídios para o planejamento integrado de longo prazo do setor de energia, através da indicação das tendências e alternativas de sua expansão. A primeira edição do PNE foi publicada em 2007 e considera como horizonte de planejamento o ano de 2030 (EPE, 2007). Também compõe o PNE o Relatório “Matriz Energética Brasileira 2030”. O estudo de demanda que comporá a segunda edição do PNE, referente ao horizonte de planejamento até 2050 já está disponível publicamente.
- *Plano Decenal de Energia*: instrumento de planejamento do setor energético do país e apresenta informações referentes à expansão da oferta e da demanda de energia no país em um horizonte de dez anos. O último estudo publicado compreende os anos de 2014 a 2023 (BRASIL, 2014b).

A ANP é a agência vinculada ao MME com atribuições de especificar, fiscalizar, e garantir o suprimento de biocombustíveis no país (ANP, 2015b). Os serviços de distribuição do gás

Figura 20 – Participação de fontes renováveis nas matrizes energéticas brasileira e mundial.
Fonte: EPE (2014a).

Entre as ações desenvolvidas pelo MME para incentivar a geração de eletricidade a partir de fontes renováveis, destaca-se a realização dos leilões de energia e a execução do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), um dos maiores programas de incentivo à energia renovável executados no país.

Os leilões de energia são o principal mecanismo de compra de energia elétrica em ambiente regulado do país. São executados pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), por delegação da ANEEL, que é a autarquia vinculada ao MME responsável por regular e fiscalizar a geração, distribuição, transmissão e comercialização de energia. Do total de eletricidade comercializada no país através dos leilões, a maior parte utiliza combustíveis fósseis (carvão mineral, óleo combustível e diesel, e gás natural perfazem 59,5%). Entre as fontes renováveis, a eólica (15,1%) tem destaque, seguida da fonte biomassa (4,3%), que inclui o biogás (Figura 21).

Figura 21 – Total de energia elétrica, de empreendimentos novos, negociada em leilões¹³, de 2008 a 2020.
Fonte: a autora a partir de MME; SSE; DGSE (2016).

* Inclui biogás.

¹³ Considera apenas os dados dos Leilões de Energia Nova, Fontes Alternativas e Projetos Estruturantes (MME, 2016c). O biogás foi considerado como elegível a participar de Leilões de Energia de Reserva apenas em 2014 (PORTAL BRASIL, 2014).

De todos os leilões executados pelo governo até dezembro de 2015, apenas uma planta de geração de eletricidade a partir do biogás de aterro obteve êxito em negociar sua energia: o projeto São João Biogás. Este projeto, localizado em São Paulo, possui 20MW de capacidade instalada, e gera eletricidade a partir do gás extraído do Aterro São João. O contrato negociado tem duração de 15 anos, com um preço de R\$230,42/MWh, valor atualizado para dezembro de 2015 (CCEE, 2016).

O PROINFA, instituído pela Lei nº 10.438, de 2002, tinha como objetivo aumentar a participação de fontes renováveis na matriz de eletricidade brasileira a partir da contratação de 3.300 MW de capacidade, distribuídos igualmente entre projetos das fontes eólica, pequenas centrais hidrelétricas e de biomassa. A contratação dos projetos foi por meio de licitação pública e a energia foi negociada através de contratos de longo prazo com tarifas incentivadas. Os projetos de geração de eletricidade a partir do biogás de aterros eram elegíveis a participarem do programa na categoria biomassa, mas apenas projetos de geração de eletricidade através da queima do bagaço da cana-de-açúcar obtiveram êxito em negociar sua eletricidade no âmbito desse programa (ELETROBRÁS, 2007).

A ANEEL também é responsável por acompanhar o investimento e a execução de Projetos de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) conduzidos pelos agentes do setor elétrico, conforme previsto na legislação do setor. Em 2012, a agência lançou a chamada pública para execução de Projetos de P&D nº14/2012 “*Arranjos Técnicos e Comerciais para Inserção da Geração de Energia Elétrica a partir do Biogás oriundo de Resíduos e Efluentes Líquidos na Matriz Energética Brasileira*”. Ao todo foram apresentados 23 projetos que somavam 33,7MW de capacidade instalada, correspondendo ao investimento de aproximadamente R\$476 milhões (ANEEL, 2012a).

Entre os projetos cadastrados na chamada pública, além da geração de energia elétrica com biogás de aterros, as empresas também propuseram a elaboração de conceitos ou metodologias que consideravam a geração de eletricidade a partir da digestão da fração orgânica de resíduos sólidos, em função da hierarquia proposta pela PNRS, discutida mais adiante. Igualmente relevante para o setor de resíduos sólidos urbanos foi a proposição, pela empresa COPEL Geração e Transmissão S.A., do projeto de produção de biometano “*Expansão da Usina de Biogás Geo Elétrica - Tamboara: Biorreatores de alta eficiência, substituição de diesel por biometano e agregação de valor ao composto orgânico*” (ANEEL, 2012b).

Das ações governamentais voltadas ao incremento no uso de biocombustíveis no Brasil, destacam-se os programas voltados ao incentivo do consumo de biodiesel (PNPB - Programa

Nacional de Biodiesel) e etanol produzido a partir da cana-de-açúcar (PROÁLCOOL), que correspondem a 18% dos combustíveis consumidos no Brasil.

Como destacado, o PNE 2030 e a Matriz Energética Brasileira 2030 foram publicados em 2007, anteriormente à aprovação da PNRS. Esses relatórios apontavam a necessidade de regulação nacional do setor de saneamento para que fosse possível, ao final do horizonte considerado nos estudos, concretizar o potencial de aproveitamento dos resíduos sólidos, estimado em 2.600 MW para a geração de eletricidade, único uso final considerado à época de elaboração dos estudos, para o biogás de aterros (EPE, 2007; MME, 2007). Decorridos sete anos desde a publicação do PNE 2030, a EPE disponibilizou os estudos de demanda que comporão sua próxima edição, que considerará o planejamento energético do país até 2050. Esse relatório já contempla de forma mais direta o aproveitamento de biogás de aterros para a produção de biometano, enquanto oferta descentralizada de energia (EPE, 2014b).

2.3.2. A visão do setor de saneamento

2.3.2.1. *Estrutura institucional*

O setor de saneamento brasileiro sofreu constantes alterações desde a década de 1970. Entre 1971 e 1992, as políticas públicas desse setor seguiram os ditames do Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANASA), o qual era gerido de maneira centralizada pelo governo federal e tinha como objetivos aumentar a cobertura dos serviços de saneamento, incluindo a ampliação do acesso à água, coleta de resíduos e esgoto (FARIA; FARIA, 2004). Em 1986, o Banco Nacional de Habitação (BNH), órgão executor do PLANASA, foi extinto e os anos seguintes foram marcados por um “vazio institucional” caracterizado por uma ausência de regulação específica para o setor, em decorrência do não rearranjo das atribuições do BNH para qualquer outra agência ou instituição governamental (CUNHA, 2011; FARIA; FARIA, 2004; MADEIRA, 2010).

No início dos anos 2000, segundo Faria e Faria (2004), foi criada a Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (SNSA), vinculada ao Ministério das Cidades e responsável por articular as ações voltadas ao setor de saneamento, desenvolvidas por diversos órgãos federais,

entre eles o Ministério da Saúde e Ministério do Meio Ambiente (MMA). Em sua configuração atual, a SNSA é responsável pelo acompanhamento da implantação das políticas do setor de saneamento, enquanto a proposição de políticas, planos e programas voltados à gestão integrada de resíduos sólidos é competência da Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano (SRHU), vinculada ao MMA (MMA, 2016; SNSA, 2014).

As diretrizes nacionais para o saneamento básico foram estabelecidas em 2007, a partir da promulgação da Lei Nacional de Saneamento Básico (LNSB), Lei Nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007 (BRASIL, 2007). Para Cunha (2011, p. 7), a aprovação dessa lei dotou o setor de saneamento com uma *“moldura organizacional e institucional clara”*, mas segundo o autor, em consequência do abandono do modelo centralizador do PLANASA, o grande desafio do setor está na necessária articulação entre a união, estados e municípios.

Especificamente em relação à gestão dos resíduos sólidos urbanos, compete aos municípios a condução das atividades de manejo dos resíduos, que pode ser realizada de maneira independente ou por meio de consórcios com outros municípios (IBGE, 2010; LOUREIRO; ROVERE; MAHLER, 2013). Compreende a coleta, tratamento e disposição final, atividades estas que podem ser realizadas por empresas provadas em regime de concessão. A Figura 22 apresenta a estrutura institucional do setor de saneamento com destaque para a gestão de resíduos sólidos, de competência dos municípios.

Definição de Políticas

Figura 22 - Desenho institucional simplificado do setor de saneamento para os resíduos sólidos.

Fonte: a autora.

2.3.2.2. Panorama da gestão de resíduos sólidos urbanos no Brasil

Os resíduos sólidos geralmente podem ser reciclados, encaminhados para processos de compostagem, incinerados ou depositados em aterros, mas no Brasil, o depósito em lixões a céu aberto é a prática mais comum (LOUREIRO; ROVERE; MAHLER, 2013). Segundo a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB) de 2008, a grande maioria (99,69%) dos municípios brasileiros conta com serviço de coleta de resíduos sólidos. No entanto, apenas aproximadamente a metade desses resíduos era encaminhada para aterros sanitários (27,7%) ou controlados (22,5%) (IBGE, 2010).

Adicionalmente, a distribuição espacial dos aterros sanitários existentes no país evidencia a necessidade de melhoria das condições sanitárias das regiões Nordeste e Norte, as quais apresentam, respectivamente, 89,3% e 85,5% dos resíduos coletados encaminhados para lixões (Figura 23).

Figura 23 - Municípios, segundo destinação final de resíduos sólidos.

Fonte: modificado a partir de IBGE (2010).

Apesar do aumento da destinação final mais adequada dos resíduos coletados no país,

capturado nas últimas pesquisas de saneamento realizadas pelo IBGE, significativos esforços ainda devem ser feitos, visto que a forma mais utilizada pelos municípios brasileiros para o destino final de seus resíduos ainda é o vazadouro a céu aberto. Parte destes esforços em banir a disposição de resíduos sólidos urbanos em lixões foram contemplados com a promulgação da PNRS, que segue uma hierarquia na gestão de resíduos semelhante à proposta pela União Europeia (VILLAC, 2014). Tal hierarquia tem como fundamento inicial a não geração, o reuso, a reciclagem e a recuperação dos resíduos – incluindo tratamentos que considerem a recuperação de energia a partir de resíduos, ou como mencionado anteriormente, *waste-to-energy* - e, por fim, disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos (Figura 24).

Figura 24 – Hierarquia da PNRS.

Fonte: adaptado de EUROPEAN COMMISSION (2012, p. 9).

* Inclui recuperação energética.

Ao propor esta hierarquia para a gestão de resíduos sólidos, a PNRS faz uma importante distinção entre resíduos e rejeitos, correspondendo estes últimos aos “*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*” (BRASIL, 2010a). Face a essa definição, observa-se o objetivo final da hierarquia proposta, que determina a disposição ambientalmente adequada dos rejeitos, observando prazos para adequação e fechamento desses espaços no país.

O Plano Nacional de Resíduos Sólidos apresenta como estratégia a separação prévia da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos, prevendo em sua diretriz primeira a recuperação energética do biogás gerado em biodigestores ou em aterros sanitários (MMA, 2012). A lei determina que estados e municípios, através dos planos de resíduos sólidos, estabeleçam metas para o cumprimento desse objetivo. Esse processo incorre, necessariamente, em necessidade do aprimoramento da gestão de resíduos sólidos, uma vez que pressupõe uma disposição final em aterros sanitários ou, no mínimo, controlados.

2.3.2.3. Questões sociais

As normas propostas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) para a construção e operação de aterros sanitários devem ser observadas, na medida em que a PNRS estabelece esses locais como única opção para disposição final dos rejeitos. De acordo com essas normas, é vedada a entrada de pessoas estranhas à operação do aterro sanitário em seus limites (ABNT, 2008, 2010). No entanto, estima-se que apenas 10% do contingente de catadores de materiais recicláveis no Brasil, equivalente a 400.000 a 600.000 está associado a alguma cooperativa (MMA, 2012) o que significa que muitos destes trabalhadores realizam o processo de catação de material reciclável em vazadouros a céu aberto.

Os catadores que trabalham na coleta de materiais recicláveis em lixões estão expostos a riscos como a exposição ao calor e aos gases de aterro, atropelamento por caminhões, sobrecarga de trabalho. Conforme salientado por Campos e Mercedes (2014), estes trabalhadores são os grandes responsáveis pelos altos índices de reciclagem observados no país apesar das precárias condições de trabalho e baixa remuneração. Neste sentido, as autoras chamam atenção para o fato de que até que as iniciativas voltadas para a inserção social dos catadores estabelecidas pela PNRS sejam efetivadas, considerando a determinação sobre o encerramento da operação dos lixões, poderá ser observada uma diminuição temporária do material disponível para estes catadores, o que demarca, mais uma vez, os processos de inclusão e exclusão que esta população é, historicamente, submetida.

A associação entre o aproveitamento energético de gases de aterro e o agravamento de condições sociais tipicamente observadas no setor de resíduos é exemplificada com a breve análise do encerramento do AMJG, no qual foi instalada uma planta de purificação de biogás, exposta na seção 4.

3. EXPERIÊNCIAS INTERNACIONAIS DE INSERÇÃO DE BIOMETANO EM MATRIZES ENERGÉTICAS – PAÍSES SELECIONADOS

A União Europeia, segundo Pike Research¹⁴ (2012, apud RABONI; URBINI (2014), foi responsável por 60% do biogás produzido no mundo e apresenta uma forte tendência de aumento da produção de biogás nos próximos anos (Figura 25).

Figura 25 - Produção mundial de biogás em 2012 e projeções até 2022.

Fonte: adaptado a partir de Pike Research¹⁴ (2012 apud RABONI; URBINI, 2014).

O aumento do uso de fontes renováveis de energia na região, e por consequência o aumento na produção de biogás, está atrelado à existência de regulações e metas determinadas pela União Europeia tanto em relação à gestão de resíduos, quanto em relação às mudanças climáticas. Na comunidade europeia, a prática de aterramento de resíduos é restrita em função das Diretivas Europeias, em especial a Diretiva sobre reciclagem e recuperação de resíduos (2009/98/EC) e a Diretiva sobre aterros (1999/31/EC) (FOREEST, 2012; POESCHL; WARD; OWENDE, 2010). Esses autores também destacam a aprovação da Diretiva de Energia Renováveis 2009/28/EC como importante marco na regulação do biogás.

O “Pacote de Energia e Mudanças Climáticas” aprovado pelo Parlamento Europeu, sob a

¹⁴ PIKE RESEARCH. Renewable biogas. Methane Recovery and Utilization in Landfills and Anaerobic Digesters: Municipal Solid Waste, Agricultural, Industrial, and Wastewater Market Report on Analysis and Forecasts. Boulder, 2012. 87 p.

diretiva de Energias Renováveis, é, segundo FNR (2013), um fator importante na promoção do uso de fontes alternativas de energia, já que impõe como objetivos a serem alcançados até 2020: redução em 20% nas emissões de GEE (a partir dos níveis verificados em 2009), aumento no uso de fontes renováveis de energia em 20%, e redução em 20% no consumo de energia através da adoção de medidas de eficiência energética.

Por outro lado, os avanços registrados também estão em grande parte relacionados à existência de subsídios e instrumentos econômicos de incentivo ao uso de fontes renováveis. Para Åhman (2010), o desenvolvimento do biogás na Europa tem sido impulsionado em grande parte por tarifas *feed-in*¹⁵ (praticadas, por exemplo, na Alemanha) e Certificados de Obrigação Renováveis¹⁶ (Reino Unido). Especificamente para o biometano, (Koornneef et al. (2013) identificam como facilitadores, as metas de uso de biocombustíveis na União Europeia, derivadas das Diretiva de Energia Renovável, que estabelece o uso de até 10% de fontes renováveis no setor de transporte de cada país membro (MANNINEN et al., 2013), as políticas destinadas a aumentar a segurança do abastecimento (por exemplo, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis, incluindo a importação de gás natural), e a presença de uma rede de infraestrutura de distribuição e transporte de gás natural já existente.

A relevância da Europa na produção de biometano também é destacada por REN21 (2015). O país que apresenta o maior número de plantas de purificação de biometano em operação atualmente é a Alemanha. O substrato, majoritariamente, empregado são os resíduos agrícolas e culturas energéticas e o biometano é injetado na rede de distribuição de gás natural (EUROBSERV'ER, 2014). Já o Reino Unido, segundo país em termos de utilização de biogás, cujo substrato de destaque é o gás de aterro, apresenta maior produção de energia elétrica, enquanto a Suécia, segundo país em número de plantas de purificação de biogás, é comumente mencionada como caso de sucesso no uso de biometano como combustível veicular (EUROBSERVER, 2014; FERREIRA; MARQUES; MALICO, 2012) (Tabela 9) (Figura 26).

¹⁵ Tarifas *feed-in* constituem uma política governamental de incentivo ao uso de energias renováveis, utilizada há mais de duas décadas na União Europeia, baseada na determinação de um preço diferenciado e mais vantajoso na tarifa de energia paga ao gerador, que pode ser variável em função de características como, tecnologia utilizada, fonte, capacidade ou localização (COUTURE; CORY; WILLIAMS, 2010).

¹⁶ Os Certificados de Obrigação Renovável (do inglês, *Renewable Obligation Certificates*), principal mecanismo de incentivo à geração de energia renovável no Reino Unido, são certificados emitidos aos geradores de energia renovável pelo Departamento de Gás e Mercados de Eletricidade (do inglês, *Office of Gas and Electricity Markets*) no âmbito da política das “Obrigações Renováveis” daquele país. Os certificados são então negociados entre os geradores e fornecedores de energia, que os utilizam para comprovar o atingimento de suas metas referentes ao uso de energia renovável (OFGEM, 2016).

Tabela 9 – Produção de energia primária de biogás na Europa por tipo de substrato em 2013, em TJ.

País	Gás de aterro	Lodo de esgoto	Outro substrato*	Total
Alemanha	4.555	16.446	260.222	281.219
Reino Unido**	64.401	11.983	0	76.384
Itália	17.199	2.031	56.777	76.007
República Checa	1.210	1.658	21.039	23.911
França**	11.723	3.349	4.396	19.469
Holanda	1.030	2.420	9.224	12.678
Espanha**	5.192	1.248	4.287	10.722
Polônia	2.587	3.818	4.111	10.517
Áustria	155	770	7.310	8.240
Bélgica**	1.223	649	4.070	5.941
Suécia**	569	3.320	1.830	5.719
Dinamarca**	222	850	3.115	4.187
Grécia	2.826	674	201	3.701
Hungria	599	842	2.001	3.442
Eslováquia	142	620	2.031	2.788
Portugal	2.587	113	33	2.734
Finlândia	1.327	611	553	2.491
Irlanda**	1.805	314	226	2.345
Letônia**	770	239	1.168	2.177
Eslovênia	297	117	1.038	1.453
Romênia**	63	4	1.189	1.256
Croácia	88	134	536	754
Lituânia	297	151	201	649
Luxemburgo	4	54	477	536
Chipre	0	0	502	502
Estônia**	226	75	0	301
Bulgária	0	0	4	4
Malta	0	0	0	0
TOTAL UE	121.095	52.486	386.555	560.139

Fonte: EUROBSERV'ER (2014).

* Outros substratos incluem efluentes, resíduos agrícolas, resíduos alimentícios, culturas agrícolas ou energéticas; ** Informação estimada pelo autor a partir dos dados divulgados em 2012.

Figura 26 – Plantas de purificação de biogás na Europa, em dezembro de 2014.

Fonte: EBA (2014).

A partir dessas observações, foram estudadas as experiências da Alemanha, Reino Unido e Suécia, com relação à utilização de biogás e produção de biometano, visto que não foi possível identificar nenhum país que utilizasse especificamente como substrato principal o biogás de aterro para a produção de biometano e posterior injeção na rede de distribuição de gás natural ou uso como combustível veicular, o que corresponde exatamente ao objeto de estudo.

3.1. Alemanha

A Alemanha é o principal produtor mundial de biogás, principalmente utilizado na geração de eletricidade (1,6% do total de eletricidade consumida em 2008) e cogeração (3-4% do total de calor produzido por fontes renováveis em 2007) produzido, majoritariamente, a partir de dejetos e resíduos agrícolas (44%) em plantas de digestão de pequena escala e de culturas energéticas (33%) (POESCHL; WARD; OWENDE, 2010).

O biogás é utilizado como recurso energético na Alemanha desde a década de 1970 (SCOPE, 2015), mas a aprovação, em 2000, do Ato das Fontes Renováveis de Energia (do alemão, *Erneuerbare-Energien-Gesetz* – EGG) foi um marco importante para a sua rápida expansão, principalmente após suas revisões em 2004 e 2009 (Figura 27), que tiveram como objetivo incentivar a construção de plantas de menor capacidade (até 20MW_{el}) visando o desenvolvimento da área rural do país (FNR, 2013; POESCHL; WARD; OWENDE, 2010). O EGG determina que os geradores de eletricidade a partir de fontes renováveis de energia têm prioridade de conexão à rede e estabelece tarifas acordadas por 20 anos e diferenciadas segundo critérios como a escala da planta, fonte utilizada, entre outros (FNR, 2013).

Figura 27 – Plantas de biogás para geração de energia elétrica na Alemanha, 2003 a 2013.
Fonte: adaptado de FNR (2013).

A produção de biometano ganhou destaque na Alemanha, mais recentemente, a partir da implantação das primeiras plantas de purificação de biogás, em 2006 (STRAUCH; KRASSOWSKI; FRAUNHOFER UMSICHT, 2012). Em 2014, a Alemanha já contava com 152 plantas responsáveis pela injeção de 95.000 m³/h [sic] de biometano¹⁷ na rede de distribuição (Figura 28), e segundo as estimativas apresentadas pela agência alemã de energia, o potencial de produção de biometano no país é de 6 bilhões de metros cúbicos até 2020 e 10 bilhões de metros cúbicos até 2030 [sic] (DENA, 2014; FOREEST, 2012).

De acordo com DENA (2014), a produção de biometano alemã é fundamentalmente baseada em culturas agrícolas e, em 2013, segundo os dados obtidos da Agência Alemã de Energia e reportados por Eurobserv'er (2014), os principais substratos utilizados para a produção de biometano no país foram o milho (56,6%) e outras culturas energéticas (16,3%). No entanto, segundo IEA BIOENERGY TASK 37 (2015), a recente revisão do EGG, em 2014, limitou o uso de culturas energéticas para a produção de biogás, o que pode diminuir o crescimento da produção de biometano a partir desse substrato.

As principais tecnologias empregadas na purificação do biogás para a produção do biometano são a lavagem química (com aminas), lavagem com água e a técnica de modulação de pressão (PSA) (IEA BIOENERGY TASK 37, 2015).

¹⁷ O m³ é uma unidade derivada que expressa a grandeza volume no SI e a hora (h) é uma unidade tradicionalmente usada para expressar o tempo cujo uso é aceito pelo SI (INMETRO, 2012). Assim, a unidade m³/h exprime valores da grandeza vazão de gás. Ao longo da dissertação, quando dados de vazão forem apresentados, a unidade será mantida conforme adotada pelo autor consultado.

A maior parte do biometano produzido no país é injetado diretamente na rede de distribuição de gás natural, uma das mais extensas da Europa, que em 2012 possuía 436.204 km (STRAUCH; KRASSOWSKI; FRAUNHOFER UMSICHT, 2012). Em 2013, a Alemanha contava com 170 postos de abastecimento de biometano (IEA BIOENERGY TASK 37, 2015) e embora este número não seja tão expressivo quando comparado à extensão dos gasodutos, os principais avanços com relação ao uso final do biometano são observados em sua utilização como combustível veicular, em substituição ao gás natural comprimido, registrando em 2012, uma contribuição superior a 15% (EBA (2013). Em 2013, o biometano respondeu por 22% do combustível utilizado na frota de veículos alemã movida a gás (DENA, 2014).

Figura 28 – Plantas de purificação e injeção de biometano na rede na Alemanha, 2006 a 2014.

Fonte: adaptado a partir de DENA (2014).

As especificações técnicas do biogás consumido da Alemanha seguem a padronização determinada pela Associação Técnica e Científica Alemã para o Gás e Água (do alemão, Deutscher Verein des Gas und Wasserfaches) conforme detalhado nas “Planilhas ‘DVGW’” (do inglês, “DVGW” – *Worksheets*), que definem os critérios que devem ser obedecidos para a sua injeção na rede pública de distribuição. Para o biometano produzido no país, a padronização que deve ser observada pelos produtores e fornecedores está descrita nos documentos DVGW G 262 e G 260, que regulam utilização e injeção na rede de gases produzidos a partir de fontes renováveis. Essas normas não permitem a injeção em gasodutos do biometano obtido a partir de gás de aterros.

Apesar desta limitação, grande parte do avanço registrado pela Alemanha na produção e

uso do biometano pode ser creditado à existência de um intrincado marco regulatório e políticas de incentivo, apresentado resumidamente abaixo, a partir dos apontamentos de DENA (2014, 2016) e FNR (2013):

- Ato das Fontes Renováveis de Energia (do inglês, *Renewable Energy Sources Act*): o EGG (do alemão, *Erneuerbare-Energien-Gesetz*) foi implantado em 2000 e define as tarifas *feed-in* para a eletricidade gerada a partir de fontes renováveis. A lei não fornece incentivo direto aos produtores que injetam o biometano na rede, mas os beneficia indiretamente uma vez que estabelece valores adicionais sobre a tarifa paga aos produtores de eletricidade e calor que utilizem biometano obtido da rede de distribuição de gás.
- Decreto da Biomassa (do inglês, *Biomass Ordinance*): em vigor desde 2001, regula a aplicação da Lei das Fontes Renováveis de Energia, fornecendo a definição de biomassa, tecnologias elegíveis e critérios ambientais que devem ser observados na produção de energia renovável que utilizem biomassa. Esta norma aceita o uso de biogás obtido a partir da digestão anaeróbica, mas não permite que os benefícios decorrentes da aplicação do EGG sejam auferidos quando produzido a partir de resíduos sólidos domésticos.
- Decreto das tarifas da rede de distribuição de gás (do inglês, *Gas Network Tariffs Ordinance*): em vigor desde de 2005 e revisada em 2008, com o objetivo de promover a injeção de biogás na rede de distribuição, estabelece os critérios utilizados na definição das tarifas de acesso aos gasodutos. Em função das políticas de incentivo ao biometano, foi revisado para incluir o pagamento adicional de 0,7 EUR/kWh ao fornecedor de biogás pagos pelo operador da rede em função dos custos evitados pela descentralização da injeção.
- Decreto sobre as cotas de biocombustíveis (do inglês, *Biofuel Quota Ordinance*): aprovado em 2006, estabelece as cotas mínimas para adição de biocombustíveis ao petróleo e diesel utilizados em veículos. O biometano passou a ser considerado como biocombustível elegível a partir da revisão de 2009.
- Decreto de acessos aos gasodutos (do inglês, *Gas Network Access Ordinance*): revisado em 2010, para considerar acesso preferencial aos fornecedores de biometano, que arcam com apenas 25% dos custos de conexão (para distâncias menores que 10 km, contemplando a tubulação, estação de medição de pressão, compressor e estação de medição). Os outros 75% dos custos de conexão ficam a cargo dos operadores do

gasoduto, que devem garantir uma disponibilidade de no mínimo 96% da rede e preferência no transporte do biometano.

- Lei do Calor obtido de Fontes Renováveis (do inglês, *Renewable Energies Heat Act*): em vigor desde de 2009 e revisada em 2011, estabelece que 14% da demanda de calor alemã deve ser fornecida por fontes renováveis. De acordo com esta lei, os edifícios construídos a partir de janeiro de 2009, são obrigados a utilizar fontes renováveis de calor para suprir sua demanda de aquecimento. Este requisito é atingido quando 30% da demanda for suprida por biogás.
- Decreto sobre a geração de biocombustíveis a partir de biomassa (do inglês, *Ordinance on the Generation of Biofuels from Biomass*): em vigor desde 2010 e elaborada em consonância com as diretivas da União Europeia relacionadas à adequação ambiental da biomassa utilizada para a geração de energia, o decreto estabelece que apenas projetos que utilizem biomassa não oriunda de áreas protegidas e cujo uso incorra em uma redução de emissões de GEE maior em comparação ao uso de combustíveis fósseis são elegíveis a receberem subsídios financeiros e podem ser contabilizadas nas quotas de biocombustíveis.

3.2. Reino Unido

O biogás de aterros foi responsável, em 2014, por 17,3% da produção de energia elétrica a partir de fontes renováveis no Reino Unido, embora seu crescimento, quando comparado ao uso de outras fontes de bioenergia (por exemplo, lodo de esgoto, biomassa animal e vegetal), tenha se mantido estável e diminuído de importância, frente ao crescimento do uso de culturas energéticas para a produção de eletricidade, tendência observada, principalmente, nos últimos 10 anos (Figura 29).

Figura 29 – Participação das fontes de bioenergia na produção de eletricidade do Reino Unido de 1994 a 2014.

Fonte: a autora a partir de DECC (2014).

(1) apenas a fração biodegradável; (2) inclui combustão de cama de frango, carne e osso; (3) inclui palha e culturas energéticas; (4) inclui digestão de resíduos agrícolas e outros.

A indústria de biometano no Reino Unido ainda está em desenvolvimento. Desse modo, não existem estatísticas oficiais sobre a quantidade de biometano utilizado como combustível veicular, mas algumas iniciativas isoladas são reportadas por IEA BIOENERGY TASK 37 (2015). Contudo, a rede de distribuição de gás natural da região é extensa, e segundo Strauch, Kressowski e Fraunhofer Umsicht (2012), apresentava, em 2012, uma extensão de mais de 280.000 km. Para Thrän et al. (2014), este fato, em adição aos esquemas implantados para fomentar sua injeção na rede, pode favorecer a produção de biometano para propósitos veiculares.

A conexão de plantas de biometano à rede de distribuição de gás não é prioritária em relação às outras fontes, mas o governo não impõe restrições ao substrato utilizado para a produção de biometano, o que significa que as plantas de purificação de biogás de aterro estão autorizadas a usar a rede de distribuição desde que cumpram com as especificações técnicas estabelecidas pela agência reguladora (STRAUCH; KRASSOWSKI; FRAUNHOFER UMSICHT, 2012). No entanto, a recente expansão na produção de biometano, que em 2015 atingiu uma capacidade de 19.470 Nm³/h, é totalmente oriunda de plantas de digestão anaeróbica, majoritariamente de culturas energéticas (20 plantas do total de 30) (Figura 30).

Figura 30 - Plantas de purificação e injeção de biometano na rede no Reino Unido, 2009 a 2015.

Fonte: a autora a partir de NNFFC (2015).

* A Associação Europeia de Biogás reportava em dezembro de 2014 a existência de 37 plantas, mas os dados utilizados no gráfico foram considerados mais completos por apresentarem a capacidade de produção e substrato utilizado.

O estabelecimento de tarifas *feed-in* e outros mecanismos de incentivo destinados a alavancar a produção de biogás no Reino Unido está ancorado em objetivos relacionados à diminuição do aterramento de resíduos e produção de gás natural, determinados a partir das Diretivas Europeias Biogas UK¹⁸ (2013 apud SCOPE, 2015). A meta do governo em relação ao uso de energias renováveis é substituir em 15% o consumo de combustíveis fósseis até 2020 (STRAUCH; KRASSOWSKI; FRAUNHOFER UMSICHT, 2012).

As principais políticas, normas e mecanismos de incentivo em vigor no Reino Unido são (NNFCC, 2016; STRAUCH; KRASSOWSKI; FRAUNHOFER UMSICHT, 2012; STRAUCH; KRASSOWSKI; SINGHAL, 2013):

- Isenção da taxa de mudanças climáticas (do inglês, *Exemption from Climate Change Levy*): desde 2001, geradores de eletricidade que utilizem fontes renováveis de energia estão isentos do pagamento da taxa de mudanças climáticas. A cogeração a partir de fontes renováveis foi incluída nesse esquema de incentivos a partir de 2003.
- Obrigações de fontes renováveis (do inglês, *Renewables Obligation*): implantado em 2002, corresponde ao principal mecanismo de incentivo à geração de eletricidade a partir de fontes renováveis. Está baseado na emissão de Certificados de Obrigações de Fontes Renováveis (do inglês, *Renewable Obligation Certificates* - ROCs) que são emitidos em favor dos geradores que, por sua vez, os negociam com os fornecedores de

¹⁸ Biogas UK. **Incentives**. Disponível em: <<http://www.biogas-info.co.uk/index.php/incentives-qa.html>>. Acesso em: set. 2014.

eletricidade, os quais possuem metas com relação ao fornecimento de eletricidade por fontes renováveis. A partir de 2017, este esquema será totalmente substituído no Reino Unido, com exceção da Irlanda do Norte, pelos Contratos Diferenciados (do inglês, *Contracts for Difference*), aprovado em 2014. Até sua completa entrada em vigor, os novos geradores podem optar entre os dois esquemas.

- Obrigações de combustíveis renováveis para o transporte (do inglês, *Renewable Transport Fuel Obligation*): à semelhança do estabelecido para os geradores de eletricidade, este esquema estabelece que os fornecedores de combustíveis devem garantir que uma parcela do combustível vendido aos consumidores seja de origem renovável. A lei está em vigor desde 2007 tendo sido revisada posteriormente. A revisão de 2011 incorporou os objetivos de utilização de fontes renováveis no setor de transporte estabelecidos pela União Europeia.
- Tarifas *feed-in* (do inglês, *Feed-in tariffs*): em vigor a partir de 2010, apenas plantas de digestão anaeróbica com capacidade inferior à 5MW e operacionais a partir de julho de 2009, estão aptas a receber uma tarifa diferenciada por 20 anos.
- Incentivo à geração térmica renovável (do inglês, *Renewables Heat Incentive*): considerado o principal mecanismo de incentivo ao biometano, está em vigor desde 2011 para os setores industrial, comercial e público, e desde 2014 para os setores privados, e determina uma receita fixa, pelo prazo de 20 anos, aos geradores de energia térmica e produtores de biogás e biometano. A receita varia em função da escala da planta de digestão anaeróbica e da localização: plantas localizadas na Irlanda do Norte recebem uma tarifa diferenciada. Não existe distinção pela escala da planta de biometano, mas apenas com relação a sua localização, de maneira semelhante às plantas de digestão anaeróbica.

A emissão dos certificados previstos nos esquemas descritos acima está condicionada à comprovação de que o substrato utilizado é renovável. Assim, a Agência Ambiental do Reino Unido aprovou diversos protocolos para assegurar a origem do substrato utilizado. Uma vez que o biometano produzido cumpre com as especificações do protocolo de qualidade, ele está apto a ser utilizado em equipamentos originalmente projetados para utilizar gás natural ou injetado na rede de distribuição de gás (WRAP; ENVIRONMENT AGENCY, 2013).

3.3. Suécia

A produção de biogás na Suécia teve início na década de 1960, primeiramente como forma de reduzir o volume de efluentes nas estações de tratamento. Dada a crise do petróleo na década de 1970, além de combater problemas ambientais, o biogás começou a ser utilizado como recurso energético, com vistas a diminuir a dependência do país ao petróleo. Especificamente, os aterros sanitários suecos iniciaram a exploração do biogás nas décadas de 1980 e 1990 (ENERGIGAS SVERIGE, 2011).

Em 2013, a Suécia produziu aproximadamente 1,7TWh de biogás [sic], provenientes majoritariamente das estações de tratamento de esgoto (40%), plantas de digestão anaeróbica (34%) e aterros sanitários (14%) (Figura 31). A estável contribuição da produção de biogás em plantas de tratamento esgoto pode ser atribuída à legislação nacional que determina a obrigatoriedade de seu tratamento e recuperação energética (LÖNNQVIST; SANCHES-PEREIRA; SANDBERG, 2015).

O uso de outros substratos em detrimento do gás de aterro tem se intensificado e pode ser explicado pela proibição do aterramento de resíduos no país a partir de 2005. Adicionalmente, o governo estabeleceu como meta a ser atingida até 2020 que ao menos 35% dos resíduos alimentares das casas, restaurantes e comércio devem ser reciclados via tratamento biológico, que pode ser realizado em plantas de compostagem ou produção de biogás. Essa medida também contribuiu para o crescimento dos outros substratos frente ao gás de aterros (ENERGIGAS SVERIGE, 2011).

Figura 31 –Produção de biogás na Suécia, por tipo de planta, 2005 a 2013.

Fonte: a autora a partir de Swedish Energy Agency (2015).

* unidade utilizada pelo o autor para reportar a informação.

Em 2009, aproximadamente 35% do biogás produzido na Suécia foi destinado à produção de biometano, utilizado principalmente como combustível veicular (Figura 32). Já em 2013, a proporção de biogás purificado alcançou mais de 50% do total de biogás produzido no país, sendo consumido majoritariamente no setor de transportes, como reportado por IEA BIOENERGY TASK 37 (2015). De fato, o uso de biometano como combustível veicular segue bastante popular na Suécia, onde, segundo Svensson¹⁹ (2013 *apud* EBA, 2013), o consumo de biometano em 2012 ultrapassou o do GNC, com 57% do mercado.

Figura 32 – Usos finais do biogás na Suécia em 2009.

Fonte: a autora, a partir de ENERGIGAS SVERIGE (2011).

A malha de gasodutos da Suécia não é extensa. Em 2011, as linhas de transmissão de gás somavam 620 km de extensão, e se concentravam no sudoeste do país (STRAUCH; KRASSOWSKI; FRAUNHOFER UMSICHT, 2012). Isso contribuiu para que a maior parte do biometano produzido no país não seja, de fato, injetado na rede de gasodutos (EUROBSERV'ER, 2014). A falta de infraestrutura de distribuição também explica o esforço da Suécia em fomentar o consumo de biometano no setor de transportes (FOREEST, 2012; IEA BIOENERGY TASK 37, 2015; STRAUCH; KRASSOWSKI; FRAUNHOFER UMSICHT, 2012; THRÄN et al., 2014).

Também contribuíram para o sucesso do uso veicular do biometano na Suécia, o desenvolvimento da frota de veículos movida a gás natural (LONNQVIST; SILVEIRA;

¹⁹ Mattias Svensson (2013): Production and potential of biomethane as a vehicle fuel: <http://www.greengasgrids.eu/sites/default/files/files/Production%20and%20potential%20of%20biomethane%20as%20a%20vehicle%20fuel%20-%20Mattias%20Svensson.pdf>

SANCHES-PEREIRA, 2013) e a existência, em 2015, de 210 estações de abastecimento com biometano (IEA BIOENERGY TASK 37, 2015). Essas duas condicionantes são apontadas como fatores contribuintes do sucesso obtido pela Suécia no cumprimento antecipado da meta de utilização de 10% de energia renovável no setor de transportes até 2020, imposta pela Diretiva Europeia 2009/28/EC (LÖNNQVIST; SANCHES-PEREIRA; SANDBERG, 2015; MÅNSSON; SANCHES-PEREIRA; HERMANN, 2014).

O biometano não é diretamente regulado na Suécia e seu uso segue a mesma legislação aplicável ao gás natural, sendo a principal o Ato do Gás Natural (do inglês, *Natural Gas Act*) que reconhece o biogás e o gás produzido a partir da biomassa e permite sua injeção na rede desde que atenda às especificações técnicas determinadas pelo operador do gasoduto. O uso como combustível veicular do biogás produzido a partir de gás de aterros é tecnicamente impedido, por não atender às especificações da norma SS 15 54 38 (1999) “*Motor fuels – Biogas as fuel for high-speed otto engines*” (GREEN GAS GRIDS, 2014).

Para Svensson (2015a), o desenvolvimento do mercado para o biometano, principalmente aquele destinado ao setor de transportes, foi ancorado nas estratégias nacionais relacionadas ao cumprimento das Diretivas Europeias, como o uso de 50% de energia a partir de fontes renováveis, sendo 10% no setor de transporte, as quais já foram atingidas, e setor de transportes livre de combustíveis fósseis até 2050.

Os principais mecanismos de incentivo destacados por IEA BIOENERGY TASK 37 (2015) e Svensson (2015b) para que o uso do biometano veicular seja tão proeminente no país são: isenção da taxa de CO₂ e energia para o biogás (válida até 2015 com prorrogação pendente de aprovação) e redução no imposto de renda de empresas que mantenham uma frota movida à gás. Além desses, Ferreira, Marques e Malico (2012) fazem menção à criação de um conjunto de medidas para aumentar o número de bombas de combustíveis alternativos e o uso de carros movidos a biocombustíveis.

Com relação à geração de eletricidade a partir do biogás, Ferreira, Marques e Malico (2012) e IEA BIOENERGY TASK 37 (2015) destacam como incentivo o mercado certificado de eletricidade, formado em 2003 em conjunto com a Noruega, no qual os geradores recebem um certificado para cada MWh gerado a partir de fontes renováveis, negociado com os consumidores que recebem cotas para o consumo de energia renováveis, e um bônus na tarifa de eletricidade produzida a partir de esterco.

4. CONTEXTO BRASILEIRO PARA O USO DO BIOMETANO

4.1. Cenário legal e normativo aplicável ao biometano

4.1.1. Conjuntura nacional

Apesar da ausência de normas que estabelecessem os critérios necessários ao seu aproveitamento energético, como por exemplo, tipos de usos finais permitidos em função do substrato utilizado, especificações físico-químicas, entre outros, a purificação do biogás para a produção de biometano tem se intensificado nos últimos anos e questionamentos referentes à implantação das primeiras experiências nacionais começaram a ser encaminhados, no início de 2013, à ANP (ANP, 2015b). Em parte, a elaboração dessas normas é importante dadas as características específicas do biogás, como a presença de contaminantes. Mas sobretudo, a normatização da produção do biometano se faz importante face à aprovação de diversas políticas, planos e programas que têm como objetivo aprimorar a gestão de resíduos no país e que consideram, entre outras alternativas, a geração de energia como possível forma de tratamento.

Em tramitação no Congresso Nacional desde 1991, o PL 203/91, que dispunha "*sobre o acondicionamento, a coleta, o tratamento, o transporte e a destinação final dos resíduos de serviços de saúde*", foi aprovado em 2010 e instituiu a PNRS, a partir da sanção da Lei 12.305, de 02 de agosto de 2010, regulamentada pelo Decreto Nº. 7404/2010, de 23 de dezembro de 2010.

A PNRS exige que os municípios adequem a destinação final de seus resíduos, incluindo a disposição final dos rejeitos, o que implica na construção de novas áreas para disposição final de resíduos sólidos urbanos ou ajuste das áreas existentes. Inicialmente os lixões existentes no país deveriam ter sido encerrados em 02 de agosto de 2014, conforme consta no artigo 54 da PNRS. Este prazo foi postergado a partir da aprovação do PL 425/2014 que revisa a redação do artigo 54 da PNRS e sugere que o encerramento destes espaços seja feito de maneira escalonada, como segue:

“Art. 54. A disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, observado o disposto no § 1º do art. 9º, deverá ser implantada nos seguintes prazos:

I – até 31 de julho de 2018, para capitais de Estados e de Municípios integrantes de Região Metropolitana (RM) ou de Região Integrada de Desenvolvimento (Ride) de capitais;

II – até 31 de julho de 2019, para Municípios com população superior a 100.000 (cem mil) habitantes no Censo 2010, bem como para Municípios cuja mancha urbana da sede municipal esteja situada a menos de 20 (vinte) quilômetros da fronteira com outros países limítrofes;

III – até 31 de julho de 2020, para Municípios com população entre 50.000 (cinquenta mil) e 100.000 (cem mil) habitantes no Censo 2010;

IV – até 31 de julho de 2021, para Municípios com população inferior a 50.000 (cinquenta mil) habitantes no Censo 2010. (BRASIL, 2014a, p. 2)

No entanto, é entendimento do MMA que o prazo para a erradicação da prática de disposição de resíduos em vazadouros a céu aberto não deve ser estendido, uma vez que se configura um crime ambiental previsto em legislação (RIBEIRO, 2014).

Adicionalmente, a PNRS faz importante distinção entre o aproveitamento energético dos resíduos sólidos e o aproveitamento energético dos gases gerados nas unidades de disposição final. O texto da lei não coíbe a aplicação de nenhuma tecnologia para o tratamento de resíduos, como a incineração ou gaseificação.

“Art. 9º Na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, deve ser observada a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.

§ 1º Poderão ser utilizadas tecnologias visando à recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos, desde que tenha sido comprovada sua viabilidade técnica e ambiental e com a implantação de programa de monitoramento de emissão de gases tóxicos aprovado pelo órgão ambiental.” (BRASIL, 2010a, p. 2)

Todavia, essas últimas sujeitas à regulação específica que segundo decreto que regulamenta a PNRS não se aplica ao aproveitamento dos gases pela biodigestão ou recuperação forçada de gás de aterro:

Art. 37. A recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos referida no § 1º do art. 9º da Lei nº 12.305, de 2010, assim qualificados consoante o art. 13, inciso I, alínea “c”, daquela Lei, deverá ser disciplinada, de forma específica, em ato conjunto dos Ministérios do Meio Ambiente, de Minas e Energia e das Cidades.

Parágrafo único. O disposto neste artigo não se aplica ao aproveitamento energético dos gases gerados na biodigestão e na decomposição da matéria orgânica dos resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários.” (BRASIL, 2010b, p. 3).

A PNRS determina a segregação prévia da fração úmida dos resíduos sólidos, correspondente à matéria orgânica, a qual deve ser encaminhada a tratamento, como a compostagem e aproveitamento energético do biogás gerado em processos de biodigestão ou em aterros sanitários. Em linha com esta determinação, o Plano Nacional de Resíduos Sólidos, enquanto instrumento das diretrizes da PNRS, estipula as metas para a redução da matéria orgânica (o que pode ser interpretado como o estabelecimento de metas para a consolidação de programas de separação na fonte) (Tabela 10).

Tabela 10 – Metas de redução da fração úmida de resíduos, em %.

	2015	2019	2023	2027	2031
Brasil	19	28	38	46	53
Norte	10	20	30	40	50
Nordeste	15	20	30	40	50
Sul	30	40	50	55	60
Sudeste	25	35	45	50	55
Centro-oeste	15	25	35	45	50

Fonte: modificado de MMA (2012, p. 85).

Especificamente em relação à utilização do biogás gerado em aterros sanitários para fins energéticos, a PNRS estabelece em seu artigo 15, inciso IV, que, sob a coordenação do Ministério do Meio Ambiente, serão consideradas metas para o aproveitamento energético dos gases gerados em unidades de disposição final:

“Art. 15. A União elaborará, sob a coordenação do Ministério do Meio Ambiente, o Plano Nacional de Resíduos Sólidos, com vigência por prazo indeterminado e horizonte de 20 (vinte) anos, a ser atualizado a cada 4 (quatro) anos, tendo como conteúdo mínimo:

(...)

IV - metas para o aproveitamento energético dos gases gerados nas unidades de disposição final de resíduos sólidos (...).” (BRASIL, 2010a, p. 2)

Uma primeira versão do Plano Nacional de Resíduos Sólidos foi elaborada em 2011 para subsidiar as consultas públicas. Em 2012, o documento foi atualizado, mas ainda ao final de 2015, carecia de aprovação por meio de decreto. Ambas as versões do Plano Nacional de Resíduos Sólidos reconhecem a disponibilidade de biogás de aterros sanitários para sua utilização com finalidade energética e como este recurso é subutilizado. Segundo tais documentos, *“o aproveitamento de biogás [...] para produção de energia no Brasil [...] ainda é incipiente no país.”* (MMA, 2011, p. 18, 2012, p. 18).

A versão preliminar do Plano Nacional de Resíduos Sólidos estabeleceu três cenários para

a recuperação energética de gases gerados em aterros sanitários, sendo que o cenário desfavorável foi adotado na versão final do Plano (Tabela 11). Embora a PNRS não direcione o uso final do biogás de aterro, o estudo conduzido pelo PNUD, que foi utilizado como subsídio à elaboração dessas metas, apenas considerou a geração de eletricidade a partir do biogás de aterros (PNUD; MMA; ARCADIS TETRPLAN, 2010).

Tabela 11 – Metas nacionais para exploração do potencial energético de gás de aterro, capacidade instalada em MW.

		2015	2019	2023	2027	2031
Versão 2011	Favorável	80	150	250	300	300
	Intermediário	60	130	200	250	300
	Desfavorável	50	100	150	200	250
Versão 2012		50	100	150	200	250

Fonte: a autora a partir de MMA (2011, p. 92, 2012, p. 86).

A ANEEL, enquanto agência reguladora e fiscalizadora de geração de energia elétrica em âmbito nacional, preocupa-se em estabelecer regulamentação específica para a promoção da utilização do biogás como recurso disponível para a geração de eletricidade, incluindo a consideração do biogás como fonte elegível a participação nos leilões de energia e isenções de tarifas (aplicáveis ao uso do sistema de transmissão e distribuição), para projetos de geração de energia que utilizem o biogás de aterros. A tabela 11 apresenta, de maneira não exaustiva, algumas normas estabelecidas por essa agência em favor da utilização do biogás.

Tabela 12 – Normas e atos da ANEEL para a promoção do biogás de aterros.

Norma	Conteúdo
Resolução Normativa 077, de 19.08.2004	Estabelece os procedimentos vinculados à redução das tarifas de uso dos sistemas elétricos de transmissão e de distribuição, para empreendimentos hidrelétricos de geração, caracterizados como Pequena Central Hidrelétrica, e aqueles com fonte solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, com potência instalada menor ou igual a 30.000 kW.
Resolução Normativa 271, de 18.07.2007	Altera a redação dos arts. 1º e 3º da Resolução Normativa ANEEL 077 de 18.08.2004, que estabelece os procedimentos vinculados à redução das tarifas de uso dos sistemas elétricos de transmissão e de distribuição, para empreendimentos hidrelétricos, caracterizados como Pequena Central Hidrelétrica, e aqueles com fonte solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, com potência instalada menor ou igual a 30.000 kW.
Resolução autorizativa 1482, de 20.08.2008	Autoriza o Programa de Geração Distribuída com Saneamento Ambiental, como projeto piloto de implantação de geração distribuída, em baixa tensão, apresentado pela Companhia Paranaense de Energia - COPEL ²⁰ .

continua...

²⁰ Programa desenvolvido pela Companhia Paranaense de Energia (COPEL) para incentivar a geração distribuída de pequena escala a partir do biogás em propriedades agrícolas do estado com o objetivo de promover, simultaneamente, uma melhora nas condições de saneamento dessas propriedades e uma diminuição da eutrofização dos recursos hídricos regionais, fenômeno prejudicial à geração de eletricidade pelas usinas hidrelétricas do estado (COPEL, 2009).

continuação

Tabela 12 - Normas e atos da ANEEL para a promoção do biogás de aterros.

Norma	Conteúdo
Resolução Homologatória 1807, de 01.10.2014	Aprova o Edital do Leilão ANEEL 008 de 2014 e seus Anexos, denominado LER de 2014 ou 6º LER, o qual se destina à contratação de energia de reserva proveniente de empreendimentos de geração a partir de fontes solar fotovoltaica, eólica e biomassa composta de resíduos sólidos urbanos e/ou biogás de aterro sanitário ou biodigestores de resíduos vegetais ou animais, assim como lodos de estações de tratamento de esgoto, para início de suprimento em 01.10.2017, e estabelece as TUST e as TUSDg de referência para as centrais geradoras que participarem do aludido certame.

Fonte: a autora a partir de ANEEL (2016).

Com relação ao uso do biogás como biocombustível passível de ser injetado em rede de distribuição de gás natural e utilizado como combustível veicular, reconhecendo o uso do biogás como biocombustível, e, em parte, motivada pela aprovação da PNRS, que em seu Artigo 9º dispõe sobre tecnologias de recuperação energética a partir de resíduos sólidos, no início de 2015, a ANP elaborou a resolução que trata das especificações do biometano, conforme explicitado no preâmbulo da regulamentação (ANP, 2015a, p. 1).

Anteriormente à aprovação da norma da ANP, era entendimento comum de empreendedores que àquela época desenvolviam projetos de purificação de biogás, que a Resolução ANP nº 16/2008, que trata das propriedades físico-químicas do gás natural, seriam suficientes para legitimar a injeção do biometano na rede de distribuição de gás natural e seu uso veicular. Porém, as especificidades do biogás e, principalmente, do biometano produzido a partir de gás de aterros, relacionadas à presença de contaminantes, como os siloxanos, foram determinantes na elaboração de regulamentação específica (CALDEIRA, 2013).

De acordo com a resolução, está proibida, quando o substrato utilizado para a produção do biometano for o gás de aterro, sua mistura ao gás natural:

*“Art. 5º O Biometano que atenda à especificação estabelecida no Regulamento Técnico, parte integrante desta Resolução, poderá ser misturado ao gás natural.
§ 1º Não se aplica o disposto no caput ao Biometano oriundo de resíduos sólidos urbanos ou resíduos de esgotamento sanitário.” (ANP, 2015a, p. 1)*

A especificação aprovada pela ANP referente ao biometano também exige autorização

prévia da agência para o uso experimental ou específico²¹ desse recurso que supere um consumo mensal de 10.000 Nm³, estando dispensados os casos em que o biometano é destinado ao consumo industrial (artigos 11 e 12):

“Art. 11. Fica alterado o art. 1º da Resolução ANP nº 23, de 13 de agosto de 2012, que passa a vigorar com a seguinte redação:

Art. 1º Fica sujeita à autorização prévia da ANP a utilização de Biocombustíveis não Especificados e de suas misturas com combustíveis e/ou biocombustíveis especificados no país, destinados ao Uso Experimental ou ao Uso Específico, caso o Consumo Mensal seja superior a 10.000 litros para combustíveis líquidos e 10.000 Nm³ (a 20°C e 1 atm) para combustíveis gasosos.

Art. 12. Ficam incluídos os incisos I e II ao § 1º do art. 1 da Resolução ANP nº 23, de 13 de agosto de 2012:

I - Fica dispensada a autorização para Uso Experimental e Específico de biocombustível gasoso não especificado e de suas misturas com combustíveis e/ou biocombustíveis especificados em Equipamentos de Uso Industrial, desde que tenha sido comprovada sua viabilidade técnica e ambiental e com a implantação de programa de monitoramento de emissão de gases tóxicos aprovado pelo órgão ambiental, nos termos do art. 9º da Lei nº 12.305/2010;

II - Na hipótese do inciso I, ficam os agentes envolvidos na comercialização e uso responsáveis pelos eventuais danos causados aos equipamentos empregados, ao meio ambiente e outros.” (ANP, 2015a, p. 2)

De maneira análoga ao verificado pela regulamentação aprovada pela ANEEL nos últimos anos em favor da utilização do biogás, também a ANP conta com normas que favorecem a utilização do biogás enquanto biocombustível. A tabela abaixo elenca, de maneira não exaustiva, a regulação aprovada nos últimos anos pela ANP, que tratam do gás natural e biocombustíveis, em específico, biometano.

²¹ De acordo com a Resolução ANP 23/2012, uso específico é definido como a “utilização de Biocombustível(is) não Especificado(s) e suas misturas com combustíveis e/ou biocombustíveis especificados em Frota Cativa ou Equipamento de Uso Industrial em substituição parcial ou total de um combustível especificado pela ANP” (inciso XII, Art. 12, (ANP, 2012, p. 1)) e uso experimental consiste da “utilização de Biocombustível(is) não Especificado(s) e suas misturas com combustíveis e/ou biocombustíveis especificados, em quantidade delimitada e por prazo determinado, em Frota Cativa ou Equipamento de Uso Industrial, para fins de avaliação e comparação com um combustível especificado pela ANP” (inciso XIII, Art 12, (ANP, 2012, p. 1))

Tabela 13 – Legislação ANP sobre o uso de gás natural, biogás e biometano.

Legislação	Conteúdo
Portaria ANP 43, de 15.04.1998	Estabelece a regulamentação para a importação de gás natural.
Portaria ANP 152, de 15.10.1998	Classifica como Derivados Básicos os hidrocarbonetos obtidos através do refino do petróleo de poço ou de xisto, bem como as frações recuperáveis do gás natural.
Portaria ANP 118, de 11.07.2000	Regulamenta as atividades de distribuição de gás natural liquefeito (GNL) a granel e de construção, ampliação e operação das centrais de distribuição de GNL.
Portaria ANP 254, de 11.09. 2001	Regulamenta a resolução de conflito de que trata o art. 58 da Lei nº 9.478, de 6 de agosto de 1997. (Art. 58. Será facultado a qualquer interessado o uso dos dutos de transporte e dos terminais marítimos existentes ou a serem construídos, com exceção dos terminais de Gás Natural Liquefeito - GNL, mediante remuneração adequada ao titular das instalações ou da capacidade de movimentação de gás natural, nos termos da lei e da regulamentação aplicável.)
Portaria ANP 45, de 09.04.2002	Estabelece as Parcelas Referenciais de Transporte (TREF) para o cálculo dos preços máximos do gás natural de produção nacional para vendas à vista às empresas concessionárias de gás canalizado.
Portaria ANP 1, de 06.01.2003	Estabelece os procedimentos para o envio das informações referentes às atividades de transporte e de compra e venda de gás natural ao mercado, aos Carregadores e à Agência Nacional do Petróleo- ANP.
Resolução ANP 27, de 14.10.2005	Regulamenta o uso das instalações de transporte dutoviário de gás natural, mediante remuneração adequada ao Transportador.
Resolução ANP 28, 14.10.2005	Regulamenta a cessão de capacidade contratada de transporte dutoviário de gás natural.
Resolução ANP 15, de 14.03.2014	Estabelece os critérios para cálculo das Tarifas de Transporte referentes aos Serviços de Transporte firme, interruptível e extraordinário de gás natural; e o procedimento para a aprovação das propostas de Tarifa de Transporte de gás natural encaminhadas pelos Transportadores para os Gasodutos de Transporte objeto de autorização. (Revoga a Resolução ANP nº 29, de 14 de outubro de 2005).
Resolução ANP 41, DE 05.12.2007	Regulamenta a atividade de Distribuição de Gás Natural Comprimido (GNC) a Granel, a realização de Projeto para Uso Próprio e de Projeto Estruturante.
Resolução ANP 16, de 17.06.2008	Estabelece a especificação do gás natural, nacional ou importado, a ser comercializado em todo o território nacional
Resolução ANP 44, de 22.12.2009	Estabelece o procedimento para comunicação de incidentes, a ser adotado pelos concessionários e empresas autorizadas pela ANP a exercer as atividades da indústria do petróleo, do gás natural e dos biocombustíveis, bem como distribuição e revenda.
Resolução ANP 47, de 21.12.2012	Aprova Regulamento Técnico para o Credenciamento das Instituições de Pesquisa e Desenvolvimento.
Resolução ANP 23, de 13.08.2012	Dispõe sobre a autorização prévia da ANP a utilização de Biocombustíveis não Especificados e de suas misturas com combustíveis e/ou biocombustíveis especificados no país, destinados ao Uso Experimental ou ao Uso Específico, caso o Consumo Mensal seja superior a 10.000 litros para combustíveis líquidos e 10.000 Nm ³ (a 20°C e 1 atm) para combustíveis gasosos.
Resolução ANP 41, de 05.11.2013	Resolução ANP Nº 41, de 5.11.2013, que por sua vez estabelece os requisitos necessários à autorização para o exercício da atividade de revenda varejista de combustíveis automotivos e a sua regulamentação.
Resolução ANP 8, de 30.01.2015	Estabelece as especificações do Biometano.
Resolução ANP 52, de 02.12.2015	Estabelece a regulamentação para a construção, a ampliação e a operação de instalações de movimentação de petróleo, seus derivados, gás natural, inclusive liquefeito (GNL), biocombustíveis e demais produtos regulados pela ANP (Revoga a PANP 170, 1998 - Estabelece a regulamentação para a construção, a ampliação e a operação de instalações de transporte ou de transferência de petróleo, seus derivados e gás natural, inclusive liquefeito (GNL) [Redação original] biodiesel e misturas óleo diesel/biodiesel.)

Fonte: a autora a partir de ANP (2016a).

Convém destacar, em adição às normas elencadas acima, uma vez que o biometano

enquanto biocombustível se configura como potencial substituto do gás natural de origem fóssil, duas importantes leis do setor de energia que introduziram mudanças na indústria de gás natural brasileira: a Lei do Petróleo (Lei nº 9.478/97) e a Lei do Gás (Lei nº 11.909/09). Estas leis retiraram a exclusividade da execução do transporte energético de petróleo e gás natural por dutos, conseqüentemente, abriu espaço para a execução novos agentes na cadeia de suprimento gás natural²² (ANP, 2011).

Por fim, há que se destacar o papel da ABNT, uma entidade sem fins lucrativos, integrante da Organização Internacional de Normalização (do inglês, *International Organization for Standardization – ISO*) e reconhecida pelo governo brasileiro como responsável por estabelecer normas que visem a produção, comercialização e o uso de bens e serviços de maneira “(...) competitiva e sustentável nos mercados interno e externo, contribuindo para o desenvolvimento científico e tecnológico, proteção do meio ambiente e defesa do consumidor” (ABNT, 2014).

Desse modo, em adição à regulação imposta pela ANP, a posição da entidade com respeito à implantação de normas que possuam influência na produção, comercialização e consumo de biometano é relevante. Entre as normas e procedimentos aprovados pela Associação e de interesse da produção de biometano a partir do gás de aterros, destacam-se as normas relacionadas a construção e operação de aterros sanitários, mas até julho de 2015 o grupo de trabalho formado para discutir a normatização não havia aprovado os critérios para a produção, distribuição e comercialização de biometano no país (ABEGÁS, 2015).

4.1.2. Conjuntura legal e normativa regional

Além do planejamento executado em nível federal, a PNRS estabeleceu a elaboração dos planos de resíduos nas esferas estaduais e municipais, os quais devem ser disponibilizados publicamente no Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos (SINIR), conforme previsto como explicitado no artigo 74, parágrafo 3 do Decreto que regulamenta a PNRS:

“Art. 74. O Ministério do Meio Ambiente apoiará os Estados, o Distrito Federal, os Municípios e os respectivos órgãos executores do SISNAMA na organização das informações, no desenvolvimento dos instrumentos e no financiamento das ações

²² A seção 4.2 *Aplicações e perspectivas de expansão da produção e uso do biometano* apresenta a descrição da cadeia de suprimento de gás natural.

voltadas à implantação e manutenção do SINIR.

(...)

§ 3º Os planos de gestão de resíduos sólidos deverão ser disponibilizados pelos respectivos responsáveis no SINIR.” (BRASIL, 2010b, p. 5)

A elaboração desses planos, pelos Estados e Municípios, é condição para que estes possam obter acesso aos recursos da União destinados aos empreendimentos e serviços relacionados à gestão de resíduos sólidos, como definido nos artigos 16 e 18 da PNRS, e deveriam ter sido publicamente disponibilizados, no SINIR, inicialmente, dois (2) anos após a publicação da Lei, ou seja, em 2012, como estabelecido no artigo 55 da PNRS. Em levantamento conduzido pelo MMA, até o início de 2015, apenas oito estados contavam com planos de resíduos aprovados (MMA, 2015).

Segundo a PNRS, os municípios podem elaborar seus planos municipais de gestão integrada de resíduos em conjunto com o Plano de Saneamento Básico e desenvolvê-los de maneira integrada com outros municípios. Além disso, a PNRS determina um conteúdo mínimo simplificado para os municípios com menos de 20.000 habitantes. No entanto, levantamento conduzido pelo IBGE em 2013 apontava para a elaboração de planos de resíduos sólidos em apenas 33% dos municípios brasileiros²³ (IBGE, 2014) distribuídos entre as regiões geográficas do Brasil conforme descrito na Figura 33.

Figura 33 – Municípios com planos de gestão de resíduos sólidos aprovados em 2013.

Fonte: a autora a partir de IBGE (2014).

Assim, de maneira semelhante à prorrogação dos prazos para encerramento dos lixões,

²³ Inclui municípios que optaram por elaborar seus planos em consórcio com outros municípios.

também em relação à apresentação dos planos estaduais e municipais de resíduos sólidos a PNRS foi alterada, a partir da aprovação pelo Congresso Nacional do PL 425/2014:

“Art. 55. O disposto nos arts. 16 e 18 entra em vigor nos seguintes prazos:

I – até 31 de julho de 2017, para Estados e para Municípios com população igual ou superior a 50.000 (cinquenta mil) habitantes no Censo 2010;

II – até 31 de julho de 2018, para Municípios com população inferior a 50.000 (cinquenta mil) habitantes no Censo 2010. Parágrafo único. Os Estados deverão apoiar os Municípios nos estudos de regionalização, na formação de consórcios públicos e no licenciamento ambiental.” (BRASIL, 2014a, p. 2)

A falta de elaboração dos planos de resíduos Estaduais e Municipais não apenas demonstram o fraco desempenho em relação ao cumprimento dos dispositivos previstos na Lei, mas também, como destacado por Abramovay, Speranza e Petitgand (2013), dificulta o planejamento do setor, visto que são condicionantes para a obtenção de recursos federais necessários para sua própria execução. No entanto, antes mesmo de terem seus planos de resíduos aprovados, os estados de Rio de Janeiro e São Paulo regulamentaram o incentivo à produção do biometano através da aprovação da Lei Nº 6361/2012 e do Decreto Nº 58.659/2012, respectivamente.

4.1.2.1. Rio de Janeiro

Em 2012, o estado do Rio de Janeiro instituiu a Política Estadual de Gás Natural Renovável²⁴ por meio da aprovação da Lei Nº 6.361, de 19 de dezembro de 2012, com o objetivo principal de incentivar o uso do biogás gerado em aterros sanitários e controlados do estado, conforme artigo 2º:

“Art. 2º- A Política Estadual de Gás Natural Renovável tem como um de seus objetivos prioritários fomentar a utilização do biogás gerado em aterros sanitários e aterros controlados.” (RIO DE JANEIRO, 2012, p. 1)

²⁴ Conforme destacado por Makaruk, Miltner e Haraske (2010), diversos termos têm sido empregados para designar o biometano, tais como, gás natural renovável, biogás purificado ou ainda substituto biológico de gás natural.

Para que o objetivo da lei seja cumprido, foi estabelecido em seu Artigo 3º a aquisição compulsória do biometano produzido no estado pelas distribuidoras de gás natural:

“Art. 3º - As concessionárias de distribuição de gás canalizado do Estado do Rio de Janeiro ficam obrigadas a adquirir, de forma compulsória, todo o Gás Natural Renovável - GNR, produzido no Estado até o limite de 10% (dez por cento) do volume de gás natural convencional distribuído por cada uma delas, não incluído o volume destinado ao mercado termelétrico.” (RIO DE JANEIRO, 2012, p. 1)

A política de promoção do biometano aprovada pelo Rio de Janeiro estabelece ainda que os custos decorrentes de sua aplicação podem ser acrescidos às tarifas aplicadas ao gás natural distribuído no estado e atribuí à Agência Reguladora de Energia e Saneamento Básico do Estado do Rio de Janeiro (AGENERSA) o controle da produção de biometano injetado. No entanto, nenhum dos projetos de produção de biometano em operação comercial no Rio de Janeiro o injetam na rede, assim, a agência ainda não emitiu nenhum balanço da produção.

A tabela 13 apresenta a legislação estadual sobre o uso energético do biogás e resíduos sólidos urbanos, bem como do gás natural no estado. Apesar de não esgotar a regulação estadual existente com relação ao fomento desses recursos energéticos, a lista demonstra que o Rio de Janeiro já contava com outras regulações que tinham como objetivo a expansão do uso do gás natural e tratavam dos resíduos sólidos urbanos anteriormente à adoção política estadual de promoção do biometano.

Tabela 14 – Legislação fluminense sobre gás natural, biogás, biometano e resíduos sólidos.

Legislação	Conteúdo
Lei 3569, de 28.05.2001	Autoriza os poderes Executivo e Legislativo a efetuarem a gradual conversão da frota de seus veículos para o gás natural.
Lei, 3916, de 12.08.2002	Cria o programa de incentivo fiscal para a utilização de gás natural como atividade de exploração nas indústrias do ramo de cerâmica vermelha (olarias) no Estado do Rio de Janeiro.
Lei 4191, de 30.09.2003	Dispões sobre a Política Estadual de Resíduos Sólidos e dá outras providências.
Lei 4677, de 20.12.2005	Torna facultativo o uso do selo de identificação no para-brisas de veículos movidos a gás natural.
Lei 5101, de 04.10.2007	Dispões sobre a criação do Instituto Estadual do Ambiente - INEA e sobre outras providências para maior eficiência na execução das políticas estaduais de meio ambiente, de recursos hídricos e florestais.
Lei 5267, de 18.06.2008	Cria o conselho Estadual de Política Energética do Estado do Rio de Janeiro.
Lei 5536, de 10.09.2009	Cria o Fundo para a Eficiência Energética do Estado do Rio de Janeiro – FEE e dá outras providências.

continua...

continuação

Tabela 14 – Legislação fluminense sobre gás natural, biogás, biometano e resíduos sólidos.

Legislação	Conteúdo
Lei 5438, de 17.04.2009	Institui o Cadastro Técnico Estadual de Atividades Potencialmente Poluidoras ou Utilizadoras de Recursos Ambientais e a Taxa de Controle e Fiscalização Ambiental no Estado do Rio de Janeiro e dá outras providências.
Lei 6361, de 18.12.2012	Dispõe sobre a Política Estadual de Gás Natural Renovável - GNR.
Lei 6448, de 13.05.2013	Dispõe sobre a introdução de estímulos para a interiorização da distribuição de gás natural canalizado do Estado do Rio de Janeiro por meio do Gás Natural Comprimido – GNC.
Lei 7068, de 01.10.2015	Altera a Lei Nº 2.877, de 22 de dezembro de 1997, que dispõe sobre o imposto sobre a propriedade de veículos automotores – IPVA.

Fonte: a autora a partir de ALERJ (2016).

No ano seguinte à aprovação da política de promoção do biometano no estado, que destaca o aproveitamento energético dos gases de aterro, foi aprovado o Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Rio de Janeiro, que tem como diretriz a disposição final ambientalmente adequada de rejeitos (SEA; ECOLOGUS, 2013a). Para o cumprimento dessa diretriz e observando a hierarquia da gestão de resíduos determinada pela PNRS, o plano estabelece estratégias como a diminuição da necessidade de disposição final de resíduos sólidos em aterros e o aproveitamento energético do gás de aterro.

Com relação às metas estabelecidas para o cumprimento da estratégia relacionada ao aproveitamento energético de gás de aterro, o plano considera como alternativa apenas a geração de energia elétrica, com potencial total estimado em 0,660MWe e assim distribuída no horizonte temporal estabelecido pelo Plano: 10% até 2014, 30% até 2018, 70% até 2024 e 100% em 2033. Conforme consta do documento, o instrumento econômico considerado para alavancar a realização de projetos de aproveitamento dos gases de aterro é o MDL. No entanto, até 2015, não foi constatada geração de eletricidade a partir de resíduos sólidos urbanos no Estado do Rio de Janeiro (ANEEL, 2015b).

Para a diminuição da disposição final de resíduos sólidos urbanos, o plano considera como ações a serem estimuladas a separação da fração orgânica, a compostagem e o incentivo à Pesquisa e Desenvolvimento de novas tecnologias de tratamento de resíduos sólidos urbanos, como a digestão anaeróbica. Em linha com essas estratégias, para estabelecimentos comerciais e prestadores de serviço, o plano indica o *“fomento à implantação de atividades com tecnologias que utilizem os resíduos orgânicos como insumos”* (SEA; ECOLOGUS, 2013a, p. 15).

Vale destacar que o estado tem feito significativos avanços com relação ao encerramento dos vazadouros a céu aberto. Através da execução do subprograma “Lixão Zero”, que consta

da Política Estadual de Resíduos Sólidos, em 2014, apenas 2% dos municípios fluminenses destinaram os resíduos sólidos coletados a locais inadequados (Figura 34).

Figura 34 - Evolução do programa Lixão Zero

Fonte: SEA ([s.d.]).

Os desdobramentos da implantação dessa política merecem atenção e extrapolam a questão da gestão adequada dos resíduos sólidos. Abrangem, além da questão energética, aspectos sociais. Em decorrência da desativação do AMJG cinco nos aterros privados foram construídos (Barra Mansa, Seropédica, São Pedro da Aldeia, Santa Maria Madalena e Campos) (SEA; ECOLOGUS, 2013b). O município do Rio de Janeiro foi o principal destinador de resíduos sólidos urbanos (80%) ao AMJG durante o período em que esteve operacional e também é o local onde a primeira unidade planta de purificação de biogás de aterro foi instalada.

O Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos da Cidade do Rio de Janeiro, aprovado em 2012, contempla o município de Duque de Caxias, onde está localizado o AMJG. O plano de resíduos municipal não apresenta metas específicas para a recuperação de gás de aterros e produção de energia a partir do biogás recuperado, mas faz menção ao projeto em operação neste aterro e estabelece como diretriz apenas dar continuidade às operações de recuperação do biogás pelos próximos anos (FERREIRA et al., 2012).

Programado no momento de sua concepção para operar até o ano de 2002, o AMJG passou por um processo de revitalização em 1996 com o objetivo de adequar sua operação aos critérios mínimos para que fosse, de fato, considerado um aterro controlado. Desde 1998 foram feitas tentativas de encerramento de suas operações (MORIYAMA; PEGURIER, 2012), sempre

postergadas em virtude dos desafios relacionados à presença de catadores que trabalhavam na região.

Somente em 2012, após a celebração de um contrato de concessão entre a empresa operadora do aterro e uma empresa privada responsável pela exploração do biogás e produção de biometano, o aterro encerrou suas atividades. Consta do Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos da Cidade do Rio de Janeiro que o consórcio responsável pelo aproveitamento energético dos gases do aterro após seu fechamento, reverteria 36% dos ganhos obtidos com a venda de créditos de carbono para a Companhia Municipal de Limpeza Urbana do Rio de Janeiro (COMLURB) e para a Prefeitura de Duque de Caxias através de um fundo para recuperação do bairro de Jardim Gramacho (FERREIRA et al., 2012).

O termo de compromisso também previa a criação, além do Fundo de Revitalização, destinado a melhorias urbanísticas na região influenciada pela operação do aterro, o Fundo de Participação do Catador, visando indenizar os catadores pelo fim de suas atividades de coleta de materiais recicláveis dentro da área de operação do aterro (MACHADO, 2012). No entanto, decorridos mais de três anos de seu fechamento, as melhorias prometidas não foram executadas.

Maia (2014) aponta que os 20 mil moradores do bairro do localizado do entorno não tem acesso a condições de saneamento básico adequadas. O levantamento expedito conduzido em 2013 pela Organização Não Governamental TETO, constata a situação de vulnerabilidade da região: 74,8% das residências compreendidas na análise não possuem acesso à rede de distribuição de água, 93,6% destas residências obtém a energia elétrica por meio de ligações irregulares e 5% não estão conectadas com a rede de esgoto (MACENA et al., 2013).

As indenizações (R\$14.000 para cada um dos 1700 catadores cadastrados) foram pagas logo após o fechamento do aterro e no final de 2013 foi inaugurado o Polo de Reciclagem de Gramacho, o qual, segundo a Secretaria de Estado do Ambiente do Rio de Janeiro²⁵ *apud* Maia (2014), empregava em 2014 atualmente 125 catadores. Verifica-se, desta forma, que a maior parte dos 1500 catadores cadastrados durante o processo de fechamento do AMJG deixou de trabalhar em atividades relacionadas à reciclagem. Adicionalmente, é possível verificar a manutenção de deposição irregular de RSU no entorno do AMJG (MACENA et al., 2013; WATTS, 2015), o que contribui para a manutenção das atividades de catação pela população residente nesta região.

Esses apontamentos indicam que a produção de biometano teve um papel de destaque para viabilizar os planos tanto de revitalização do entorno do aterro, incluindo a melhoria das

²⁵ Informação do autor.

precárias condições de saneamento e habitação do bairro onde está inserido, quanto de melhoria de aspectos sociais que envolviam os catadores. No entanto, observa-se pela descrição da realidade observada posteriormente à entrada em operação da planta de produção e biometano que as propostas de melhoria não foram cumpridas e que, apesar de ambiciosas, não foram capazes de cumprir com seu papel de modelo para encerramento de lixões e aproveitamento energético de gases sob nenhuma perspectiva.

4.1.2.2. São Paulo

A matriz energética do estado de São Paulo (Figura 35) é, em sua maior fração, constituída de fontes renováveis de energia e apresentou nos últimos anos uma queda da participação de combustíveis fósseis, apesar de um aumento no consumo de gás natural, e um aumento na participação das fontes alternativas e renováveis, principalmente aquela obtida no setor sucroalcooleiro (álcool etílico – combustível veicular, eletricidade a partir do bagaço de cana-de-açúcar).

Figura 35 – Participação das diversas fontes de energia na matriz energética do estado de São Paulo.

Fonte: a autora a partir de SÃO PAULO (2012a).

O aumento no consumo de gás natural, biocombustíveis e bioeletricidade verificado nos últimos anos e ilustrado pela figura acima, pode ser consequência de uma série de legislações aprovadas nos últimos anos em favor dessas fontes. A tabela abaixo lista a legislação estadual relacionada à promoção do uso energético do gás natural, biogás e dos resíduos sólidos urbanos.

Tabela 15 – Legislação paulista sobre gás natural, biogás e resíduos sólidos urbanos.

Legislação	Conteúdo
Decreto nº 38.789, de 17/06/1994	Institui o Programa de Inspeção e Manutenção de Veículos em uso - I/M e dá outras providências.
Decreto nº 40.700, de 06/03/1996	Cria o Programa Operativo de Controle da Poluição do Sistema de Transportes do Estado de São Paulo, com o objetivo de integrar as políticas estaduais e municipais de transportes, trânsito de veículos, energia, uso e ocupação do solo, saúde e meio ambiente.
Lei nº 9.459, de 16/12/1996	Altera a Lei n. 6.606, de 20/12/1989, que dispõe a respeito do Imposto sobre a Propriedade de Veículos Automotores - IPVA.
Decreto nº 41.858, de 12/06/1997	Regulamenta a Lei 9.690 de 2.6.97... (rodízio).
Decreto nº 43.030, de 09/04/1998	Cria a Comissão Intersecretarial de Estudos para a formulação de uma matriz energética ambientalmente sustentável para o Estado.
Decreto nº 43.889, de 10/03/1999	Aprova o Regulamento de concessão e permissão da prestação de serviços públicos de distribuição de gás canalizado no Estado.
Lei nº 11.248, de 04/11/2002	Cria o Conselho Estadual de Política Energética - CEPE.
Lei nº 12.300, de 16/03/2006	Institui a Política Estadual de Resíduos Sólidos e define princípios e diretrizes.
Lei nº 13.798, de 09/11/2009	Institui a Política Estadual de Mudanças Climáticas - PEMC.
Decreto nº 54.645, de 05/08/2009	Regulamenta dispositivos da Lei nº 12.300 de 2006, que institui a Política Estadual de Resíduos Sólidos, e altera o inciso I do artigo 74 do Regulamento da Lei nº 997, de 1976, aprovado pelo Decreto nº 8.468, de 1976.
Decreto nº 54.845, de 30/09/2009	Altera o Decreto 53.574, de 2008, que institui o Programa de Incentivo à Indústria de Produção e de Exploração de Petróleo e de Gás Natural no Estado de São Paulo.
Decreto nº 55.947, de 24/06/2010	Regulamenta a Lei nº 13.798, de 9 de novembro de 2009, que dispõe sobre a Política Estadual de Mudanças Climáticas.
Decreto nº 55.565, de 15/03/2010	Dispõe sobre a prestação de serviços públicos de saneamento básico relativos à limpeza urbana e ao manejo de resíduos sólidos urbanos no Estado de São Paulo e dá providências correlatas.
Decreto nº 56.103, de 18/08/2010	Altera o Decreto nº 53.574, de 2008, que instituiu o Programa de Incentivo à Indústria de Produção e de Exploração de Petróleo e de Gás Natural no Estado de São Paulo.
Decreto nº 56.074, de 09/08/2010	Institui o Programa Paulista de Petróleo e Gás Natural, cria o Conselho Estadual de Petróleo e Gás Natural do Estado de São Paulo e dá providências correlatas.
Decreto nº 58.659, de 04/12/2012	Institui o -Programa paulista de biogás e dá providências correlatas.
Decreto nº 58.107, de 05/06/2012	Institui a estratégia para o Desenvolvimento sustentável do Estado de São Paulo 2020, e dá providências correlatas.
Decreto nº 57.817, de 28/02/2012	Institui, sob coordenação da Secretaria do Meio Ambiente, o Programa estadual de implementação de projetos de resíduos sólidos e dá providências correlatas.
Decreto nº 58.388, de 14/09/2012	Disciplina o Programa de incentivo à indústria de produção e exploração de petróleo e de gás natural no Estado de São Paulo.
Decreto nº 60.001, de 20/12/2013 ^(a)	Introduz alteração no RICMS.
Decreto nº 59.038, de 03/04/2013	Institui o Programa Paulista de Biocombustíveis e dá providências correlatas.
Decreto nº 60.298, de 27/03/2014 ^(b)	Introduz alterações no RICMS.

Fonte: a autora a partir de ALESP (2016).

(a) “Por meio desta alteração (...) é concedida redução na base de cálculo do ICMS incidente as saídas internas de biogás e biometano, de forma que a carga tributária corresponda a 12%, com vigência em 1-1-2014” (CONTÁBEIS, 2013, p. 1).

(b) “Com esta alteração (...) é concedido aos contribuintes com as atividades especificadas neste Ato, suspensão do lançamento do imposto incidente na importação de bens, sem similar nacional, destinados ao ativo imobilizado, bem como crédito integral do ICMS incidente na aquisição interna de bens destinados ao ativo imobilizado” (CONTÁBEIS, 2014, p. 1).

Como pode ser observado a partir da legislação elencada acima, o estado de São Paulo historicamente tem se preocupado com questões relacionadas à garantia do suprimento energético em consonância com questões ambientais e relacionadas ao manejo adequado dos resíduos sólidos. Nesse sentido, o mais recente e principal estímulo à produção e uso biometano no estado foi dado através da aprovação do Programa Paulista de Biogás por meio do Decreto Nº 58.659 de 04 de dezembro de 2012, cujo objetivo é estimular a utilização do biometano, principalmente a partir da vinhaça, dado o grande potencial existente para sua produção no setor sucroalcooleiro, que é relevante no estado:

“Considerando o grande potencial de geração de biogás no Estado de São Paulo proveniente, principalmente, do setor sucroenergético; (...)” (SÃO PAULO, 2012b, p. 1)

O Decreto, diferentemente do que foi estabelecido na política carioca, não estipulou o percentual de adição de biometano no gás natural distribuído no estado, e carece de revisão, uma vez que ainda faz menção à Resolução ANP nº 16/2008, que trata das especificações técnicas do gás natural.

*“Artigo 2º - O Programa Paulista de Biogás tem os seguintes objetivos:
(...)”*

II - estabelecer a adição de um percentual mínimo de Biometano ao gás canalizado comercializado no Estado de São Paulo. § 1º - O gás proveniente de biomassa será denominado Biometano, quando sua composição for compatível com a Resolução da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - ANP nº 16, de 17 de junho de 2008.

§ 2º - O gás Biometano poderá ser misturado com o gás canalizado comercializado no Estado de São Paulo, atendidas as disposições do § 1º deste artigo.” (SÃO PAULO, 2012b, p. 1)

A Agência Reguladora de Saneamento e Energia do Estado de São Paulo (ARSESP) lançou, em dezembro de 2015, uma consulta pública com vistas incorporar os ditames da Resolução ANP Nº 08/2015.

Em 2014, o estado de São Paulo aprovou o Plano de Resíduos Sólidos do Estado de São Paulo, desenvolvido de forma a contemplar o conteúdo mínimo exigido na PNRS de acordo com a hierarquia da gestão de resíduos por ela exigida. O plano paulista prevê como ação contínua, ao longo de sua vigência, o fomento a “ *soluções sustentáveis para a gestão dos*

resíduos sólidos”, o que inclui a implantação de soluções tecnológicas avançadas no tratamento de resíduos com os objetivos de redução de massa e volume, consequentemente, considerando para este fim, o seu aproveitamento energético (SIMAS et al., 2014).

A partir da caracterização nacional conduzida em 2013, o Estado objetiva que a redução da disposição final de resíduos úmidos em aterros sanitários em 2019 seja de 35%, em 2023, de 45%, e em 2025, de 55%. As ações de prazo contínuo para tratamento da fração orgânica separada e que, portanto, deverão ocorrer de maneira continuada ao longo da vigência do plano, incluem incentivar a busca de recursos financeiros para a implantação de plantas de tratamento desses resíduos através da compostagem, Tratamento Mecânico-Biológico (TMB), Unidades de Recuperação Energética (UREs) e, também, estimular a geração de energia a partir dos resíduos e seus derivados. Quando elenca as possíveis rotas tecnológicas para o tratamento de resíduos sólidos urbanos, o plano paulista de resíduos menciona os processos de digestão anaeróbica com recuperação de biogás, que pode ser purificado ou adicionado ao gás natural através de sua injeção na rede (SIMAS et al., 2014).

Apesar de reconhecer a possibilidade de uso do biogás purificado enquanto combustível veicular ou utilizado como substituto ao gás natural através de sua injeção na rede e da aprovação prévia do Programa Paulista de Biogás, as metas estabelecidas no Plano Estadual de Resíduos para a recuperação de gases de aterro não fazem referência direta a esses usos, mas sim para utilização do biogás recuperado em aterros para geração de energia elétrica, segundo o seguinte horizonte temporal: 60MW em 2019, 80MW em 2023 e 100MW até 2025. Em dezembro de 2015, a participação do biogás de aterros na geração de eletricidade no estado de São Paulo, em termos de capacidade instalada, era de aproximadamente 31MW (ANEEL, 2015b).

O Plano Paulista de Energia 2020 (PPE 2020), publicado em 2012, previa a utilização do biogás de aterro para a geração de eletricidade. De acordo com as projeções tomadas do estudo Matriz Energética do Estado de São Paulo 2035, o PPE 2020 indica que o potencial desse aproveitamento no estado corresponderia, em 2020, a 96MW de capacidade instalada (SÃO PAULO, 2012a).

4.2. Aplicações e perspectivas de expansão da produção e uso do biometano

No passado, o biogás já foi utilizado como combustível veicular no Brasil. Entre 1985 e 1990, a COMLURB utilizou o biogás para abastecer uma frota de 150 veículos para uso próprio e táxis (ICLEI, 2009). A Companhia de Gás Natural de Minas Gerais (GASMIG) foi fundada em 1986 com o objetivo de extrair gás do aterro de Belo Horizonte (Figura 36). O biogás era distribuído para clientes comerciais localizados próximo ao aterro e utilizado como combustível veicular em 36 veículos da frota própria da empresa, descontinuado com o término da produção de biogás pelo aterro (CEMIG, 2011; GASMIG, [s.d.]; UM NOVO..., 2013).

Figura 36 – Inauguração da Usina de Gás Metano de Belo Horizonte em 1989.
Fonte: CEMIG (2011).

Em 1984, a Dedini implantou um sistema de conversão do biogás gerado a partir da digestão anaeróbica da vinhaça, chamado Methax (Figura 37). O biocombustível produzido foi utilizado em na frota própria da empresa e, a partir do convênio firmado em 1989 com a prefeitura de São João da Boa Vista, no transporte coletivo da cidade (Figura 38) (LEÃO, 2005). Segundo Alves (2000), este projeto esteve operacional até 1996 e foi responsável pelo abastecimento de uma frota de 120 ônibus, 203 caminhões e 416 veículos leves.

Figura 37 – Unidade da Methax em São João da Boa Vista.
Fonte: LEÃO (2005).

Figura 38 – Ônibus da frota de transporte coletivo de São João da Boa Vista abastecido com metano.
Fonte: LEÃO (2005).

Atualmente, apesar da inexistência de planos efetivos de utilização de biogás por parte dos governos em seus mais diversos níveis, as iniciativas com relação ao uso do biogás foram retomadas, considerando o uso do biometano no Brasil, como destacado por Ribeiro e Pelinski (2013), que apresentam em seu estudo uma visão geral da situação atual em relação à geração de energia a partir do setor agrícola no Estado do Paraná, considerando resíduos da cana-de-açúcar e suinocultura.

Os autores identificam que no Paraná, a primeira planta de purificação de biogás em escala industrial foi implantada por uma usina associada à Cooperativa Agrícola Regional de Produtores de Cana (COOPCANA) no final de 2012, para o uso como um substituto para o diesel em tratores, colheitadeiras, caminhões e ônibus.

O estado do Rio de Janeiro se destaca em relação à purificação de biogás de aterro, onde o uso industrial de biometano já é uma realidade, e conta atualmente com duas plantas em operação. A primeira planta de purificação de gás de aterros a entrar em operação no final de 2013 está localizada no AMJG e fornece 10% do consumo de gás natural da Refinaria Duque de Caxias (REDUC), via gasoduto dedicado (PETROBRAS, 2014). A outra planta de purificação de gás de aterro em operação está instalada no Aterro Sanitário Dois Arcos e tem capacidade de produção de 15 mil m³ de biometano por dia, distribuído em cilindros para uso em unidades industriais próximas ao aterro (AMBIENTE ENERGIA, 2015; ECOMETANO, 2015).

Atualmente, existem diversos mecanismos de incentivo voltados a incrementar a exploração energética do biogás. Segundo levantamento conduzido por IEA BIOENERGY TASK 37 (2015), recursos estão disponíveis, principalmente para o setor agrícola, em programas como o PRONAF ECO²⁶, a Rede BiogasFert²⁷ e políticas governamentais, como a Política Nacional de Mudança do Clima, que conta com orçamento de seis bilhões de Reais para a implantação de projetos que contribuam para a redução de emissão de GEE.

Maier e Oliveira (2014) destacam programas especiais do BNDES e a isenção da TUSD e TUST, previstos em legislação específica da ANEEL, como incentivos financeiros capazes de aumentar a atratividade de projetos que utilizam o biogás. Para Mathias e Mathias (2015), além dos incentivos do BNDES, o Banco do Brasil também conta com linhas específicas de financiamento de projetos que apresentam taxas de juros mais atrativas.

De acordo com as estatísticas mais recentes, o gás natural respondeu por 13,5% da oferta interna de energia brasileira em 2014 (EPE, 2015). Do total de gás natural ofertado, a maior parte foi destinada à produção de energia elétrica (43%), ao consumo industrial (25%) e ao setor energético (16%). A Figura 39 apresenta a distribuição do consumo de gás natural no país, por setor de consumo, em 2014.

²⁶ Linha de financiamento do BNDES destinada à agricultores familiares incluídos no Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar (PRONAF) que implantem projetos que utilizem tecnologias de energia renovável, promovam o armazenamento hídrico e o aproveitamentos hidroenergéticos, adotem práticas conservacionistas (BNDES, 2016).

²⁷ Parceria entre a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) e a Itaipu Binacional para a pesquisa de soluções tecnológicas para a produção de biogás (EMBRAPA, 2016).

Figura 39 – Consumo de gás natural, por setor, em 2014.

Fonte: a autora a partir de EPE (2015).

Segundo o Balanço Energético Nacional de 2015, os setores que mais consumiram gás natural em relação aos demais combustíveis foram os setores energético²⁸ e industrial (Tabela 16).

Tabela 16 – Participação do gás natural no consumo final, por setor, em 2014.

Sector de Consumo	Participação de gás natural (%)
Energético	22,9
Industrial	11,1
Transporte	1,8
Residencial	1,3

Fonte: a autora a partir de EPE (2015).

Retomando os apontamentos de Koornneef et al. (2013) e Åhman (2010), por serem combustíveis intercambiáveis, a indústria do gás natural exerce influência na produção e uso do biometano. Segundo ANEEL (2008), a cadeia de suprimento de gás natural envolve as seguintes etapas (Figura 40):

- *Exploração*: identificação das reservas existentes ou não;
- *Exploração*: instalação da infraestrutura para extração do gás;

²⁸ Energia consumida nos Centros de Transformação e/ou nos processos de extração e transporte interno de Produtos Energéticos, na sua forma final (EPE, 3013).

- *Produção*: extração e processamento em campo;
- *Processamento*: retirada das frações pesadas e compressão ou encaminhamento para as estações de tratamento;
- *Transporte e armazenamento*: realizado por meio de uma rede de duto desde o ponto de processamento ou outros gasodutos de transporte até outros gasodutos de transporte, ponto de entrega das distribuidoras estaduais, os chamados “city-gates” (ANP, 2011);e,
- *Distribuição*: fornecimento do gás natural até os consumidores finais, realizado pelas concessionárias locais de distribuição.

Figura 40 – Cadeia de suprimento de gás natural convencional.

Fonte: FUJII (2005).

Algumas das possibilidades de comercialização de gás natural entre os diversos agentes do setor, na esfera de competência da União, são apresentadas por ANP (2011, p. 20):

- a) comercialização entre o agente produtor (upstream) e o distribuidor (downstream), podendo o ponto de transferência de propriedade situar-se entre a produção e o city-gate;*
- b) comercialização entre o agente importador (midstream) e o distribuidor (downstream), podendo o ponto de transferência de propriedade ser o city-gate de*

um gasoduto;

c) comercialização entre o agente produtor (upstream) e o agente comercializador, podendo o ponto da transferência de propriedade situar-se entre a produção e o city-gate, inclusive em instalações de estocagem de gás natural;

d) comercialização entre o agente produtor/importador/comercializador, por um lado, e o consumidor livre, de outro, podendo o ponto da transferência de propriedade ser o city-gate de um gasoduto; e

e) comercialização entre o distribuidor de GNC ou GNL e o consumidor final, uma vez que apenas os serviços locais de gás canalizado estão sujeitos ao monopólio estadual.

Para a ANP (2011, p. 12), “a especificidade dos ativos e o fato da atividade ser exercida em regime de monopólio natural²⁹, além da forte concorrência interenergética (dificuldade de desenvolvimento de mercados exclusivos e preço do gás natural correlacionado com o preço de combustíveis concorrentes), tornam necessária a coordenação setorial e estimulam (...) a adoção de contratos de longo prazo (estabilidade de demanda)”. Os modelos contratuais adotados pela Petrobras são (PETROBRAS, [2007], p. 17):

- Firme Inflexível: estabelece um compromisso de comercialização com pagamento por quantidades mínimas contratadas por parte do cliente e a respectiva garantia de entrega por parte do fornecedor;

- Firme Flexível: por este contrato, o consumidor bicomcombustível se dispõe a utilizar um combustível alternativo por determinado período de tempo. Dessa forma, o serviço energético do consumidor pode ser satisfeito a partir de outras fontes de energia. (...);

- Interruptível: neste modelo, o suprimento de gás natural pode ser interrompido apenas pelo fornecedor, de acordo com as condições negociadas previamente em contrato. A diferença entre este e o contrato Firme Flexível é que, na modalidade Interruptível, a responsabilidade pela substituição do combustível alternativo fica a cargo do cliente;

- Preferencial: nesta nova modalidade, o consumidor é que detém a prerrogativa de interromper o fornecimento, (...) estando o fornecedor obrigado a providenciar o suprimento de gás disponível quando demandado.

Ainda segundo a ANP (2011), a cadeia de fornecimento de gás natural é definida como uma indústria de rede caracterizada por uma série de atividades interdependentes, em especial

²⁹ “Um monopólio natural é formado quando uma empresa é capaz de fornecer bens e serviços à um mercado inteiro em um custo menor do que poderia ser oferecido por mais de uma empresa” (MANKIW, 2009, p. 318).

as etapas de transporte e distribuição de gás, que por sua vez são dependentes de infraestrutura específica, por exemplo gasodutos, que as viabilizam. Segundo Pinto Jr.³⁰ et al (2007 apud ANP, 2011) esta tipologia de indústria apresenta como principais características: elevados custos de investimento, baixa flexibilidade e grandes economias de escala.

Enquanto em alguns países a malha de gasodutos é extensa e bem distribuída, o Brasil ainda apresenta uma malha de gasodutos que carece de expansão. O país apresentava até o final de 2013, um pouco mais de 9 mil km de gasodutos de transporte e aproximadamente 25 mil km de gasodutos de distribuição (Figura 41), distribuídos principalmente no litoral do país (Figura 42).

Figura 41 – Evolução das malhas de transporte e distribuição de gás natural.
Fonte: MME (2015).

³⁰ PINTO JR, H. Q. (Org.); ALMEIDA, E. F.; BOMTEMPO, J. V.; IOOTTY, M.; BICALHO, R. G. **Economia da Energia: Fundamentos Econômicos, Evolução Histórica e Organização Industrial**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.

Figura 43 – Evolução da conversão da frota nacional para GNV.

Fonte: IBP³¹ apud Bastos e Fortunato (2014).

O desenvolvimento de políticas públicas destinadas especificamente para o incremento do uso de gás natural no Brasil teve início em 1987 com a aprovação do Plano Nacional do Gás Natural, elaborado pelo Governo Federal (RECHELO NETO; SAUER, 2006). A operação do gasoduto Bolívia-Brasil (Gasbol) também favoreceu o aumento do consumo interno de gás natural como combustível veicular a partir de 1998 (ANP, 2011; BASTOS; FORTUNATO, 2014).

No entanto, o aumento relativamente constante nas conversões de GNV observado entre os anos de 2000 e 2006 pode ser atribuído à manutenção dos preços do combustível pela Petrobras, o que manteve sua competitividade frente às outras alternativas (como, diesel e gasolina), política que vigorou até 2004, quando o “Programa de Massificação do Uso do Gás Natural” entrou em vigor (ANP, 2011). Por sua vez, a queda na quantidade de conversões verificada a partir de 2007 pode ser atribuída, segundo ANP (2011), diretamente a readequação dos preços do GNV por parte da Petrobras, que se encontravam defasados em decorrência das políticas implantadas nos anos anteriores.

Segundo IBP³¹ apud Bastos e Fortunato (2014), em 2012, a frota nacional de veículos convertidos à GNV era de 1.713.979 veículos. A baixa frequência de veículos movidos a gás natural veicular (GNV) no Brasil, obviamente se reflete nas estatísticas estaduais. Segundo estimativas da CETESB, a frota de veículos leves que utilizam GNV é menor que 1%, enquanto a companhia considera que, aparte das exceções observadas em veículos experimentais, os

³¹ IBP - Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis. Radiografia do Setor: Mercado de GNV – Posição Atual. 2012. Disponível em: <<http://www.ibp.org.br>>. Acesso em jun. 2012.

veículos pesados do estado são movidos, essencialmente, à óleo diesel (CETESB, 2015).

Tomados os dados do Departamento de Trânsito do Estado do Rio de Janeiro (DETRAN) e considerando a informação do total de veículos convertidos existentes do Brasil reportados pelo IBP, somente a frota do município do Rio de Janeiro representou, naquele ano, aproximadamente 25% dos veículos a GNV do país e 16% do total da frota de veículos daquele estado.

Figura 44 – Evolução dos combustíveis utilizados na frota veicular do município do Rio de Janeiro.

Fonte: DETRAN (2016) e IPP (2005).

(1) Inclui veículos dotados da tecnologia flex fuel, movidos a álcool e/ou gasolina;

(2) Inclui veículos movidos com qualquer combustível além do gás natural veicular;

(3) Inclui veículos movidos a gasogênio, gás metano, eletricidade e gás manufacturado veicular.

Apesar da relativa importância da participação do gás natural na matriz energética do país e da carência de infraestrutura para sua distribuição por gasodutos, ou promoção de seu uso como combustível veicular, as projeções do governo indicam um aumento em seu consumo futuro (Figura 45) para todos os setores de consumo final, além da manutenção de sua importância nas matrizes energéticas dos setores industrial e energético.

Figura 45 – Projeção do consumo final de gás natural por setor, de 2013 a 2030.

Fonte: a autora, a partir de EPE (2014b).

4.3. Potencial de produção de biometano

Dimensionar a quantidade disponível do recurso, em adição ao estudo do marco regulatório aplicável ao biometano produzido a partir de gás de aterros e de suas possíveis aplicações enquanto substituto do gás natural de origem fóssil, possibilita entender como, e em que nível, poderá ser explorado nos próximos anos. Assim, o potencial de produção de biometano a partir do biogás extraído de aterros no Brasil entre 2015 e 2030 foi estimado a partir da estimativa das emissões de metano calculadas com o uso do Método de Decaimento de Primeira Ordem.

Este método assume que os resíduos são degradados ao longo de algumas décadas, quando há a formação de metano e dióxido de carbono (PIPATTI et al., 2006). O cálculo foi conduzido a partir da planilha Excel disponibilizada³² pelo IPCC, que apresenta o detalhamento das equações utilizadas para a obtenção do resultado pretendido – emissões de metano devido à disposição de resíduos em aterros -, conforme detalhado abaixo.

A premissa padrão adotada nos cálculos, e que também foi considerada neste estudo, é de que a geração de CH₄ a partir da disposição final do resíduo no aterro é iniciada no primeiro dia do ano posterior à sua disposição, o que corresponde a um atraso médio de seis meses até

³² Disponível para download em <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol5.html>>.

que uma geração substancial de CH_4 seja observada, dado o estabelecimento das condições anaeróbicas necessárias para sua formação.

As equações de (1) a (6) são aplicadas, pelo modelo, a cada uma das categorias de resíduo consideradas (x). Por simplificação, o índice x foi suprimido. A equação (1) calcula a massa de carbono orgânico degradável (DOC) que decompõe ($DDOCm$) em função da quantidade de resíduo (W) depositada no ano T ($DDOCmd_{(T)}$):

$$DDOCmd_{(T)} = W_{(T)} * DOC * DOC_f * MCF \quad (1)$$

Onde:

$W_{(T)}$ = massa depositada no ano T (Gg)

DOC = Carbono orgânico degradável (GgC/Gresíduo)

DOC_f = Fração de DOC que decompõe (fração)

MCF = Fator de correção do metano (fração)

A quantidade restante de $DDOCm$ que não foi decomposta ao final do ano de depósito T ($DDOCmrem_{(T)}$) é dada pela equação 2, enquanto a quantidade de $DDOCm$ decomposta durante o ano de deposição T ($DDOCmdec_{(T)}$) é descrita pela equação 3.

$$DDOCmrem_{(T)} = DDOCmd_{(T)} * e^{(-k * ((13-M)/12))} \quad (2)$$

$$DDOCmdec_{(T)} = DDOCmd_{(T)} * (1 - e^{(-k * ((13-M)/12))}) \quad (3)$$

Onde:

$DDOCmd_{(T)}$ = massa de $DDOCm$ depositada no ano T (Gg)

k = constante de decaimento da reação (1/ano)

M = mês de início da reação (= tempo de atraso + 7) (meses)

T = ano do cálculo (ano)

A quantidade acumulada de $DDOCm$ no aterro ao final do ano T é dada pela equação 4.

$$DDOCma_{(T)} = DDOCmrem_{(T)} + (DDOCma_{(T-1)} * e^{-k}) \quad (4)$$

Onde:

$DDOCmrem_{(T)}$ = massa de *DDOC* depositada no ano do inventário *T*, não decomposta ao final do ano (Gg)

$DDOCma_{(T-1)}$ = massa total de *DDOC* não decomposta acumulada ao final do ano *T-1* (Gg)

A quantidade decomposta de *DDOCm* no ano *T* ($DDOCmdecomp_{(T)}$):

$$DDOCmdecomp_{(T)} = DDOCmdec_{(T)} + (DDOCma_{(T-1)} * (1 - e^{-k})) \quad (5)$$

Onde:

$DDOCmdec_{(T)}$ = massa de *DDOC* depositada no ano do inventário *T*, decomposta durante o ano (Gg)

$DDOCma_{(T-1)}$ = massa total de *DDOC* não decomposta acumulada ao final do ano *T-1* (Gg)

O cálculo da quantidade de CH_4 gerada a partir do *DOC* que decompõe no ano *T* ($CH_4 generated_{(T)}$) é dado pela equação 6.

$$CH_4 generated_{(T)} = DDOCmdecomp_{(T)} * F * 16/12 \quad (6)$$

Onde:

F = Fração de metano em volume do gás de aterro gerado (fração)

16/12 = peso molecular da razão CH_4/C (fração)

Por fim, a quantidade de CH_4 emitida no ano *T* é dada pela equação 7.

$$CH_4 = \left(\sum_x CH_4 generated_{(x,T)} - R_{(T)} \right) * (1 - OX_{(T)}) \quad (7)$$

Onde:

T = ano do cálculo (ano)

x = categoria do resíduo (material orgânico, inerte, entre outros)

$CH_4 generated_{(x,T)}$ = CH_4 gerado para cada categoria de resíduos no ano *T* (Gg)

$R_{(T)}$ = CH_4 recuperado no ano *T* (Gg)

$OX_{(T)}$ = Fator de oxidação no ano T (fração)

Valores padronizados foram aplicados a algumas variáveis, quando, à semelhança da justificativa adotada no cálculo elaborado Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) para a execução do inventário nacional de GEE do setor de resíduos (ALVES; VIEIRA, 2010), não se dispunha de informação específica para o Brasil. Os valores padrão utilizados estão apresentados de maneira resumida na Tabela 17. A série completa dos dados considerados no cálculo da estimativa se inicia em 1970 e estão disponibilizadas no Apêndice A.

Tabela 17 – Valores padrão utilizados nos cálculos.

Parâmetro		Valor
Carbono orgânico degradável (DOC)*	Matéria orgânica	0,15
	Papel	0,4
Fração de metano (F)		0,5
Fator de correção do metano (MCF)	Vazadouros a céu aberto	0,6
	Aterros sanitários	1
	Aterros Controlados	0,8
Fração de carbono orgânico que decompõe ($DOC_{(f)}$)		0,5
Constante de geração de metano (k)**	Matéria orgânica	0,4 ano ⁻¹
	Papel	0,07 ano ⁻¹
Fator de oxidação (OX ***)		0,1

Fonte: a autora a partir de Pipatti et al. (2006).

* A composição gravimétrica média do resíduo coletado no Brasil considera as categorias matéria orgânica e papel, as categorias restantes foram agrupadas e classificadas como material inerte ** Os valores adotados para k típicos de zonas climáticas tropicais (temperatura > 20°C) e úmidas (precipitação > 1000 mm), aplicados a todo o território nacional. Esta generalização levou em conta valores médios predominantes de precipitação e temperatura na maior parte do país, embora não represente a variedade climática do Brasil³³. *** Valor padrão para aterros sanitários e controlados, categorias mais relevantes no período analisado.

Os dados de 1970 e 1972 mostram que o lixo coletado por empresas de limpeza pública, tanto das vias públicas quanto das residências, era destinado a vazadouros a céu aberto (IBGE, 2006). Apenas a partir da publicação da segunda PNSB, as categorias aterro sanitário e controlado foram incluídas (IBGE, 1989). Assim, foi considerado que a destinação do lixo coletado no país dava-se integralmente em vazadouros a céu aberto, em 1970. De 1971 até 1988 foi adotado um crescimento linear para a disposição final em aterros controlados e sanitários, considerando uma base inicial de 0%. Entre 1989 e 2008, foram adotados os dados das PNSB, para 1989, 2000 e 2008 (Tabela 18). Para os anos entre pesquisas, foi considerado um crescimento linear.

³³ Para informações mais detalhadas consultar INMET (2009) e Pipatti et al. (2006).

Tabela 18 – Destino final de resíduos sólidos urbanos no Brasil, em 1989, 2000 e 2008.

Ano	Aterro Controlado (%)	Aterro Sanitário (%)
1989	9,6	1,1
2000	22,3	17,3
2008	22,5	27,7

Fonte: a autora a partir de IBGE (2010).

Segundo a PNRS, até 2015 todos os resíduos sólidos urbanos deveriam ser dispostos em aterros sanitários. No entanto, até recentemente, em 2008, 50,8% dos resíduos ainda eram encaminhados para vazadouros a céu aberto (IBGE, 2010). Assim, para estimar a produção de gás de aterro até 2030, foram elaborados dois cenários de disposição final a partir de 2010 – ano da promulgação da PNRS (Tabela 19). O resultado final com os valores considerados de 1970 a 2030 constam da Tabela 32 (para o cenário A) e Tabela 33 (para o cenário B) apresentadas no Apêndice A.

Tabela 19 – Cenários considerados para destinação final de resíduos sólidos no Brasil.

Cenário	Descrição
Cenário A	Objetivo de disposição final de resíduos sólidos urbanos da PNRS completamente satisfeito a partir de 2015; assumindo a mesma proporção entre o envio para aterros controlados e sanitários da PNSB 2008, mantida até 2030.
Cenário B	Objetivo de disposição final de resíduos sólidos urbanos da PNRS não satisfeito em 2015 (situação atual). Assume-se 100% de disposição final de resíduos em aterros sanitários ou controlados até 2030; crescimento linear a partir dos dados da PNSB 2008; assumida a mesma proporção entre o envio para aterros controlados e sanitários mantida até 2030.

Fonte: a autora.

A geração anual de resíduos sólidos urbanos foi estimada considerando a população do país e a geração per capita de resíduos. A população total para os anos inicial (1970) e final (2030) da série de dados foi obtida a partir dos censos demográficos (IBGE, 2008a) e da projeção da população de 1980 até 2030 (IBGE, 2008b). A população do país entre 1971 e 1979 foi estimada por interpolação linear. A série de dados final está exposta na Tabela 28, apresentada no Apêndice A.

A geração de resíduos *per capita* para 1970, 1977, 1980 e 1990 foi obtida em CHESF (1987). Para o período de 2002 a 2009, foram utilizados os dados de CAMPOS (2012). Para completar o hiato entre os dados, foi utilizada a interpolação linear. De 2010 a 2014, usaram-se os dados da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) (ABRELPE, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015). A partir de 2015 a geração per capita

foi mantida constante. A Tabela 29 do Apêndice A apresenta a série de dados final utilizada no cálculo.

As Séries Históricas IBGE foram utilizadas para determinar a fração do lixo gerado que é coletado para os períodos de 1981 a 1990 (lixo coletado sem especificação), 1992 a 1999 (lixo coletado direta e indiretamente), e 2001 a 2009 (lixo coletado direta e indiretamente) (IBGE, 2004). Para 1991 e 2000 foram feitas médias aritméticas entre as informações imediatamente anteriores e posteriores ao dado desejado. Anteriormente a 1981 e a partir de 2010 foi feita uma interpolação linear, considerando que em 2030, 99,9% dos resíduos gerados no país serão coletados. O resultado final para esta série de informações está apresentado na Tabela 30 do Apêndice A.

A composição gravimétrica média dos resíduos sólidos urbanos coletados no Brasil em 1972 foi obtida de Monteiro, Mansur e De Sá (1987) e para o período de 2000 a 2008 foram considerados os dados de IPEA (2012). Para os anos faltantes foi feita uma projeção linear e, a partir de 2008, a composição gravimétrica dos resíduos foi mantida constante. O resultado final desta série de dados está apresentado na Tabela 31 do Apêndice A.

Os cenários apresentados acima foram complementados com relação à separação prévia da fração úmida dos resíduos sólidos conforme determinado pela PNRS e de acordo com as metas propostas pelo Plano Nacional de Resíduos Sólidos, em nível federal, como descrito na Tabela 20. A porcentagem de separação entre os anos foi interpolada linearmente.

Tabela 20 – Cenários considerados para separação prévia da fração úmida dos resíduos sólidos urbanos no Brasil.

Cenário	Descrição
Cenário A	Objetivo de separação prévia da fração úmida dos resíduos sólidos urbanos da PNRS completamente satisfeito, implantado a partir de 2010 quando a PNRS foi promulgada, de acordo com as metas estabelecidas no plano nacional: 19% de separação até 2015, 28% até 2019, 38% até 2023, 46% até 2027, e 53% até 2031.
Cenário B	Objetivo de disposição final de resíduos sólidos urbanos da PNRS não satisfeito em 2015 (situação atual). Assume-se que não haverá separação prévia da fração úmida dos resíduos sólidos urbanos até 2030.

Fonte: a autora.

Com o resultado das séries de dados descritas até aqui, foi estimada a emissão total de biogás a partir da disposição final de resíduos sólidos urbanos no Brasil. Para que seja possível a produção de biometano, é necessário que o biogás gerado seja extraído de maneira forçada do aterro sanitário. Segundo USEPA (2008), a eficiência média de sistemas de extração forçada de gás de aterro corresponde a 75%. Esta informação foi considerada para estimar quanto biogás

estaria disponível para a produção de biometano no Brasil de 2015 até 2030.

A partir deste resultado, o potencial máximo de produção de biometano a partir de gás de aterros foi estimado considerando que o rendimento do processo de purificação é em média 70%, como assumido por EPE (2014c). Como pode ser observado na Figura 46, no horizonte temporal considerado para a análise dos resultados, o país atingiria, em 2030, uma capacidade máxima de produção de biometano de 149.864 m³/h no cenário A e 343.882 m³/h no cenário B.

Figura 46 – Produção de biometano no Brasil nos cenários estudados, 2015 – 2030.

Fonte: a autora.

Retomando as definições dos cenários considerados nesta pesquisa, a diferença dos resultados das projeções se deve principalmente à consideração de que no Cenário A foi considerada a separação prévia da fração úmida conforme as metas do plano nacional de Resíduos Sólidos, ou seja, da matéria orgânica dos resíduos sólidos urbanos, em uma etapa anterior ao aterramento, consequentemente reduzindo a formação de biogás.

Outros dois estudos se propuseram, de maneira semelhante ao executado nesta pesquisa, a estimar a quantidade de biogás produzida, e, portanto, emissões de metano, decorrentes da destinação final de resíduos sólidos urbanos. O “*Segundo Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa: Emissões de Gases de Efeito Estufa no Tratamento e Disposição de Resíduos*”, elaborado pela CETESB e doravante referenciado como inventário nacional de emissões de GEE, apresenta resultados para o período de 1990 até 2005, enquanto o “*Estudo sobre o Potencial de Geração de Energia a partir de Resíduos de Saneamento (lixo,*

esgoto), visando incrementar o uso de biogás como fonte alternativa de energia renovável”, conduzido pelo PNUD, estima a produção de biogás passível de recuperação em locais selecionados entre 2010 e 2020.

O inventário nacional de emissões de GEE para o setor de resíduos é parte integrante de uma série de documentos que compõem a Comunicação Nacional à Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, que por sua vez é compreende estimativa de emissões de GEE para diferentes setores da economia. O relatório referente ao setor de resíduos se preocupou em estimar a emissão de metano decorrentes da disposição de resíduos sólidos em todas as tipologias de locais de disposição final observadas no Brasil, incluindo vazadouros a céu aberto.

Assim, os resultados do inventário nacional de emissões de GEE correspondem ao total de gás de aterro formado e emitido para a atmosfera e não apenas a quantidade de gás passível de ser aproveitada para fins energéticos. A Figura 47 apresenta uma comparação entre os resultados do inventário e os obtidos nessa pesquisa, igualmente para a quantidade de biogás gerado pela disposição final de resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários e controlados e vazadouros a céu aberto³⁴, entre 1990 e 2005.

Figura 47 – Comparação de resultados do Inventário Nacional de Emissão de GEE e da pesquisa.
Fonte: a autora, Alves e Vieira (2010).

Como pode ser observado na figura acima, as curvas de emissão de metano do inventário

³⁴ As curvas de geração de biogás em aterros obtidas para os dois cenários considerados nesta pesquisa apresentam resultados diferentes a partir de 2010, ano em que as premissas para cada um dos cenários começam a se diferenciar entre si a partir das considerações sobre o cumprimento da PNRS sobre o encerramento de lixões e a separação prévia da fração orgânica dos resíduos.

nacional de emissões de GEE não são coincidentes com a curva resultante da estimativa apresentada nesta pesquisa. Esta diferença pode ser explicada pelos seguintes fatores:

- O inventário nacional adotou uma versão do modelo proposto pelo IPCC anterior à que foi utilizada nesta pesquisa;
- A execução do inventário nacional considerou dados desagregados, que em alguns casos chegavam ao nível dos municípios, para variáveis relevantes da condução das estimativas, como: clima, composição gravimétrica dos resíduos e quantidade de resíduos gerada. Por outro lado, os dados considerados na elaboração da presente pesquisa foram agregados e são limitados quanto a capturar as diferenças regionais, consequentemente, subestimando os resultados.

Apesar dessas diferenças, ao final do período em que é possível realizar a comparação entre os resultados do inventário nacional de GEE e os resultados da pesquisa, pode-se perceber que as curvas tendem a se aproximar. Ambas as séries de dados utilizados no relatório da CETESB e na presente pesquisa se iniciam em 1970. No entanto, além da incompletude dos dados históricos do setor de resíduos, diferentes fontes de dados foram utilizadas. No decorrer da série de dados, mais precisamente a partir da década de 1990, o IBGE se preocupou em aprimorar os dados do setor de resíduos e pode-se observar uma maior coincidência nas fontes de dados utilizadas. Desse modo, essa tendência pode ser explicada pela congruência de informações utilizadas para o cálculo das duas estimativas.

Como conclusão, pôde-se admitir que o dimensionamento obtido na presente pesquisa tende a ser consistente com as estimativas nacionais para o período de análise (2015 a 2030) e é adequado para obtenção do objetivo desejado, qual seja entender a ordem de grandeza da disponibilidade do recurso para inferir suas possíveis aplicações.

Com relação ao estudo conduzido pelo PNUD, além de ter sido considerado no contexto de planejamento dos setores energético e de saneamento, uma vez que seus resultados são considerados no Plano Nacional de Resíduos Sólidos e também estão refletidos nas análises conduzidas em diversos documentos da EPE (por exemplo, Estudo de Demanda do PNE2050), os anos considerados para o reporte de seus resultados coincidem, em parte, com o intervalo de tempo adotado para a análise de resultados desta pesquisa (Tabela 21).

Tabela 21 – Resultados emissão de metano Relatório PNUD e cenários da pesquisa, em milhões m³/ano.

Ano	Relatório PNUD	Cenário A	Cenário B
2010	1.615	1.574	1.566
2011	1.625	1.663	1.666
2012	1.619	1.726	1.757
2013	1.539	1.767	1.839
2014	1.495	1.785	1.908
2015	1.442	1.800	1.984
2016	1.405	1.801	2.053
2017	1.371	1.791	2.119
2018	1.371	1.773	2.182
2019	1.351	1.749	2.243
2020	1.322	1.720	2.302

Fonte: a autora; PNUD, MMA e ARCADIS TETRAPLAN (2010).

Os resultados obtidos nesta pesquisa se mostraram coincidentes com o resultado inicial das estimativas apresentadas no estudo do PNUD. Isso pode indicar que os resultados aqui apresentados foram subestimados, uma vez que em sua análise o PNUD considerou o aproveitamento energético potencial de apenas 56 aterros em operação no país à época de condução do estudo. Segundo o Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos de 2014 conduzido pelo Ministério das Cidades, naquele ano, existiam 731 aterros sanitários ou controlados em operação no país (SNSA, 2016). De maneira oposta, o dimensionamento proposto pela pesquisa não considerou locais de disposição, mas sim a quantidade total de resíduos sólidos urbanos coletados no país e a proporção da destinação final para aterros sanitários ou controlados.

Como pode ser observado na Figura 48, o ângulo de inclinação das curvas dos cenários considerados na pesquisa e do resultado apresentado pelo PNUD também diferem, indicando que enquanto nas estimativas do PNUD haverá um decréscimo na disponibilidade de biogás, os cenários considerados na pesquisa não apontam para uma diminuição do recurso durante o período analisado. Isto porque a curva do PNUD considera aterros específicos nas estimativas e é esperado que a formação de biogás decaia com o tempo. Já o Cenário A, considera que a partir de 2015 menos resíduos orgânicos serão dispostos em aterros e o Cenário B assume que a geração de resíduos será crescente pelos próximos anos, não haverá separação de matéria orgânica e serão totalmente dispostos em aterros sanitários e controlados.

Figura 48 – Comparação dos resultados com estimativas do PNUD.

Fonte: a autora e PNUD, MMA e ARCADIS TETRAPLAN (2010).

Apesar das diferenças mencionadas acima, entende-se que o dimensionamento aqui proposto não apresenta distorções excessivas e fornece indicativos adequados da ordem de grandeza do potencial de biometano de gás de aterros disponível para aproveitamento energético no país, para então discutir quais usos finais poderiam ser promovidos.

A partir da validação do dimensionamento conduzido pela pesquisa através da comparação de seu resultado com os de outros dois estudos explorados acima, o potencial de substituição do gás natural foi avaliado considerando as projeções de consumo de gás natural realizadas pela EPE (EPE, 2014b). Os dois cenários propostos pela pesquisa, revelam-se interessantes, sob o ponto de vista de confiabilidade do suprimento nos próximos anos, para os setores “residencial” e “comercial, público e agropecuário”, tomados individualmente, sendo que a vazão calculada seria suficiente para atender a demanda de Gás Natural até 2020.

O setor de transportes também poderia ser beneficiado caso o potencial energético do gás de aterros fosse explorado para a produção de biometano, uma vez que para o Cenário B atenderia mais da metade da demanda anual do setor por gás natural até 2030. Quanto ao Cenário A, ainda que o suprimento decaia ao longo da série analisada, o biometano de aterros poderia atender, ainda em 2030, a mais que 30% da demanda de gás natural do setor de transportes (Figura 49).

Figura 49 – Potencial de substituição de gás natural por biometano.

Fonte: a autora, EPE (2014b).

Ao utilizar o metano emitido pelos aterros em substituição do gás natural de origem fóssil, o aproveitamento energético do biometano contribui para a redução de emissão de GEE. Por meio do Decreto nº. 7.390, de 9 de dezembro de 2010, o governo brasileiro assumiu metas de redução de GEE para diferentes setores, incluindo o setor de processos industriais tratamento de resíduos (BRASIL, 2010c). As projeções que constam do decreto governamental apontam que, em 2020, este setor será responsável pela emissão de 234 milhões tCO₂eq.

Em termos de redução das emissões de gases do efeito estufa, a vazão obtida em 2020, no Cenário A, é equivalente à redução de emissão de 28.200.677 tCO₂eq devido à utilização do biogás de aterro (metano evitado) e 3.597.831 tCO₂ pela substituição do gás natural por biometano, ou seja, em conjunto, representam 14% das projeções do governo para 2020. No

cenário B, em 2020, a projeção resulta que seria possível evitar a emissão de 37.753.060 tCO₂eq pela utilização do biogás de aterro e reduzir a emissão de GEE pela substituição do gás natural em 4.816.521 tCO₂, o que equivale a 18% das projeções do governo. Os cálculos das reduções de GEE estão detalhados no Apêndice B.

Apesar dos resultados obtidos, é importante destacar, no entanto, que, segundo a EPE existem barreiras ao aproveitamento energético do biogás que limitam a sua penetração no mercado em 20% do total de biogás potencial. Para essa instituição, considerando os usos competitivos do biogás (geração de eletricidade e produção de biometano), especificamente para o biometano, apenas 14% do potencial máximo de produção seria explorado até 2050 (EPE, 2014b).

5. ANÁLISES E DISCUSSÕES

5.1. Considerações sobre as escolhas metodológicas

A adoção de técnicas utilizadas na elaboração de revisões sistemáticas de literatura, descritas no capítulo introdutório, se mostrou pertinente. A análise não só dos artigos selecionados, mas também daqueles que foram descartados, durante o processo de sua aplicação permite que ponderações sobre o objeto de pesquisa sejam feitas sobre a pertinência do uso da técnica em si, relevância dos artigos utilizados como referência para a pesquisa, estágio de desenvolvimento do biometano no contexto internacional e adequação da seleção dos países estudados.

Os artigos utilizados como fonte da pesquisa, principalmente aqueles relacionados às dimensões tecnológica e econômica, são referenciados entre si. Deste modo, apesar de poucos artigos terem sido de fato utilizados (15 de um total de 42) pode-se constatar que o trabalho de autores relevantes foi capturado. Um dos autores é inclusive mencionado em documentos da EPE.

Os artigos que não foram selecionados versam, em sua maioria, sobre aspectos que envolvem a produção de biogás e biometano a partir da digestão anaeróbica e outros substratos, que não somente o gás de aterro. Estes artigos não foram considerados por não se adequarem à pergunta de pesquisa. No entanto, por terem sido observados em grande frequência são capazes de demonstrar que, internacionalmente, a produção de biometano já se encontra em um estágio de desenvolvimento superior ao identificado para o contexto brasileiro.

Ao menos nos países selecionados neste estudo, o aterramento de resíduos não é mais uma realidade (como observado nos casos da Alemanha e Suécia), ou é fortemente desencorajado (Reino Unido, por exemplo). A não utilização de aterros fez com que países interessados na produção de biometano, pelos diferentes fatores estudados e detalhados na próxima seção, buscassem outras fontes para obtenção de biogás, como as culturas energéticas. Esta informação é importante por subsidiar a argumentação de que existem diferentes realidades entre o Brasil e no mundo, em especial no setor de saneamento.

Dos quinze artigos efetivamente referenciados na presente pesquisa e que foram obtidos no processo de revisão sistemática, treze são afiliados a Universidades europeias ou escrevem

sobre o contexto da região. Um artigo selecionado é dos Estados Unidos e outro é brasileiro. Isto demonstra que a revisão efetuada corroborou com a escolha de países europeus dada a especificidade do problema de pesquisa e de sua pergunta norteadora.

Por fim, muitas das referências e fontes de dados utilizados pelos artigos selecionados foram igualmente consultadas e contribuíram para as análises detalhadas nas próximas seções deste capítulo, que consistem na avaliação das informações apresentadas nos capítulos anteriores, com objetivo final de identificar as condicionantes para a utilização do biometano a partir de gás de aterros no Brasil, bem como ponderar sobre quais as perspectivas futuras se apresentam para viabilizar seu uso como combustível veicular ou injeção em gasodutos de distribuição de gás natural

5.2. A exploração energética de biometano nos países selecionados

O biogás vem sendo utilizado, historicamente, no provimento de serviços energéticos, como o aquecimento, geração de eletricidade e combustível. A partir do levantamento de seu desenvolvimento recente na Alemanha, Suécia e Reino Unido, três fatores aparentam ter contribuído para que este recurso novamente ganhasse destaque: *(i)* o problema da gestão de resíduos, *(ii)* a segurança do suprimento de energia e *(iii)* as mudanças climáticas.

No contexto europeu, a aprovação das Diretivas Europeias que tratam especificamente da questão dos resíduos é um importante marco na produção de biogás, uma vez que determinou que os países aprimorassem o manejo aplicado aos seus resíduos. Uma consequência destas regulações é a confiabilidade do suprimento de biogás. A diminuição do aterramento de resíduos, em especial a fração orgânica, promoveu, em alguns países, uma diversificação dos substratos utilizados na produção de biogás, anteriormente obtida a partir de gás de aterros. Neste sentido, a ausência de contaminantes prejudiciais ao desempenho de máquinas e motores e a maior concentração de metano obtida em processos de digestão anaeróbica, contribuíram para que culturas energéticas e resíduos agrícolas fossem mais amplamente utilizados na região.

A expansão da utilização do gás natural na Europa foi alcançada por um aumento da infraestrutura disponível para sua distribuição e políticas destinadas a promover seu uso, como os benefícios observados para a compra de veículos movidos a gás observados na Suécia. No entanto, a necessidade de importação deste recurso e a dinâmica internacional do mercado de

gás natural, aspectos relacionados à segurança do suprimento energético, obrigaram muitos países a buscar novas fontes de energia.

Neste contexto, novamente as Diretivas Europeias surgem como vetores de transformação do setor de energia da região, por determinarem o aumento do uso de fontes renováveis de energia nas matrizes energéticas dos países europeus. Assim, o biogás passou a ser uma opção atrativa, tanto do ponto de vista energético, visto que a infraestrutura já estava disponível e o uso disseminado, quanto do ponto de vista de diminuição de emissões de GEE, por corresponder a uma fonte de energia renovável.

O estudo do desenvolvimento recente do biometano na Alemanha ilustra todos estes aspectos. O país injeta na rede de distribuição de gás natural, que é uma das maiores malhas de gasodutos da Europa, a maior parte do biometano produzido. As especificações técnicas impostas por regulamentação específica referente à produção de biometano, tiveram como consequência a exclusão do uso de gás de aterros como substrato para a produção de biogás, assim, as culturas energéticas, que também apresentam maior rendimento nos processos de purificação de biogás (menos contaminantes e maior concentração de metano no biogás) em conjunto com políticas de desenvolvimento do meio rural, ganharam destaque.

O uso veicular do biometano na Alemanha é expressivo, mas também têm destaque as políticas relacionadas à promoção do seu uso para geração de energia e calor. Nesse sentido, o esquema de certificados de energia renovável para produtores de eletricidade e as tarifas *feed-in* incentivam a produção de eletricidade com biometano obtido a partir da rede de distribuição de gás natural. Também as cotas de geração de calor por fontes renováveis geram demanda por este recurso energético.

O biogás extraído de aterros sanitários ainda hoje corresponde ao substrato mais utilizado para produção de eletricidade a partir do biogás no Reino Unido, apesar dos significativos esforços realizados no país através da aprovação de políticas que têm como objetivo uma melhor gestão dos resíduos, reduzindo a disposição final de resíduos em aterros. Uma vez que o Reino Unido também está sujeito às políticas para aumento no uso de energias renováveis imposto pelas Diretivas Europeias, os esforços das políticas de resíduos se somaram e a região tem presenciado um aumento no número de plantas de purificação de biogás, que se dá, majoritariamente, através da expansão das plantas de digestão anaeróbica que fazem uso de culturas energéticas, embora o uso do biogás de aterros para produção de biometano não seja limitado pelas especificações técnicas do produto.

As regulações impostas pelo governo, por exemplo as obrigações renováveis e eletricidade

e combustíveis de transporte, criam demanda para a produção do biometano ao mesmo tempo que geram incentivos aos produtores através do pagamento de tarifas *feed-in*, comercialização de certificados renováveis e isenção de taxas.

O aproveitamento energético de resíduos na Suécia não é recente e se mostrou o mais exitoso dentre os países selecionados neste estudo. O completo banimento do aterramento de resíduos desde 2005 e a obrigação de aproveitamento energético em estações de tratamento de efluentes podem ser vistos como fatores que impulsionaram o uso energético do biogás.

As políticas de incentivo ao uso de carros movidos a gás favoreceram o uso do biometano como combustível veicular. A característica da rede de gasodutos do país, concentrada mais ao sul, também pode ser apontada como possível contribuinte da escolha de priorização do uso do biometano como combustível veicular, que de tão proeminente no país, contribui para que a Suécia já alcançasse os objetivos das Diretivas Europeias em relação ao uso de fontes renováveis no setor de transportes.

A Tabela 22 apresenta as condicionantes para a produção de biometano observadas nos países selecionados, para as três dimensões pesquisadas: legal-institucional, tecnológica e econômica.

Tabela 22 – Características e condicionantes do desenvolvimento do biometano nos países selecionados.

Dimensão/Característica	Alemanha	Reino Unido	Suécia
Capacidade de injeção de biometano na rede	• 95.000 Nm ³ /h (2014)	• 19.470 Nm ³ /h (2014)	• 1.724 Nm ³ /h (2009)*
Representatividade do biometano no setor de transportes	• 22% (2013)	• Sem informação	• 61% (2013)
Legal-institucional	<ul style="list-style-type: none"> • Do lado da demanda arcabouço legal torna compulsório o uso de fontes renováveis favorecendo o uso de biometano como fonte para geração de eletricidade e calor • Do lado da oferta, destaque para a legislação que determina prioridade de acesso à rede aos produtores de biogás 	<ul style="list-style-type: none"> • Estabelecimento de cotas obrigatórias para o uso de fontes renováveis na geração de eletricidade e transportes 	<ul style="list-style-type: none"> • Aterramento sanitário de resíduos proibido desde 2005 • Aproveitamento energético em estações de tratamento de efluentes é compulsória • Não apresenta regulação específica para a promoção do biometano, que deve respeitar as mesmas normas estabelecidas para o gás natural • Especificações excluem o gás de aterros
Tecnológico	<ul style="list-style-type: none"> • Políticas voltadas ao desenvolvimento rural, restrições ao aterramento de resíduos e melhor rendimento, fomentaram o uso de culturas energéticas • Ampla rede de gasodutos como facilitadora da injeção na rede • Maior utilização para a produção de energia elétrica em plantas de cogeração de pequena escala, a partir do gás obtido por gasodutos 	<ul style="list-style-type: none"> • Criação de protocolos com a definição de critérios de sustentabilidade e especificações do biometano não restringem gás de aterro, principal fonte de biogás • Geração de eletricidade com biogás de aterros é destaque, mas tem perdido importância para a digestão anaeróbica de culturas energéticas • Biometano ainda em expansão 	<ul style="list-style-type: none"> • Grande parte do biogás produzido é purificado e utilizado como combustível veicular. • A maioria das plantas não utiliza os gasodutos para a distribuição. • Biogás obtido a partir de culturas energéticas através de digestão anaeróbica
Econômico	<ul style="list-style-type: none"> • Tarifas <i>feed-in</i> são o principal mecanismo de incentivo para geração de eletricidade • Prêmios sobre as tarifas pagas ao produtor de biometano e custos menores de conexão são facilitadores da injeção na rede 	<ul style="list-style-type: none"> • Certificados de energia renovável para cogeração, eletricidade e produção de calor como incentivos ao produtor • Isenção de taxas de CO₂ incentivam o consumo. • Tarifas <i>feed-in</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Tributos para combustíveis fósseis que aumentam a competitividade do biometano • Incentivos históricos ao uso de carros movidos a gás, e mais recentemente biometano, contribuíram para a boa aceitação pública e expansão do uso

Fonte: a autora.

* Total de biometano efetivamente injetado na rede de distribuição, ou seja, diferentemente dos outros países, esta informação não diz respeito à capacidade de produção para injeção.

5.3. O biometano de aterros no Brasil

5.3.1. Dimensão legal-institucional

Apesar dos novos contornos que a gestão de resíduos sólidos apresentou nos últimos anos em consequência da adoção da hierarquia da gestão de resíduos que prioriza o tratamento dos resíduos sólidos urbanos em detrimento de sua disposição final, a abertura, operação e manutenção de aterros ainda figurará como importante questão, em especial em países em desenvolvimento, como o Brasil. Nesse sentido, a aprovação de um marco regulatório específico para a gestão de resíduos no país foi de fundamental importância. Ademais, a Política Nacional de Resíduos Sólidos explicitamente considera o aproveitamento energético dos gases gerados em unidades de disposição final, o que evidencia a importância de as políticas desenvolvidas no âmbito dos setores de saneamento e de energia convergirem para que a exploração energética do biogás gerado nessas unidades seja efetiva.

A distinção entre resíduos e rejeitos, conforme conceito apresentado pela PNRS, merece referência, pois impacta diretamente a produção futura de gás de aterros, as metas relacionadas à separação da fração úmida dos resíduos sólidos e o prazo para encerramento dos vazadouros abertos (lixões) ainda observados, em frequência maior do que a desejada, no Brasil. Segundo o texto da lei, apenas os rejeitos devem ser encaminhados para disposição final, enquanto os resíduos, uma vez esgotadas as possibilidades de não geração, reuso e reciclagem, ainda são passíveis de receberem tratamento, que pode ser acompanhado de aproveitamento energético.

Cumprida a determinação de diminuição de disposição final de resíduos em função da distinção entre resíduos e rejeitos, a produção futura de biogás em aterros diminuirá. Isto porque a matéria orgânica, correspondente à fração úmida dos resíduos sólidos urbanos e responsável pela produção de biogás, é entendida como resíduo, e neste sentido, passível de tratamento, como a compostagem (fortemente incentivada pela PNRS), ou digestão anaeróbica. Ou seja, ao optar pela separação prévia da matéria orgânica, a PNRS compromete a confiabilidade de suprimento futuro do biogás de aterro. Diante deste cenário, outros substratos e tecnologias para a produção de biogás ganham destaque, como observado no cenário internacional.

Ainda assim, é conveniente salientar que a promoção da separação prévia da fração orgânica apresenta uma série de benefícios. Sob o ponto de vista energético, maior

produtividade de geração de biogás é obtida, e consequentemente, maior deslocamento de fontes fósseis de energia e redução de emissões de GEE. Outro benefício é a ampliação das rotas de utilização do biogás produzido a partir de resíduos, uma vez que este processo elimina a formação de contaminantes presentes no biogás extraído de aterros. Por fim, a separação na fonte e o aproveitamento energético da matéria orgânica dos resíduos sólidos urbanos fomenta a geração descentralizada de energia já que adota outra escala para a produção de biogás, como, por exemplo, pequenos digestores em residências ou condomínios.

No setor de saneamento, as vantagens da separação prévia da matéria orgânica e tratamento dos resíduos se traduzem em uma diminuição da necessidade de aterramento dos resíduos, consequentemente aumentando a vida útil dos locais de disposição final já existentes e postergando a necessidade de abertura de novos depósitos. No entanto, decorridos cinco anos desde a aprovação da PNRS, iniciativas na direção de promover o tratamento e aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos não são verificadas em larga escala no país. Apesar da baixa eficácia na implantação das diretrizes da PNRS, o gás de aterros permanece como oportunidade para o aproveitamento energético do biogás e sua exploração pode ser um vetor para a recuperação dos lixões (elevados à categoria de aterros controlados), melhoria dos aterros sanitários em operação e instalação de novos aterros sanitários.

A exploração energética do biogás para produção de biometano utilizado enquanto substituto ao gás natural de origem fóssil é relativamente recente no exterior, como foi possível constatar através do levantamento da experiência internacional e data de aproximadamente uma década, quando, em 2006, a primeira planta de biometano em escala comercial foi implantada na Alemanha (ver seção 3.1). O PNE2030, elaborado nesta época e publicado em 2007, apenas menciona o papel marginal do biogás na matriz de energia do Brasil.

Os primeiros projetos de biometano começaram a ser executados no país por volta de 2012. Ao mesmo tempo, as iniciativas conduzidas em nível regional para promoção do biometano pelos estados do Rio de Janeiro e São Paulo contribuíram para caracterizar a ressurgência do aproveitamento do biogás enquanto recurso energético. As políticas aprovadas por esses estados, objetivam incentivar a produção de biometano para injeção na rede de distribuição de gás natural, já em 2012, quando os planos nacionais e estaduais de resíduos, e no caso de São Paulo, também os planos de energia, ainda não apontavam a produção de biometano como possível aplicação do biogás.

O resultado da análise cronológica da implantação de políticas, planos e programas voltados ao objeto de estudo, demonstra, portanto, o descompasso entre a formulação e

aprovação das políticas dos setores de saneamento e energia, a execução de projetos pela iniciativa privada e a normatização das especificações técnicas do biometano pelas agências reguladoras do setor de energia, tanto em nível nacional, como nos casos regionais estudados.

Exemplos que justificam esta afirmação são a aprovação tardia das especificações técnicas do biometano e sua incorporação tardia no planejamento de oferta futura de energia. Somente no início de 2015, a resolução da ANP específica para o biometano foi aprovada, quando projetos de produção de biometano já estavam operacionais há pelo menos dois anos, por exemplo, a planta localizada no AMJG. Apenas a partir da publicação dos estudos de demanda de energia que farão parte do PNE 2050, em 2014, a EPE apontou com destaque o potencial de produção de biometano, principalmente com relação à sua importância enquanto biocombustível. A Figura 50 ilustra o descasamento cronológico entre as políticas de saneamento e energéticas analisadas na pesquisa.

Figura 50 – Cronologia das proposições de políticas, planos e programas dos setores de energia e saneamento.

Fonte: a autora.

As análises e discussões apresentadas acima sobre a dimensão legal-institucional acerca da produção de biometano de gás de aterros no Brasil e nos estados de São Paulo e Rio de Janeiro foram classificadas enquanto barreiras e oportunidades para o seu desenvolvimento, conforme apresentado na tabela abaixo.

Tabela 23 – Condicionantes da dimensão legal-institucional

	Barreira	Oportunidade
Brasil	<ul style="list-style-type: none"> • Hierarquia da gestão de resíduos prioriza a separação na fonte e uma vez implantada influencia a geração futura de gás de aterro • Plano Nacional de Resíduos Sólidos pendente de aprovação • Plano Nacional de Resíduos Sólidos apresenta metas de aproveitamento energético de biogás apenas para a geração de eletricidade • Documentos de planejamento do setor elétrico (PNE2030, por exemplo) não consideram o biogás • Resolução ANP restringe o uso de biometano de gás de aterro • Descompasso entre políticas do setor de saneamento e energético 	<ul style="list-style-type: none"> • PNRS prevê a extinção de vazadouros e adequação de aterros controlados • PNRS considera o aproveitamento energético gases de aterro • Aprovação das especificações técnicas do biometano pela ANP que permitem o uso como combustível veicular em frotas cativas • Estudo de Demanda do PNE2050 destaca a produção de biometano a partir de resíduos
São Paulo	<ul style="list-style-type: none"> • Programa Paulista de Biogás destaca biogás de vinhaça, fala em cotas compulsórias para as distribuidoras, mas não especifica a porcentagem • Programa Paulista de Biogás pendente de revisão para incorporar a Resolução ANP N°8 • ARSESP ainda não deliberou sobre a injeção de biometano em gasodutos 	<ul style="list-style-type: none"> • Plano de Resíduos aponta para a possibilidade de produção do biometano, apesar de não considerar metas para a sua execução
Rio de Janeiro	<ul style="list-style-type: none"> • Plano estadual de resíduos apenas considera geração de eletricidade • ARGENERSA ainda não deliberou sobre a injeção de biometano em gasodutos 	<ul style="list-style-type: none"> • Política Estadual de Gás Natural Renovável destaca gás de aterro e cria demanda por biometano ao tornar compulsória sua aquisição por parte das concessionárias de gás do estado (10% do total de gás fornecido, excetuando o destinado a geração termelétrica) • Aterros com condições de extração de biogás através da implantação do Programa Lixão Zero • Sinergia a partir de Leis de incentivo ao uso de GNV e interiorização dos gasodutos do estado

Fonte: a autora.

5.3.2. Dimensão tecnológica

O gás de aterro apresenta propriedades físico-químicas distintas do biogás obtido em processos de decomposição da matéria orgânica a partir de outros substratos, como por exemplo resíduos agrícolas e culturas energéticas. Além de possuir uma menor concentração de metano,

o gás de aterro, apresenta contaminantes em sua composição, tais como os siloxanos, que acabaram por limitar suas aplicações, ou até mesmo, restringir seu uso como fonte de energia. Desse modo, o aprimoramento das técnicas utilizadas para a purificação do biogás foi, sob o aspecto tecnológico, um vetor para o aumento de sua utilização, uma vez transformado em biometano.

Quatro diferentes métodos empregados atualmente na purificação de metano foram apresentados em seções anteriores. O método mais eficiente na purificação do biogás, uma vez que resulta em um produto com maior concentração de metano, embora não exista diferença significativa entre as tecnologias analisadas, é a lavagem química. Outra importante vantagem deste método está nas reduzidas taxas de perdas de metano durante o processo de purificação, o que é importante uma vez que este parâmetro também é levado em conta pela regulação de alguns países em função das metas de emissão de redução de emissões de GEE (Tabela 24).

Tabela 24 – Parâmetros técnicos das principais técnicas de purificação de biogás.

Parâmetro	Lavagem com água	PSA	Lavagem química	Membranas
Concentração de CH ₄ (%)	>97%	>96-98%	99,5-99,9%	98 – 99%
Perdas de CH ₄ no processo (%)	1-2%	<3%	0.05-0.1%	<2%

Fonte: a autora a partir de Muñoz et al. (2015) e Thrän et al. (2014)

As perdas de metano observadas no processo de purificação do biometano constam das regulações dos países analisados, mas não consta nenhum indicador para esta característica de processo na norma da ANP. De acordo com a Resolução ANP N° 8, a especificação para a concentração mínima de metano no biometano é de 90% mol a 94% mol para as regiões Norte abastecidas com o gás natural de Urucu, e 96,5% mol para as demais regiões do país. A partir dos dados apresentados na tabela acima pode-se concluir que o uso de qualquer uma das tecnologias mais difundidas mundialmente satisfará as exigências da agência.

Para o gás natural, a concentração mínima exigida de metano é 68% mol para a região Norte, e 85% mol para as demais regiões. A exigência de uma concentração mínima inferior para o gás natural não caracteriza uma maior restrição ao uso do biometano. Isto porque o gás natural também apresenta em sua composição etano e propano, gases igualmente combustíveis. Em termos de energia, como observado na Tabela 4 (Seção 2.2.1), o biometano apresenta poder calorífico compatível ao do gás natural, o que, de fato, o caracteriza como substituto do gás natural.

A infraestrutura disponível para a distribuição do biometano foi outro aspecto tecnológico

avaliado. A experiência observada nos países selecionados demonstra que a infraestrutura disponível influencia o tipo de uso final destinado ao biometano. Enquanto a Alemanha, que apresenta uma das maiores malhas de gasodutos da Europa, tem demonstrado um maior avanço na produção de biometano para a injeção na rede, a Suécia, que possui malha menos densa e concentrada no sul do país, priorizou o uso veicular do biometano.

A rede de gasodutos brasileira não é extensa e está concentrada no litoral. De maneira semelhante, o país não conta com uma rede extensa de abastecimento de GNV, sendo que mais da metade dos postos de revenda estão concentrados na região Sudeste do País, como descrito na seção 4.2. *Aplicações e perspectivas de expansão da produção e uso do biometano*. Além destes fatores estruturais, especificamente para o biometano de gás de aterro, as especificações técnicas não permitem sua injeção do biometano de gás de aterros em gasodutos, uma vez que sua mistura com o gás natural não é permitida. No entanto, o uso de biometano de aterros enquanto combustível veicular para frotas cativas, já realizado no Brasil para o biogás em tempos passados, é permitido pela ANP, desde que obtida aprovação emitida pela agência.

A avaliação presente na seção 4.3. (Figura 49) demonstra que os setores residencial e comercial/público/agropecuário apresentam um balanço oferta/demanda mais compatível com o potencial de produção do biometano de aterros, apresentando-se como virtuais candidatos para a substituição de gás natural de origem fóssil, em termos de quantidade (isto é, sem considerar questões culturais, de segurança, disponibilidade de aparatos de uso final e outros fatores). Ao considerarmos as características da cadeia de suprimento de gás natural, outra forma de distribuição pode ser adotada para estes setores, como por exemplo através cilindros pressurizados. Dessa maneira as barreiras impostas pela especificação técnica e infraestrutura disponível são reduzidas.

O quadro abaixo apresenta as condicionantes identificadas para a dimensão tecnológica, classificadas como barreiras e oportunidades para o aproveitamento energético de gases de aterro para a produção de biometano em nível nacional. Não foram identificadas barreiras ou oportunidades no nível regional da análise realizada na pesquisa.

Tabela 25 – Condicionantes da dimensão tecnológica.

	Barreira	Oportunidade
Brasil	<ul style="list-style-type: none"> • Malha de gasodutos e quantidade de postos de distribuição de GNV pouco extensa • Inexistência de tecnologia nacional 	<ul style="list-style-type: none"> • Analogamente à cadeia de suprimento de gás natural, o biometano pode ser distribuído por cilindros • Desenvolvimento de soluções nacionais

Fonte: a autora.

5.3.3. Dimensão econômica

A utilização energética do biogás de aterros no Brasil se concentra na produção de eletricidade. No entanto, a relevância da fonte na matriz de eletricidade do país e sua participação em programas e políticas do setor de energia de fomento ao uso de fontes renováveis de energia é inexpressiva e pode ser atribuída à sua pouca competitividade, quando comparada a outras tecnologias com rápida expansão no mercado nacional, como a eólica, que registram tarifas de eletricidade mais atrativas sob o ponto de vista econômico e de viabilidade do negócio. Apenas um projeto logrou êxito em negociar a eletricidade gerada, em ambiente regulado, e nenhum projeto foi aprovado para participar do PROINFA, como apresentado na seção 2.3.1.

Para a condução de qualquer projeto de aproveitamento energético de gás de aterros, é necessário que um sistema de extração forçada de gás seja implantado. O processo de produção de biometano envolve etapas adicionais destinadas à sua purificação antes de sua utilização energética, em adição ao sistema de extração do gás de aterro. A comparação das técnicas de purificação de gás revelou que o método de lavagem com água se mostrou economicamente mais atrativo por apresentar menores custos de implantação e operação e manutenção (Tabela 26).

Tabela 26 – Custos das principais técnicas de purificação de biogás.

Tecnologia	Custos	Investimento* (EUR/Nm ³ h ⁻¹)	O&M* (EUR/Nm ³ h ⁻¹)
Lavagem com água		1.800,0	45
PSA		2.357,2	58,93
Lavagem química		2.633,3	65,83
Membranas		2.000,0	70

Fonte: a autora a partir de Muñoz et al. (2015) e Thrän et al. (2014).

* A comparação dos custos de investimento e operação e manutenção considerou uma planta de purificação com capacidade de processamento de biogás de 1.000Nm³/h.

As plantas de biometano de gás de aterro em operação no Brasil e mencionados anteriormente fazem uso de tecnologia importada já que não estão disponíveis equipamentos nacionais para este processo. Assim, aspectos como os custos envolvidos nas etapas adicionais de processamento além dos custos envolvidos na importação de equipamentos, manutenção e assistência técnica se constituem, naturalmente, em barreiras.

Crítérios como localização do aterro e atividades econômicas observadas em seu entorno

potencialmente consumidoras de biometano direcionam os usos finais e influenciam na sua execução, dada a viabilidade econômica percebida pelos investidores. O projeto do AMJG se beneficiou, por exemplo, da proximidade com a REDUC para distribuir o biometano produzido por um gasoduto dedicado de 6km. Por outro lado, apesar de atualmente ser distribuído por cilindros, a integração com o gasoduto da concessionária de gás natural local é o objetivo de projetos como o conduzido em Dois Arcos. A impossibilidade desta conexão, imposta atualmente pela regulação da ANP, pode ter impacto futuro na viabilidade do negócio.

Os custos envolvidos na produção e distribuição do biometano influenciarão em seu custo de aquisição. Como discutido nas seções anteriores, um aspecto importante, decorrente de o biometano ser intercambiável com o gás natural de origem fóssil é a sua competitividade, em termos econômicos, com outros combustíveis. No entanto, a produção de biometano apresenta externalidades positivas por corresponder a um combustível renovável e sua produção apresentar diversos co-benefícios, como por exemplo, redução de emissão de GEE e aprimoramento da gestão de resíduos, das principais características do biometano. Essa característica, ao ser internalizada no preço do biometano gera uma oportunidade para o seu desenvolvimento.

A Política Estadual de Gás Natural Renovável carioca autoriza que custos adicionais decorrentes da aquisição compulsória de biometano pelas concessionárias sejam repassados aos consumidores. De maneira oposta, a experiência observada nos países estudados demonstrou que os consumidores são beneficiados pela aquisição de biometano uma vez que os outros combustíveis fósseis são onerados através de taxas, por exemplo vinculadas a maior emissão de GEE.

Outra questão importante sob o aspecto econômico que envolve a produção e utilização do biometano está relacionada com a questão dos mecanismos de incentivo, quando estes forem financeiros. Fica evidente a partir da observação do histórico de conversões de veículos para GNV que a competitividade entre os combustíveis é um fator importante para a expansão do uso de um dado combustível. Neste caso, à medida que o preço do GNV deixou de ser regulado, e portanto, aumentou, uma queda acentuada na conversão de veículos foi registrada. Esta experiência demonstra que, enquanto os custos de produção do biometano forem elevados, sua utilização será restrita. Assim, a competitividade com outros combustíveis é percebida como uma barreira.

A Tabela 27 resume as principais questões avaliadas e discutidas até o momento para o cenário nacional, e regional, considerando os casos de São Paulo e Rio de Janeiro para a

dimensão econômica da produção de biometano a partir de gás de aterros.

Tabela 27 – Condicionantes da dimensão econômica.

	Barreira	Oportunidade
Brasil	<ul style="list-style-type: none"> • Custos de distribuição • Custos de produção • Competividade com outros combustíveis 	<ul style="list-style-type: none"> • Ganhos econômicos se internalizados os benefícios ambientais
São Paulo	<ul style="list-style-type: none"> • Aterros mais importantes de São Paulo já contam com plantas de geração de energia elétrica 	<ul style="list-style-type: none"> • Isenções fiscais para equipamentos e para o biometano • IPVA reduzido para veículos movidos a GNV
Rio de Janeiro	<ul style="list-style-type: none"> • Política Estadual de Gás Natural Renovável autoriza as concessionárias a repassarem os custos adicionais decorrentes da aquisição de biometano aos consumidores, por meio de reajuste nas tarifas 	<ul style="list-style-type: none"> • Demanda garantida pela Política de Gás Natural Renovável • Metodologia de formação de preço exigida pela Política Estadual de Gás Natural pendente • IPVA reduzido para veículos movidos a GNV

Fonte: a autora.

5.3.4. Questões adicionais

Entende-se que a existência de uma base de dados robusta e confiável é essencial para a formulação de políticas públicas que visem o uso de qualquer recurso que esteja disponível. Para o caso do objeto de estudo considerado nesta pesquisa, o biometano, constata-se que é essencial que as estatísticas do setor de resíduos estejam facilmente disponíveis e que sejam consistentes entre si. Durante a condução do estudo, sobretudo na etapa de dimensionamento do potencial de produção de biometano de gás de aterro, a falta de dados ficou evidente.

As pesquisas do setor de saneamento do IBGE não são contínuas e não apresentam dados desagregados que seriam necessários, como, por exemplo, composição do lixo, número de unidades de disposição final de resíduos em operação, por tipo de unidade, entre outros. Muitos dos documentos disponíveis no Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos (SINIR), um dos instrumentos da PNRS, igualmente não disponibilizam estas informações. Deste modo, faz-se necessária a consulta a diferentes bases de dados e documentos elaborados por outras instituições que não órgãos de governo, prejudicando a consistência entre as informações levantadas e consequentemente, dificultando a proposição e cumprimento de metas estabelecidas para o setor.

É igualmente importante ressaltar os aspectos sociais envolvidos na produção de biometano. A indústria das energias renováveis tem diversas externalidades positivas, além das ambientais e energéticas, o desenvolvimento do setor aquece a economia do país, contribui com a diminuição da importação de combustíveis e também gera empregos. No entanto, considerando o fechamento dos aterros e a diminuição do encaminhamento de resíduos para as unidades de disposição final, dependendo da condução das políticas governamentais para o setor de saneamento, externalidades sociais negativas poderão ser notadas.

A opção pela produção de biometano apresenta impactos sociais apesar dessa associação nem sempre ocorrer de forma tão evidente. Uma vez que se opte pela exploração energética do biogás de aterro, a adequação das unidades de disposição final será mandatória, incluindo o encerramento das atividades de catação que por ventura ocorrerem nos locais considerados. Nesta questão, deve-se, no entanto, considerar o fraco desempenho do país em fazer cumprir a legislação. A operação de vazadouros a céu aberto corresponde à crime ambiental, não devendo sequer serem observadas na atualidade, o que por sua vez gera questionamentos quanto à capacidade de o país alcançar os níveis de exploração energética dimensionados nesta pesquisa.

Esta externalidade negativa se apresentou como caso concreto no processo de fechamento do AMJG. Embora o aterro não tenha encerrado suas atividades exclusivamente para a produção de biometano, mas sim devido ao próprio esgotamento de sua vida útil, a constatação da viabilidade de sua produção tornou-se um dos principais argumentos em seu favor. Historicamente o setor de saneamento do Brasil tem sido negligenciado pelos governantes e a execução de projetos semelhantes aos do AMJG, o qual ao menos para o estado do Rio de Janeiro tende a ser replicado, legitimam a sua execução, apesar dos impactos ambientais e sociais verificados.

Assim, se por um lado as inovações tecnológicas contribuem para o enfrentamento de problemas ambientais, o descompasso entre o marco regulatório, a realidade da disposição de resíduos e a gestão governamental de recursos acentua problemas sociais, como diminuição da renda e manutenção da informalidade nas relações de trabalho.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FINAIS

Diferentes condições favoreceram o desenvolvimento de uma tendência mundial em aproveitar os resíduos sólidos, em particular, os resíduos sólidos urbanos, para fins energéticos. Como ilustração dessas condicionantes pode-se mencionar as Diretrizes Europeias que impuseram metas para o fim do aterramento de resíduos e de incremento no uso de fontes de energia renovável para seus países-membros. Assim, em países desenvolvidos, o crescimento populacional, a dependência de combustíveis fósseis, muitas vezes importados, e a crescente geração de resíduos, obrigaram que este movimento em favor do melhor aproveitamento desta fonte de energia acontecesse com certa antecedência e de maneira acentuada.

O aproveitamento energético de resíduos se desenvolveu em tal monta, que a utilização dos gases gerados em unidades de disposição de resíduos sólidos em aterros não configura mais como uma opção e para a exploração energética e considera, atualmente, outras matérias-primas, como por exemplo, o lodo de esgoto e culturas agrícolas cultivadas com o objetivo único de produção de energia. Como conclusão desse processo, é possível dizer que o fim do aterramento sanitário contribuiu para o aprimoramento das questões relacionadas ao aproveitamento energético de resíduos.

As políticas públicas nacionais discutidas na presente dissertação estimulam outras formas de tratamento de resíduos. Implicitamente a PNRS favorece a adoção da incineração de resíduos, técnica controversa tanto pelos altos custos de implantação e operação quanto pelos impactos ambientais decorrentes de sua adoção. Contudo, a digestão anaeróbica, além de gerar um biogás de maior qualidade (ausência de contaminantes importantes e maior conteúdo de metano) se adequa melhor à diretriz de redução de aterramento, conforme explicitado na hierarquia da PNRS, e, portanto, deveria ser estimulada, à semelhança do que foi estudado nos cenários dos países selecionados, para o tratamento dos resíduos orgânicos, componente majoritário dos resíduos sólidos urbanos do Brasil.

Especificamente para os gases gerados em aterros sanitários, foi possível identificar que a exploração do biometano no Brasil parece, em um primeiro momento, tecnicamente viável. Apesar da legislação do setor de saneamento preconizar outras formas de tratamento de resíduos, o aterramento ainda figurará como principal método para sua destinação final. A continuidade desta prática garante a confiabilidade futura de suprimento de biogás de aterro. No entanto, é necessário para que seu desenvolvimento ocorra em bases

sólidas, uma infraestrutura (gasodutos e postos de combustível), que ainda é pouco densa no país.

A diminuição da dependência de combustíveis fósseis e consequente redução de emissões de gases do efeito estufa, bem como a busca por melhores condições de saneamento são questões convergentes quando a promoção do uso do biometano é avaliada no Brasil, e deste modo, afiguram-se como oportunidades para o seu desenvolvimento. No entanto, o Brasil ainda apresenta uma gestão ineficiente dos resíduos sólidos, identificada na pesquisa como condição precedente para a sua produção, e o país não apresenta um arcabouço legal-institucional coerente e convergente entre os setores de energia e de saneamento.

Convém destacar que, apesar da presente dissertação ter se debruçado no uso energético do biometano, enquanto potencial substituto do gás natural, esse recurso igualmente pode ser utilizado como matéria prima na indústria química (por exemplo, em processos produtivos para a fabricação de polietileno e polipropileno). Outra vantagem do aumento de utilização do biometano em detrimento do gás natural é evidenciada quando as cadeias de suprimento desses dois combustíveis são comparadas entre si. Enquanto o biometano é produzido a partir de resíduos e requer apenas o emprego das etapas de extração do biogás e purificação, a cadeia de suprimento de gás natural é muito mais intensiva na utilização de recursos (financeiros e materiais) quando considerada desde a prospecção das jazidas, perfuração e exploração, transporte e distribuição até os consumidores finais.

Os resultados obtidos na estimativa do potencial máximo de biometano de gás de aterro existente no Brasil para os dois cenários elaborados pela pesquisa demonstram que apesar do recurso não ser relevante em termos energéticos, sua exploração, quando conduzida de maneira a otimizar o potencial existente pode significar um aprimoramento da gestão de resíduos sólidos no país através da apropriação energética do recurso e de sua reversão em benefício do setor de saneamento, historicamente negligenciado no país. Ou seja, neste contexto, a purificação do biogás aterro para produção de biometano passa a ser uma alternativa possível e pode contribuir, em última análise, para a melhoria das condições sanitárias no Brasil.

O Brasil é um país que possui situação favorável energeticamente, tanto do ponto de vista de reservas inexploradas de combustíveis fósseis quanto com relação às fontes renováveis, como outros tipos de biomassa (inclusive residual), energia hidráulica, eólica e solar. Dessa forma, constata-se que o maior benefício na utilização do biometano enquanto fonte de energia primária não reside em aumentar a participação de energia renováveis nas matrizes elétrica e energética do país, com a finalidade de deslocar outras fontes de energia mais poluentes, mas

sim se justificaria por contribuir com a gestão dos resíduos sólidos urbanos, aumentar a geração de empregos e reduzir as emissões de gases do efeito estufa.

Este estudo identificou que, especificamente para o biometano de gás de aterro, considerando a pouca extensão e distribuição da malha de gasodutos no país e a presença de contaminantes do gás que impedem, segundo a regulação vigente, sua mistura ao gás natural, a opção que melhor poderia ser explorada é a de uso como combustível veicular em frotas cativas ou distribuição por cilindros para os consumidores dos setores residencial e comercial. No entanto, estas possibilidades não estão refletidas nas políticas regionais de fomento à produção de biometano, ficando mais uma vez evidente a falta de integração entre as políticas em vigor no país, em seus diversos níveis e diferentes setores.

Ao final da pesquisa foi possível constatar que o levantamento do contexto internacional foi importante por revelar a importância da articulação das políticas do setor energético e de saneamento, bem como a efetiva implantação dos planos existentes e formulação de políticas de incentivo para o sucesso do aproveitamento energético do biogás para a produção e biometano.

Retomando o conceito de “*leapfrogging*” apresentado no capítulo introdutório, temos que para que os avanços tecnológicos ocorram é necessário que as condições precedentes estejam presentes e possibilitem que de fato o avanço aconteça. Para o objeto de estudo, algumas das principais condicionantes são tecnologia, infraestrutura e gestão de resíduos, as quais, como discutido ao longo da dissertação não se encontram desenvolvidas no Brasil, o que acaba por validar a hipótese delineada inicialmente, de que a exploração de biometano de gás de aterros será postergada em virtude da má gestão de resíduos no país e descasamento entre as políticas, planos e programas desenvolvidos nos setores de saneamento e de energia.

6.1. Sugestões para estudos futuros

Com relação ao potencial de geração de gás de aterro, a estimativa poderia ser feita de maneira menos agregada, considerando os estados ou até mesmo municípios, ou ainda considerando os aterros existentes e verificando as atividades econômicas do em torno desses aterros, com o objetivo de propor usos específicos para o biometano, em linha com os usos permitidos pela Resolução ANP.

Os Planos Nacionais³⁵ e Estaduais do Rio de Janeiro e São Paulo de resíduos devem ser revisados entre 2016 e 2018, respectivamente. Deste ponto, torna-se oportuno realizar estudos que visem integrar as visões de saneamento e energéticas para que a produção de biometano possa de fato contribuir para o desenvolvimento econômico, social e ambiental do país.

A presente pesquisa não se debruçou sobre os esforços governamentais, observados tanto em nível nacional quanto nos estados analisados, relacionados às mudanças climáticas no Brasil. Mas convém notar que o Brasil assumiu recentemente, em fóruns internacionais, compromissos de diminuição da emissão de GEE e os estados do Rio de Janeiro e São Paulo contam com políticas estaduais que versam especificamente sobre o tema. Dessa maneira, estudos futuros sobre a contribuição do biometano considerando tais políticas poderão prestar uma grande contribuição.

As políticas estaduais apontam para a elaboração de cotas e formação de preços específicos visando o incentivo do biometano. Uma vez que o biometano desloca o consumo de gás natural e seu aproveitamento energético apresenta várias externalidades ambientais positivas, como por exemplo a melhora na gestão de resíduos e diminuição da emissão de GEE, a elaboração de uma metodologia que aponte quais critérios devem ser considerados na formação de preço se afigura como uma excelente oportunidade para estudos futuros.

³⁵ O Plano Nacional de Resíduos não é formalmente aprovado por meio de decreto, mas foi elaborado em 2012. Segundo a PNRS os planos devem ser revisados a cada quatro anos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEGÁS - *Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Gás Canalizado*. **ABNT deve definir neste mês norma para biometano**. Disponível em: <<http://www.abegas.org.br/Site/?p=49143>>. Acesso em: 1 jan. 2016.

ABNT - *Associação Brasileira de Normas Técnicas*. **NBR 8419**: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

_____. **NBR 15849**: Resíduos sólidos urbanos - Aterros sanitários de pequeno porte - Diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e encerramento. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

_____. **Informações Institucionais**. Disponível em: <<http://www.abnt.org.br/abnt/missao-visao-e-valores>>. Acesso em: 10 fev. 2016.

ABRAMOVAY, R.; SPERANZA, J. S.; PETITGAND, C. **Lixo zero: Gestão de Resíduos Sólidos para uma sociedade mais próspera**. São Paulo: Planeta Sustentável : Instituto Ethos, 2013.

ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil: 2010**. São Paulo: Grappa Editora e Comunicação, 2011. Disponível em: <http://www.abrelpe.org.br/panorama_edicoes.cfm>. Acesso em: 14 set. 2015.

_____. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil: 2011**. São Paulo: Grappa Editora e Comunicação, 2012. Disponível em: <http://www.abrelpe.org.br/panorama_edicoes.cfm>. Acesso em: 14 set. 2015.

_____. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil: 2012**. São Paulo: Grappa Editora e Comunicação, 2013. Disponível em: <http://www.abrelpe.org.br/panorama_edicoes.cfm>. Acesso em: 14 set. 2015.

_____. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil: 2013**. São Paulo: Grappa Editora e Comunicação, 2014. Disponível em: <http://www.abrelpe.org.br/panorama_edicoes.cfm>. Acesso em: 14 set. 2015.

_____. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil: 2014**. São Paulo: Grappa Editora e Comunicação, 2015. Disponível em: <http://www.abrelpe.org.br/panorama_edicoes.cfm>. Acesso em: 14 set. 2015.

AEBIOM – *European Biomass Association*. **A Biogas Road Map for Europe**. Brussels: AEBIOM, 2009. Disponível em: <www.4biomass.eu/document/news/AEBIOM_Biogas_Roadmap.pdf>. Acesso em: 27 mai. 2015.

ÅHMAN, M. Biomethane in the transport sector-An appraisal of the forgotten option. **Energy Policy**, v. 38, n. 1, p. 208–217, 2010.

ALERJ – *Assembléia Legislativa do Estado do Rio de Janeiro*. **Legislação**. Disponível em: <<http://www.alerj.rj.gov.br/processo2.htm>>. Acesso em: 5 mar. 2016.

ALESP – *Assembléia Legislativa do Estado de São Paulo*. **Legislação - Pesquisa**. Disponível em: <<http://www.al.sp.gov.br/alesp/pesquisa-legislacao/>>. Acesso em: 5 mar. 2016.

ALVES, J. W. S. **Diagnóstico técnico institucional da recuperação e uso energético do biogás gerado pela digestão anaeróbica de resíduos**. 2000. 142f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

ALVES, J. W. S.; VIEIRA, S. M. M. **Segundo Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa: Emissões de Gases de Efeito Estufa no Tratamento e Disposição de Resíduos**. Brasília: MCT, 2010.

AMBIENTE ENERGIA. **Especial Aterro Dois Arcos – Parte 1 – Tecnologia do Biometano**. Disponível em: <<https://www.ambienteenergia.com.br/index.php/2015/03/especial-aterro-dois-arcos-parte-1-tecnologia-biometano/25813>>. Acesso em: 7 fev. 2016.

ANEEL – *Agência Nacional de Energia Elétrica*. Parte III - Fontes Não Renováveis. In: **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. 3ª. ed. Brasília: ANEEL, 2008. p. 315–376.

_____. **P&D Estratégico de geração de energia a partir do biogás recebe 23 propostas**. Brasília: ANEEL, 2012a. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/pt/informacoes-tecnicas?p_p_id=101&p_p_lifecycle=0&p_p_state=maximized&p_p_mode=view&_101_struts_action=/asset_publisher/view_content&_101_returnToFullPageURL=/pt/informacoes-tecnicas?p_p_id=101&p_p_lifecycle=0&p_p_>. Acesso em: 20 mar. 2016.

_____. **Projetos Cadastrados no P&D Estratégico n. 14/2012 - “Arranjos Técnicos e Comerciais para Inserção da Geração de Energia Elétrica a partir do Biogás oriundo de Resíduos e Efluentes Líquidos na Matriz Energética Brasileira”**. Brasília: ANEEL, 2012b. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/P&D_Est_014-2012.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2016.

_____. **Banco de Informações de Geração: Matriz de Energia Elétrica.** Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>>. Acesso em: 29 set. 2015a.

_____. **Banco de Informações de Geração: Capacidade de Geração do Brasil.** Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/GeracaoTipoFase.asp?tipo=2&fase=3>>. Acesso em: 11 dez. 2015b.

_____. **Legislação.** Disponível em: <<http://biblioteca.aneel.gov.br/index.html>>. Acesso em: 5 mar. 2016.

ANP - *Agência Nacional de Petróleo Gás Natural e Biocombustíveis*. Resolução ANP nº 16, de 17 de junho de 2008. Estabelece a especificação do gás natural, nacional ou importado, a ser comercializado no território nacional. **Diário Oficial da União**, Brasília, 18 jun. 2008, Seção 1, p.69-71.

_____. **Análise da regulamentação, da estrutura da indústria e da dinâmica de formação dos preços do gás natural no Brasil.** Brasília: ANP, 2011. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/?dw=58828>>. Acesso em: 16 fev. 2016

_____. Resolução ANP nº 23, de 13 de agosto de 2012. Regulamenta a utilização de biocombustíveis não especificados e suas misturas com combustíveis e biocombustíveis especificados no país. **Diário Oficial da União**, Brasília, 14 ago. 2012, Seção 1, p.31-33.

_____. Resolução ANP nº 8, de 30 de janeiro de 2015. Estabelece a especificação do Biometano. **Diário Oficial da União**, Brasília, 2 fev. 2015a, Seção 1, p.100-101.

_____. **Informações Institucionais.** Brasília: ANP, 2015b. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/?pg=75919&m=&t1=&t2=&t3=&t4=&ar=&ps=&1447958652262>>. Acesso em: 11 jan. 2016.

_____. **Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis: 2015.** Rio de Janeiro: ANP, 2015c.

_____. **Legislação ANP.** Disponível em: <<http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll?f=templates&fn=default.htm>>. Acesso em: 5 mar. 2016a.

_____. **Consulta Posto Web.** Disponível em: <www.anp.gov.br/?id=1086>. Acesso em: 11 abr. 2016b.

BASTOS, S. A. P.; FORTUNATO, G. Conversão de veículos flex para o gás natural: problema de escassez e contribuição à sustentabilidade. **Revista de Administração Mackenzie**, v. 15, n. 5, p. 171–194, 2014.

BLEY JR, C. et al. **Agroenergia da biomassa residual: perspectivas energéticas, socioeconômicas e ambientais**. 2^a. ed. Foz do Iguaçu/Brasília: Itaipu Binacional : Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação : TechnoPolitik Editora, 2009.

BNDES – *Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social*. **Pronaf Eco**. Disponível em: <www.bndes.gov.br/SiteBNDES/bndes/bndes_pt/Institucional/Apoio_Financeiro/Programas_e_Fundos/pronaf_eco.html>. Acesso em: 11 abr. 2016.

BOND, T.; TEMPLETON, M. R. History and future of domestic biogas plants in the developing world. **Energy for Sustainable Development**, v. 15, n. 4, p. 347–354, 2011.

BORDELANNE, O. et al. Biomethane CNG hybrid: A reduction by more than 80% of the greenhouse gases emissions compared to gasoline. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, v. 3, n. 5, p. 617–624, 2011.

BÖRJESSON, M.; AHLGREN, E. O. Cost-effective biogas utilisation - A modelling assessment of gas infrastructural options in a regional energy system. **Energy**, v. 48, n. 1, p. 212–226, 2012.

BRASIL. Presidência da República. Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico e dá outras providências. **Diário Oficial da União**. Brasília, 8 jan. 2007, Seção 1, p.3-7.

_____. Presidência da República. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos e dá outras providências. **Diário Oficial da União**. Brasília, 3 ago. 2010a, Seção 1, p. 3–7.

_____. Presidência da República. Decreto nº 7.404, de 23 de dezembro de 2010. Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**. Edição Extra. Brasília, 23 dez. 2010b, Seção 1, p. 1 -7.

_____. Presidência da República. Decreto nº 7.390, de 9 de dezembro de 2010. Regulamenta artigos da Política Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**. Brasília, 10 de dez. 2010c, Seção 1, p. 4.

_____. Senado Federal. Subcomissão Temporária de Resíduos Sólidos. **Projeto de Lei do Senado nº 425, de 18 dez 2014a**. Prorroga o prazo para a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos de que trata o art. 54 da Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Disponível em <<http://www.senado.leg.br/atividade/rotinas/materia/getPDF.asp?t=170839&tp=1>>. Acesso em: 11 jan 2015.

_____. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2023**. Brasília: MME : EPE, 2014b.

CALDEIRA, A. C. C. **Nota Técnica nº 132/2013/-SBQ-RJ**. Rio de Janeiro: ANP, 2013. Disponível em: <www.anp.gov.br/?pg=79870&m=consulta_p%FAblica&t1=&t2=consulta_p%FAblica&t3=&t4=&ar=0&ps=1&1459782490024>. Acesso em: 6 mai. 2015.

CAMPOS, H. K. T. Renda e evolução da geração per capita de resíduos sólidos no Brasil. **Engenharia Sanitária Ambiental**, v. 17, n. 2, p. 171–180, 2012.

CAMPOS, H. K. T.; MERCEDES, S. S. A limpeza urbana e a Política Nacional de Resíduos Sólidos : os impactos no presente e um olhar para o futuro. In: **Design, Resíduo & Dignidade**. São Paulo: Editora Olhares, 2014. p. 490.

CCEE - *Câmara de Comercialização de Energia Elétrica*. **Resultado consolidados dos leilões - 01/2016**. Disponível em: <[CEMIG – *Companhia Energética de Minas Gerais*. GASMIG comemora 25 anos. **Energia da Gente: informativo mensal para os empregados da CEMIG**, p. 12, jul. 2011.](http://www.ccee.org.br/portal/faces/acesso_rapido_header_publico_nao_logado/biblioteca_virtual?tipo=ResultadoConsolidado&assunto=Leilão&_afzLoop=601527403526418#@?_afzLoop=601527403526418&tipo=Resultado+Consolidado&assunto=Leil%C3%>. Acesso em: 25 jan. 2016.</p>
</div>
<div data-bbox=)

CETESB – *Companhia Ambiental do Estado de São Paulo*. **Emissões veiculares no estado de São Paulo 2014**. São Paulo: CETESB, 2015.

CONTÁBEIS. **SP reduz a base de cálculo do ICMS nas operações com biogás e biometano**. 2013. Disponível em: <<http://www.contabeis.com.br/legislacao/64063/decreto-sp-60001-2013/>>. Acesso em: 5 mar. 2016.

_____. **Estado concede benefícios fiscais a contribuintes com atividades de produção de biogás ou Biometano e geração de energia.** 2014. Disponível em: <<http://www.contabeis.com.br/legislacao/65725/decreto-sp-60298-2014/>>. Acesso em: 5 mar. 2016.

COPEL – *Companhia Paranaense de Energia*. **Programa de Geração Distribuída com Saneamento Ambiental.** Disponível em: <[http://www.copel.com/hpcopel/root/sitearquivos2.nsf/arquivos/geracao_distribuida-17.02.09/\\$FILE/geracao_distribuida-17.02.09.pdf](http://www.copel.com/hpcopel/root/sitearquivos2.nsf/arquivos/geracao_distribuida-17.02.09/$FILE/geracao_distribuida-17.02.09.pdf)>. Acesso em: 16 mar. 2016.

COUTURE, T. D.; CORY, K.; WILLIAMS, E. **A Policymaker's Guide to Feed-in Tariff Policy Design.** Golden: NREL, 2010. Disponível em: <<http://www.nrel.gov/docs/fy10osti/44849.pdf>>. Acesso em: 16 jan. 2016.

CUNHA, A. DOS S. Saneamento Básico No Brasil: Desenho Institucional E Desafios Federativos. **IPEA: Textos para Discussão**, v. 1565, 2011.

DECC - *Department of Energy & Climate Change*. DUKES 2015 Chapter 6: Renewable Sources of Energy. **Digest of United Kingdom Energy Statistics (DUKES)**, p. 157–195, 2014.

DENA - *Deutsche Energie-Agentur GmbH*. **Biogas grid injection in Germany and Europe: market, technology and players.** Berlim: DENA. Disponível em: <<http://www.biogaspartner.de/das-projekt.html>>. Acesso em: 18 jun. 2015.

_____. **Overview: Acts & Regulations.** Disponível em: <<http://www.biogaspartner.de/en/actsregulations/overview.html>>. Acesso em: 16 jan. 2016.

DENG, L.; HÄGG, M. B. Techno-economic evaluation of biogas upgrading process using CO₂ facilitated transport membrane. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v. 4, n. 4, p. 638–646, 2010.

DETRAN – *Departamento de Trânsito do Estado do Rio de Janeiro*. **Frota por combustível.** Disponível em: <http://www.detran.rj.gov.br/_estatisticas.veiculos/07.asp>. Acesso em: 9 fev. 2016.

DIN - *Deutsches Institut für Normung e.V.* **Gases from non-conventional sources - Injection into natural gas grids - Requirements and recommendations.** [s.l.]: DIN, 2011. Disponível em: <http://www.greengasgrids.eu/fileadmin/greengas/media/Cross_Country_Overview/Gas_Quality/TC_234_draft_TR_NCS_injection_110330_1_.pdf>. Acesso em: 16 fev. 2016.

EBA – *European Biogas Association*. **EBA' s biomethane fact sheet**. Brussels: EBA, 2013. Disponível em: <european-biogas.eu/wp-content/upload/files/2013/10/eba_biomethane_factsheet.pdf>. Acesso em: 27 mai. 2015.

_____. **Graph: Biomethane plants per country and total installed capacity in Europe**. Disponível em: <http://european-biogas.eu/wp-content/uploads/2016/01/Graph-2-Biomethane-plants.png>. Acesso em: 25 jan. 2016.

ECOMETANO. **Ecometano: projetos**. Disponível em: <http://www.ecometano.com.br/ecometano/projetos.html>. Acesso em: 26 out. 2015.

ELETROBRÁS. **Regulamentação e Incentivos às Energias Renováveis no Brasil**. In: VI Encontro Fórum Permanente de Energias Renováveis. **Anais...** Brasília: 2007. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/programas/proinfa/galerias/arquivos/apresentacao/regulamentacao.pdf>. Acesso em: 25 jan. 2016.

EMBRAPA – *Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária*. **Rede BiogásFert**. Disponível em: <www.cnpsa.embrapa.br/biogasfert/index.html#rede>. Acesso em: 11 abr. 2016

ENERGIGAS SVERIGE. **Biogas in Sweden**. Disponível em: <www.biogasportal.se>. Acesso em: 7 dez. 2015.

EPE – *Empresa de Pesquisa Energética*. **Plano Nacional de Energia 2030**. Rio de Janeiro: EPE, 2007.

_____. **Balanço Energético Nacional 2014: Ano base 2013 - Relatório Síntese**. Rio de Janeiro: EPE, 2014a.

_____. **Demanda de Energia 2050: Estudos da demanda de energia**. Rio de Janeiro: EPE, 2014b.

_____. **Inventário Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos: Recursos Energéticos**. Rio de Janeiro: EPE, 2014,c.

_____. **Balanço Energético Nacional 2015: Ano base 2014**. Rio de Janeiro: EPE, 2015.

EUROBSERV'ER. **Biogas Barometer. Systèmes Solaires - le journal des énergies renouvelables**, n. 200, p. 104–119, 2010.

_____. Biogas Barometer. **Systèmes Solaires - le journal des énergies renouvelables**, n. 212, p. 67 – 79, 2012.

_____. **Biogas Barometer**. [s.l.] EurObserv'ER, 2014. Disponível em: <www.eurobserv-er.org/biogas-barometer-2014/>. Acesso em: 15 dez. 2015.

EUROPEAN COMMISSION. **Preparing a Waste Prevention Programme: guidance document**. Paris: BioIntelligence Service S.A.S., 2012. Disponível em: <ec.europa.eu/environment/waste/prevention/pdf/Waste_prevention_guidelines.pdf>. Acesso em: 11 abr. 2016.

EZE, J. I. ; AGBO, K. E. Maximizing the potentials of biogas through upgrading. **American Journal of Scientific and Industrial Research**, v. 1, n. 3, p. 604–609, 2010.

FARIA, S. A. DE; FARIA, R. C. DE. Cenários e perspectivas para o setor de saneamento e sua interface com os recursos hídricos. **Engenharia Sanitária Ambiental**, v. 9, n. 3, p. 202–210, 2004.

FERREIRA, C. F. et al. **Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos da Cidade do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro: DAJO Gráfica Editora, 2012. Disponível em: <<http://www.rio.rj.gov.br/dlstatic/10112/3372233/4123401/PMGIRS.pdf>>. Acesso em: 28 out. 2015.

FERREIRA, M.; MARQUES, I. P.; MALICO, I. Biogas in Portugal: Status and public policies in a European context. **Energy Policy**, v. 43, p. 267–274, 2012.

FNR – *Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.* **Biogas - an introduction**. Rostock: FNR, 2013. Disponível em: <<https://mediathek.fnr.de/biogas-an-introduction.html>>. Acesso em: 16 jan. 2016.

FONG, M. W. L. Technology Leapfrogging for Developing Countries. **Encyclopedia of Information Science and Technology**, p. 3707–3713, 2009.

FOREEST, F. VAN. **Perspectives for biogas in Europe**. Oxford Institute for Energy Studies, 2012. Disponível em: <<http://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2012/12/NG-70.pdf>>. Acesso em: 18 jan. 2016.

FUJII, R. J. **Produção e transporte de energia**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2005. Apresentação de disciplina PEA-5765 - Tópicos avançados em sistemas energéticos para um desenvolvimento limpo. Disponível em <slideplayer.com.br/slide/5605942>. Acesso em: 15 mar.2016.

GALLAGHER, K. S. Limits to leapfrogging in energy technologies? Evidence from the Chinese automobile industry. **Energy Policy**, v. 34, n. 4, p. 383–394, 2006.

GARG, A. et al. Chapter 1: Introduction. In: **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. [Hayama: IGES, 2006. v. 2, p. 1.1 – 1.29.

GASMIG – *Companhia de Gás de Minas Gerais*. **História**. Disponível em: <<http://www.gasmig.com.br/Institucional/Historia.aspx>>. Acesso em: 7 fev. 2016.

GOLDEMBERG, J. Viewpoint Leapfrog energy technologies. **Energy Policy**, v. 26, n. 10, p. 729–741, 1998.

GREEN GAS GRIDS. **Market Platform**. Disponível em: <<http://www.greengasgrids.eu/market-platform/sweden.html>>. Acesso em: 18 jan. 2016.

IBGE – *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística*. **Saneamento básico: destino do lixo**. Disponível em: <<http://serieestatisticas.ibge.gov.br/series.aspx?no=6&op=0&vcodigo=PD261&t=destino-lixo>>. Acesso em: 28 set. 2015.

_____. **Estatísticas Do Século XX**. Rio de Janeiro: IBGE, 2006.

_____. **População presente e residente, por sexo (dados do universo, dados da amostra)**. Rio de Janeiro: IBGE, 2008a. Disponível em: <<http://serieestatisticas.ibge.gov.br/series.aspx?no=10&op=0&vcodigo=CD77&t=populacao-presente-residente-sexo-dados-universo>>. Acesso em: 28 set. 2015.

_____. **Revisão 2008 - Projeção da população do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 2008b. Disponível em: <<http://serieestatisticas.ibge.gov.br/series.aspx?no=10&op=0&vcodigo=POP300&t=revisao-2008-projecao-populacao-brasil>>. Acesso em: 28 set. 2015.

_____. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008**. Rio de Janeiro: IBGE, 2010.

_____. **Perfil dos Municípios Brasileiros 2013**. Brasília: IBGE. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/perfilmunic/2013/defaulttab_pdf.shtm>. Acesso em: 06 jan. 2016.

ICLEI. **Manual para Aproveitamento de Biogás**. São Paulo: ICLEI, 2009. v. 1.

IEA BIOENERGY TASK 37. **Plant Lists**. Disponível em: <<http://www.iea-biogas.net/plant-list.html>>. Acesso em: 31 jan. 2016.

_____. **IEA Bioenergy Task 37 - Country Reports Summary 2014**. [s.l.]: IEA Bioenergy, 2015. Disponível em: <www.ieabioenergy.com/publications/iea-bioenergy-task-37-country-reports-summary-2014/>. Acesso em: 18 jan. 2016.

INMET – *Instituto Nacional de Meteorologia*. **Normais Climatológicas do Brasil / 1961 - 1990**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>>. Acesso em: 28 set. 2015.

INMETRO – *Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia*. **Sistema Internacional de Unidades : SI**. 9ª. ed. Duque de Caxias: INMETRO : CICMA : SEPIN, 2012.

_____. Portaria nº 590 , de 02 de dezembro de 2013. Aprova a atualização do Quadro Geral de Unidades de Medida adotado pelo Brasil, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**. Brasília, 9 dez. 2013, Seção 1, p. 1–14.

IPEA. **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Urbanos**. Brasília: IPEA, 2012.

IPP – *Instituto Municipal de Urbanismo Pereira Passos*. Padrões de produção e consumo. In: **Indicadores Ambientais da Cidade do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro: IPP, 2005. p. 113–136.

IRENA – *The International Renewable Energy Agency*. **Renewable Energy and Jobs: Annual Review 2015**. Abu Dhabi: IRENA, 2015.

JOHARI, A. et al. Economic and environmental benefits of landfill gas from municipal solid waste in Malaysia. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 5, p. 2907–2912, 2012.

KAMALAN, H.; SABOUR, M.; SHARIATMADARI, N. A review on available landfill gas models. **Journal of Environmental Science and Technology**, v. 4, n. 2, p. 79–92, 2011.

KOORNNEEF, J. et al. Global potential for biomethane production with carbon capture, transport and storage up to 2050. **Energy Procedia**, v. 37, p. 6043–6052, 2013.

KUNZ, A.; OLIVEIRA, P. A. V. DE. Aproveitamento de dejetos de animais para geração de biogás. **Revista de Política Agrícola**, n. 3, p. 28–35, 2006.

LÄNTELÄ, J. et al. Landfill gas upgrading with pilot-scale water scrubber: Performance assessment with absorption water recycling. **Applied Energy**, v. 92, p. 307–314, 2012.

LEÃO, R. M. **Dedini: a força de um ideal**. Piracicaba: Dedini, 2005.

LÖNNQVIST, T.; SANCHES-PEREIRA, A.; SANDBERG, T. Biogas potential for sustainable transport – a Swedish regional case. **Journal of Cleaner Production**, v. 108, p. 1105–1114, 2015.

LONNQVIST, T.; SILVEIRA, S.; SANCHES-PEREIRA, A. Swedish resource potential from residues and energy crops to enhance biogas generation. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, v. 21, p. 298–314, 2013.

LOUREIRO, S. M.; ROVERE, E. L. L.; MAHLER, C. F. Analysis of potential for reducing emissions of greenhouse gases in municipal solid waste in Brazil, in the state and city of Rio de Janeiro. **Waste Management**, v. 33, n. 5, p. 1302–1312, 2013.

MACENA, A. et al. **Relatório Enquetes Jardim Gramacho 2013**. Rio de Janeiro: TECHO, 2013. Disponível em: <www.techo.org/paises/brasil/wp-content/uploads/2014/05/relatorio_JDG_2013-140318.pdf>. Acesso em: 28 out. 2015.

MACHADO, G. C. DE A. **Da Ilha de Sapucaia ao Aterro Metropolitano de Jardim Gramacho: a criação de territórios do lixo da cidade do Rio de Janeiro como expressão de segregação espacial**. 2012. 140f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Geografia da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

MADEIRA, R. F. O setor de saneamento básico no Brasil e as implicações do marco regulatório para a universalização do acesso. **Revista do BNDES**, v. 33, p. 124, 2010.

MAIA, G. Em Gramacho, 2 anos após fim de lixão, 20 mil pessoas vivem sem saneamento. **UOL Notícias**. Disponível em: <<http://noticias.uol.com.br/cotidiano/ultimas-noticias/2014/06/11/em-gramacho-2-anos-apos-fim-de-lixao-20-mil-pessoas-vivem-sem-saneamento.htm>>. Acesso em: 20 jul. 2015.

MAIER, S.; OLIVEIRA, L. B. Economic feasibility of energy recovery from solid waste in the light of Brazil's waste policy: The case of Rio de Janeiro. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 35, p. 484–498, 2014.

MAKARUK, A.; MILTNER, M.; HARASEK, M. Membrane biogas upgrading processes for the production of natural gas substitute. **Separation and Purification Technology**, v. 74, n. 1, p. 83–92, 2010.

MANKIW, N. G. Monopoly. In: **Principals of Economics**. 5. ed. Mason: South-Western College Learning, 2009. p. 315 – 347.

MANNINEN, K. et al. The applicability of the renewable energy directive calculation to assess the sustainability of biogas production. **Energy Policy**, v. 56, p. 549–557, 2013.

MÅNSSON, A.; SANCHES-PEREIRA, A.; HERMANN, S. Biofuels for road transport: Analysing evolving supply chains in Sweden from an energy security perspective. **Applied Energy**, v. 123, p. 349–357, 2014.

MATHIAS, M. C. P. P.; MATHIAS, J. F. C. M. Biogas in Brazil : A Governmental Agenda. **Journal of Energy and Power Engineering**, v. 9, p. 1–15, 2015.

MCTI – *Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação*. **Status dos projetos do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) no Brasil**. Brasília: MCTI, 2014a. Disponível em: <http://www.mct.gov.br/upd_blob/0236/236122.pdf>. Acesso em: 27 jan. 2016.

_____. **Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil**. Brasília: MCTI, 2014b. Disponível em: <http://www.mct.gov.br/upd_blob/0235/235580.pdf>. Acesso em: 15 dez. 2015.

MMA – *Ministério de Meio Ambiente*. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília: MMA, 2011. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/253/_publicacao/253_publicacao02022012041757.pdf>. Acesso em: 11 dez. 2015.

_____. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos.** Brasília: MMA, 2012. Disponível em: <www.sinir.gov.br/web/guest/plano-nacional-de-residuos-solidos>. Acesso em: 27 maio. 2015.

_____. **Inventário Nacional De Emissões Atmosféricas Por Veículos Automotores Rodoviários.** Brasília: MMA, 2014. Disponível em: <www.mma.gov.br/estruturas/163/_publicacao/163_publicacao27072011055200.pdf>. Acesso em: 1 mar. 2016.

_____. **Planos Estaduais de Resíduos Sólidos.** Brasília, 2015. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos/material-t%C3%A9cnico/itemlist/category/64-residuos-solidos>>. Acesso em: 6 jan. 2016.

_____. **Estrutura e competências.** Brasília, 2016. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/institucional/estrutura-e-compet%C3%Aancias>>. Acesso em: 23 fev. 2016.

MME – *Ministério de Minas e Energia*. **Matriz Energética Nacional 2030.** Brasília: MME : EPE, 2007.

_____. **Boletim mensal de acompanhamento da indústria de gás natural.** Brasília, 2015. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/1138769/1732803/Boletim_Gas_Natural_nr_105_nov_15.pdf/facb36bf-a368-469b-9ea8-ad2732f6400b>. Acesso em: 25 jan. 2016

_____. **Competências.** Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/web/guest/acesso-a-informacao/institucional/competencias>>. Acesso em: 25 fev. 2016a.

_____. **Planejamento e desenvolvimento energético.** Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/web/guest/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/acoes/planejamento-e-desenvolvimento-energetico>>. Acesso em: 25 jan. 2016b.

_____. **Gestão da comercialização de energia - Leilões de energia.** Brasília: MME : SEE : DGSE, 2016c. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/documents/10584/1540210/Quadro+Leiloes+Boletim+Tarif%C3%A1rio+12-15.pdf/ea0f5f59-ec01-4dc6-bf5a-6eed64bf24d4>>. Acesso em: 25 jan. 2016.

MOLINO, A. et al. Biogas upgrading via membrane process: Modelling of pilot plant scale and the end uses for the grid injection. **Fuel**, v. 107, p. 585–592, 2013.

MONTEIRO, J. H. P.; MANSUR, G. L. M.; DE SÁ, F. P. Volume I: Caracterização e Potencial. In: **Fontes Energéticas Brasileiras Inventário/Tecnologia: Resíduos Sólidos Urbanos (Lixo)**. Rio de Janeiro: CHESF: BRASCEP, 1987. v. 1p. 134.

MORIYAMA, V.; PEGURIER, E. **Apesar de fechado, Gramacho é uma história inacabada**. Disponível em: <<http://www.oeco.org.br/reportagens/26063-apesar-de-fechado-gramacho-e-uma-historia-inacabada/>>. Acesso em: 29 out. 2015.

MUÑOZ, R. et al. A review on the state-of-the-art of physical/chemical and biological technologies for biogas upgrading. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, p. 727–759, 2015.

NNFCC – *The National Non-Food Crops Centre*. **Biogas Map**. [S.l.]: NNFCC. 2015. Disponível em: <<https://www.google.com/maps/d/viewer?mid=z0CaRSV1fHfk.k6kv8-jH1gMc>>. Acesso em: 17 jan. 2016.

_____. **Incentives**. [S.l.]: NNFCC, 2016. Disponível em: <<http://www.biogas-info.co.uk/about/incentives/>>. Acesso em: 17 jan. 2016.

OFGEM - *Office of Gas and Electricity Markets*. **Renewables Obligation (RO)**. Disponível em: <<https://www.ofgem.gov.uk/environmental-programmes/renewables-obligation-ro>>. Acesso em: 15 jan. 2016.

OKOLI, C.; SCHABRAM, K. Working Papers on Information Systems A Guide to Conducting a Systematic Literature Review of Information Systems Research. **Working Papers on Information Systems**, v. 10, n. 26, p. 1–51, 2010.

PATTERSON, T. et al. An evaluation of the policy and techno-economic factors affecting the potential for biogas upgrading for transport fuel use in the UK. **Energy Policy**, v. 39, n. 3, p. 1806–1816, 2011.

PETROBRAS. **Novas Modalidades de Contratação de Gás Natural**. [S.l.]: Prime Printers, [2007]. Disponível em: <http://www.zonaeletrica.com.br/downloads/NOVAS_MODALIDADES_PETROBRAS-04-01.pdf>. Acesso em: 14 mar. 2016.

_____. **Refinaria gera energia com biogás do Aterro de Gramacho**. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/fatos-e-dados/refinaria-gera-energia-com-biogas-do-aterro-de-gramacho.htm>>. Acesso em: 26 out. 2015.

PIPATTI, R.; SVARDAL, P. Chapter 3: Solid waste disposal. In: **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Hayama: IGES, 2006. v. 5p. 3.1 – 3.40.

PNUD – *Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento*; MMA; ARCADIS TETRAPLAN. **Resumo Executivo Estudo sobre o Potencial de Geração de Energia a partir de Resíduos de Saneamento (lixo, esgoto), visando incrementar o uso de biogás como fonte alternativa de energia renovável**. São Paulo: ARCADIS Tetraplan, 2010.

POESCHL, M.; WARD, S.; OWENDE, P. Prospects for expanded utilization of biogas in Germany. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 7, p. 1782–1797, 2010.

PORTAL BRASIL. **Biogás entra pela primeira vez em leilão de reserva da Aneel**. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/10584/1540210/Quadro+Leiloes+Boletim+Tarifário+12-15.pdf/ea0f5f59-ec01-4dc6-bf5a-6eed64bf24d4>>. Acesso em: 25 jan. 2016.

QUIVY, R.; CAMPENHOUDT, L. VAN. **Manual de Investigação em Ciências Sociais**. 4^a. ed. Lisboa: Gradiva, 2005.

RABONI, M.; URBINI, G. Production and use of biogas in Europe: a survey of current status and perspectives. **Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 9, n. 2, p. 191–202, 26 jun. 2014.

RASI, S.; LÄNTELÄ, J.; RINTALA, J. Trace compounds affecting biogas energy utilisation - A review. **Energy Conversion and Management**, v. 52, n. 12, p. 3369–3375, 2011.

RASI, S.; LÄNTELÄ, J.; RINTALA, J. Upgrading landfill gas using a high pressure water absorption process. **Fuel**, v. 115, p. 539–543, 2014.

RECHELO NETO, A. C.; SAUER, I. L. LNG as a strategy to establish developing countries ' gas markets: The Brazilian case. **Energy Policy**. v. 34, p. 4103–4114, 2006.

REN21. **Renewables 2015 Global Status Report**. Paris: REN21 Secretariat, 2015.

RIBEIRO, M. D. F.; PELINSKI, A. Potentialities of energy generation from waste and feedstock produced by the agricultural sector in Brazil : The case of the State of Paraná. **Energy Policy**, v. 60, p. 208–216, 2013.

RIBEIRO, R. **Política de Resíduos Sólidos apresenta resultados em 4 anos**. Disponível em: <www.mma.gov.br/informma/item/10272-politica-de-residuos-solidos-apresenta-resultados-em-4-anos>. Acesso em: 23 mar. 2016.

RIO DE JANEIRO (Estado). Lei Nº 6.361, de 19 de dezembro de 2012. Dispõe sobre a Política Estadual de Gás Natural Renovável - GNR. **Diário Oficial do Estado do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro, 20 dez. 2012, Parte I, p. 1.

RTI INTERNATIONAL. **Greenhouse Gas Emissions Estimation Methodologies for Biogenic Emissions from Selected Source Categories**. Durham: RTI International, 2010. Disponível em: <http://www3.epa.gov/ttn/chief/efpac/ghg/GHG_Biogenic_Report_draft_Dec1410.pdf>. Acesso em: 26 jan. 2016.

RYCKEBOSCH, E.; DROUILLON, M.; VERVAEREN, H. Techniques for transformation of biogas to biomethane. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 5, p. 1633–1645, 2011.

SALOMON, K. R.; SILVA LORA, E. E. Estimate of the electric energy generating potential for different sources of biogas in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, v. 33, n. 9, p. 1101–1107, 2009.

SAMPAIO, R. F.; MANCINI, M. C. Estudos De Revisão Sistemática : Um Guia Para Síntese. **Revista Brasileira de Fisioterapia**, v. 11, n. 1, p. 83–89, 2007.

SANTOS, M. M. DE O. **Geração de Biogás em Aterros Sanitários: Uma análise sobre os modelos de previsão aplicados a projetos do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo**. 2014. 114f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

SÃO PAULO. **Plano Paulista de Energia - PPE 2020**. São Paulo: CEPE, 2012a. Disponível em: <<http://www.energia.sp.gov.br/a2sitebox/arquivos/documentos/491.pdf>>. Acesso em: 15 mar. 2016.

SÃO PAULO (Estado). Decreto nº 58.659, de 4 de dezembro de 2012. Institui o Programa Paulista de Biogás e dá outras providências correlatas. **Diário Oficial do Estado de São Paulo**. São Paulo, 5 dez. 2012b, Caderno 1, p. 1.

SCOPE - *Scientific Committee on Problems of the Environment*. **Bioenergy & Sustainability: bridging the gaps**. São Paulo: Áttema, 2015.

SEA – *Secretaria de Estado do Ambiente*. **Lixão Zero**. Disponível em: <<http://www.rj.gov.br/web/sea/exibeconteudo?article-id=926885>>. Acesso em: 25 fev. 2016.

SEA; ECOLOGUS. Proposição de Metas. In: **Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro: SEA, 2013a. v. 8p. 45.

_____. Relatório de Avaliação, adequação e proposição de programas. In: **Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro: SEA, 2013b. v. 7p. 52.

SEVERINO, A. J. **Metodologia do trabalho científico**. 23. ed. São Paulo: Cortez, 2007.

SIMAS, A. L. F. et al. **Plano de resíduos sólidos do estado de São Paulo**. São Paulo: SMA, 2014. Disponível em: <<http://s.ambiente.sp.gov.br/cpla/plano-residuos-solidos-sp-2014.pdf>>. Acesso em: 11 dez. 2015.

SIMS, R. E. . et al. Energy Supply. In: **Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. p. 252 –322.

SNSA – *Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental*. **Competências da SNSA**. Disponível em: <<http://www.cidades.gov.br/saneamento-cidades/competencias>>. Acesso em: 4 fev. 2016.

_____. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: diagnóstico do manejo de resíduos sólidos urbanos - 2014**. Brasília: MCidades: SNSA, 2016. Disponível em: <www.snis.gov.br/diagnostico-residuos-solidos/diagnostico-rs-2014>. Acesso em: 22 mar. 2016.

STARR, K.; VILLALBA, G.; GABARRELL, X. Upgraded biogas from municipal solid waste for natural gas substitution and CO2 reduction – A case study of Austria, Italy, and Spain. **Waste Management**, v. 38, p. 105–116, 2015.

STRAUCH, S.; KRASSOWSKI, J.; FRAUNHOFER UMSICHT. **Overview of biomethane markets and regulations in partner countries**. [s.l]: Green Gas Grids, 2012. Disponível em: <www.greengasgrids.eu>. Acesso em: 18 jan. 2016.

STRAUCH, S.; KRASSOWSKI, J.; SINGHAL, A. **Biomethane Guide for Decision Makers. Policy guide on biogas injection into the natural gas grid.** [s.l.]: Green Gas Grids, 2013. Disponível em: <http://www.greengasgrids.eu/fileadmin/greengas/media/Downloads/Documentation_from_the_GreenGasGrids_project/Biomethane_Guide_for_Decision_Makers.pdf>. Acesso em: 18 jan. 2016.

SUN, Q. et al. Selection of appropriate biogas upgrading technology-a review of biogas cleaning , upgrading and utilisation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 51, p. 521–532, 2015.

SVENSSON, M. **Country report Sweden.** In: IEA Bioenergy Conference 2015. Berlin, 2015a. Disponível em: <www.iea-biogas.net/country-reports.html>. Acesso em: 18 jan. 2016.

_____. **Natural gas and biomethane are complementary fuels – developments in Sweden.** In: EBA Workshop. Brussels, 2015b. Disponível em: <european-biogas.eu/wp-content/uploads/2015/09/7_EBA_Bryssel_MSvensson.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2016.

SWEDISH ENERGY AGENCY. **Energy in Sweden - Facts and Figures.** [s.l.]: Swedish Energy Agency, 2015. Disponível em: <<http://www.energimyndigheten.se/en/news/2015/you-can-now-read-energy-in-sweden---facts-and-figures-2015/>>. Acesso em: 16 dez. 2015.

THOMSON REUTERS. **Carbon Market Trader EU.** Disponível em: <<http://www.pointcarbon.com/trading/promopages/cmt/>>. Acesso em: 31 out. 2013.

THRÄN, D. et al. **Biomethane: Status and Factors Affecting Market Development and Trade.** [s.l.]: IEA Bioenergy, 2014. Disponível em: <www.bioenergytrade.org/downloads/t40-t37-biomethane-2014.pdf>. Acesso em: 12 jan. 2016.

UDDIN, S. N.; TAPLIN, R. Trends in renewable energy strategy development and the role of CDM in Bangladesh. **Energy Policy**, v. 37, n. 1, p. 281–289, 2009.

UM NOVO futuro para Minas com o gás. **Jornal Sete Dias**, 13 dez. 2013. Disponível em <<http://www.setedias.com.br/caderno-noticias/8074-um-novo-futuro-para-minas-com-o-gas>>. Acesso em: 9 fev. 2016

UNEP – *United Nations Environment Programme*. Chapter X: Types of waste-to-energy systems. In: **Solid Waste Management.** [s.l.]: UNEP, 2005. p. 253–258. Disponível em: <<http://www.unep.org/ietc/Portals/136/SWM-Vol1-Part2.pdf>>. Acesso em: 24 jan. 2016.

UNFCCC – *United Nations Framework Convention on Climate Change*. **Background on the UNFCCC: The international response to climate change**. Disponível em: <http://unfccc.int/essential_background/items/6031.php>. Acesso em: 27 jan. 2016.

USEPA – *United States Environment Protection Agency*. **Background Information Document for Updating AP42 Section 2.4 for Estimating Emissions from Municipal Solid Waste Landfills**. Morrisville: USEPA, 2008. Disponível em: <<http://www3.epa.gov/ttnchie1/ap42/ch02/draft/db02s04.pdf>>. Acesso em: 15 jan. 2015.

_____. Project Economics and Financing. In: **LFG Energy Project Development Handbook**. [s.l]: USEPA, 2015. p. 1–18. Disponível em: <http://www3.epa.gov/lmop/documents/pdfs/pdh_chapter4.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2016.

VICTOR, D. G. et al. Introductory Chapter. In: **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge: Cambridge University Press, 2014. p. 111–150. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc_wg3_ar5_chapter1.pdf>. Acesso em: 27 jan. 2016.

VILLAC, T. A construção da política nacional de resíduos sólidos. In: **Design, Resíduo & Dignidade**. São Paulo: Editora Olhares, 2014. p. 149–160.

WALLS, S. K. **Biogas: An Alternative Energy Source**. Disponível em: <<http://www.powermag.com/biogas-an-alternative-energy-source/?pagenum=1>>. Acesso em: 3 ago. 2015.

WATTS, J. Life amid the trash of a Rio dump. **The Guardian**, p. 1–4, 2015. Disponível em: <<http://www.theguardian.com/world/2015/jan/19/trash-rio-de-janeiro-waste-tip-film>>. Acesso em: 28 out. 2015.

WILSON, D. C. et al. **Global Waste Management Outlook**. Osaka: UNEP; ISWA, 2015. Disponível em: <[http://unep.org/ietc/Portals/136/Publications/Waste Management/GWMO report/GWMO_report.pdf](http://unep.org/ietc/Portals/136/Publications/Waste%20Management/GWMO_report/GWMO_report.pdf)>. Acesso em: 29 jan. 2016.

WRAP – *Waste & Resources Action Programme*. **Quality Protocol. Biomethane from waste. End of waste criteria for the production and use of biomethane from landfill gas and anaerobic digestion (AD) biogases**. Oxon: WRAP, 2013. Disponível em: <https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/292518/QP_Biomethane_final_to_publish.pdf>. Acesso em: 18 jan. 2016.

YANG, L. et al. Progress and perspectives in converting biogas to transportation fuels. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 40, p. 1133–1152, 2014.

ZHAO, Q. et al. Purification Technologies for Biogas Generated by Anaerobic Digestion. In: **Climate Friendly Farming: Improving the Carbon Footprint of Agriculture in the Pacific Northwest. CSANR Research Report 2010-00**. [s.l.]: Washington State University, 2010. p. 24. Disponível em: <<http://csanr.wsu.edu/program-areas/climate-friendly-farming/climate-friendly-farming-final-report/>>. Acesso em: 27 mai. 2015.

APÊNDICE A – Dados utilizados no dimensionamento do potencial brasileiro de produção de biometano.

Esta seção apresenta os dados mencionados na Seção 4.3 *Potencial de produção de biometano*. A série de dados das Tabelas Tabela 28 a Tabela 36 correspondem às informações utilizadas em algumas das variáveis descritas naquela seção e necessárias ao dimensionamento do potencial de produção de biometano no Brasil, considerando informações de 1970 a 2030, para um resultado de 2015 a 2030. Estas informações estão apresentadas como apêndice ao texto principal da pesquisa para facilitar a leitura, uma vez que são demasiadamente grandes e sua ausência não representar prejuízo ao entendimento do raciocínio utilizado para o cálculo.

Tabela 28 – População brasileira, 1970 a 2030.

Ano	População (número de habitantes)	Ano	População (número de habitantes)	Ano	População (número de habitantes)
1970	93.134.846	1990	146.592.579	2010	193.252.604
1971	95.677.616	1991	149.094.266	2011	194.932.685
1972	98.220.387	1992	151.546.843	2012	196.526.293
1973	100.763.157	1993	153.985.576	2013	198.043.320
1974	103.305.927	1994	156.430.949	2014	199.492.433
1975	105.848.698	1995	158.874.963	2015	200.881.685
1976	108.391.468	1996	161.323.169	2016	202.219.061
1977	110.934.238	1997	163.779.827	2017	203.510.422
1978	113.477.008	1998	166.252.088	2018	204.759.993
1979	116.019.779	1999	168.753.552	2019	205.970.182
1980	118.562.549	2000	171.279.882	2020	207.143.243
1981	121.381.328	2001	173.808.010	2021	208.280.241
1982	124.250.840	2002	176.303.919	2022	209.380.331
1983	127.140.354	2003	178.741.412	2023	210.441.362
1984	130.082.524	2004	181.105.601	2024	211.459.352
1985	132.999.282	2005	183.383.216	2025	212.430.049
1986	135.814.249	2006	185.564.212	2026	213.348.475
1987	138.585.894	2007	187.641.714	2027	214.209.414
1988	141.312.997	2008	189.612.814	2028	215.008.982
1989	143.997.246	2009	191.480.630	2029	215.743.582
				2030	216.410.030

Fonte: a autora a partir de IBGE (2008a, 2008b).

Tabela 29 – Geração per capita de resíduos sólidos urbanos, 1970 a 2030.

Ano	Geração per capita de RSU (kg.habitante ⁻¹ .dia ⁻¹)	Ano	Geração per capita de RSU (kg.habitante ⁻¹ .dia ⁻¹)	Ano	Geração per capita de RSU (kg.habitante ⁻¹ .dia ⁻¹)
1970	0,48	1990	0,63	2010	1,04
1971	0,49	1991	0,640	2011	1,05
1972	0,51	1992	0,650	2012	1,05
1973	0,52	1993	0,660	2013	1,04
1974	0,54	1994	0,670	2014	1,06
1975	0,55	1995	0,680	2015	1,06
1976	0,57	1996	0,690	2016	1,06
1977	0,58	1997	0,700	2017	1,06
1978	0,58	1998	0,710	2018	1,06
1979	0,59	1999	0,720	2019	1,06
1980	0,59	2000	0,730	2020	1,06
1981	0,594	2001	0,740	2021	1,06
1982	0,598	2002	0,75	2022	1,06
1983	0,602	2003	0,74	2023	1,06
1984	0,606	2004	0,76	2024	1,06
1985	0,610	2005	0,79	2025	1,06
1986	0,614	2006	0,93	2026	1,06
1987	0,618	2007	0,97	2027	1,06
1988	0,622	2008	0,98	2028	1,06
1989	0,626	2009	0,96	2029	1,06
				2030	1,06

Fonte: a autora a partir de ABRELPE (2011, 2012, 2013, 2014, 2015), Campos (2012) e Monteiro, Mansur e De Sá (1987).

Tabela 30 – Porcentagem de coleta de Resíduos Sólidos Urbanos, 1970 a 2030.

Ano	RSU coletados (%)	Ano	RSU coletados (%)	Ano	RSU coletados (%)
1970	33%	1990	64,48%	2010	89,18%
1971	34%	1991	65,54%	2011	89,71%
1972	36%	1992	66,59%	2012	90,25%
1973	37%	1993	69,92%	2013	90,78%
1974	39%	1994	71,03%	2014	91,32%
1975	41%	1995	72,14%	2015	91,86%
1976	42%	1996	73,32%	2016	92,39%
1977	44%	1997	76,30%	2017	92,93%
1978	45%	1998	78,32%	2018	93,47%
1979	47%	1999	79,98%	2019	94,00%
1980	48%	2000	81,58%	2020	94,54%
1981	49,20%	2001	83,17%	2021	95,07%
1982	50,53%	2002	84,77%	2022	95,61%

continua...

continuação

Tabela 30 – Porcentagem de coleta de Resíduos Sólidos Urbanos, 1970 a 2030.

Ano	RSU coletados (%)	Ano	RSU coletados (%)	Ano	RSU coletados (%)
1983	54,11%	2003	85,55%	2023	96,15%
1984	55,62%	2004	84,73%	2024	96,68%
1985	57,29%	2005	85,67%	2025	97,22%
1986	58,04%	2006	86,53%	2026	97,76%
1987	59,29%	2007	87,34%	2027	98,29%
1988	59,53%	2008	87,89%	2028	98,83%
1989	62,31%	2009	88,64%	2029	99,36%
				2030	99,90%

Fonte: a autora a partir de IBGE (2004).

Tabela 31 – Composição gravimétrica média dos resíduos sólidos urbanos no Brasil.

Ano	Matéria orgânica	Papel	Plásticos e outros inertes	Ano	Matéria orgânica	Papel	Plásticos e outros inertes	Ano	Matéria orgânica	Papel	Plásticos e outros inertes
1970	48%	25%	23%	1990	50%	17%	31%	2010	51%	13%	36%
1971	48%	25%	23%	1991	50%	17%	31%	2011	51%	13%	36%
1972	48%	25%	23%	1992	50%	17%	32%	2012	51%	13%	36%
1973	48%	25%	23%	1993	50%	16%	32%	2013	51%	13%	36%
1974	48%	24%	24%	1994	51%	16%	33%	2014	51%	13%	36%
1975	48%	24%	24%	1995	51%	15%	33%	2015	51%	13%	36%
1976	48%	23%	25%	1996	51%	15%	34%	2016	51%	13%	36%
1977	48%	23%	25%	1997	51%	14%	34%	2017	51%	13%	36%
1978	48%	22%	26%	1998	51%	14%	35%	2018	51%	13%	36%
1979	48%	22%	26%	1999	51%	14%	35%	2019	51%	13%	36%
1980	49%	22%	27%	2000	51%	13%	36%	2020	51%	13%	36%
1981	49%	21%	27%	2001	51%	13%	36%	2021	51%	13%	36%
1982	49%	21%	27%	2002	51%	13%	36%	2022	51%	13%	36%
1983	49%	20%	28%	2003	51%	13%	36%	2023	51%	13%	36%
1984	49%	20%	28%	2004	51%	13%	36%	2024	51%	13%	36%
1985	49%	19%	29%	2005	51%	13%	36%	2025	51%	13%	36%
1986	49%	19%	29%	2006	51%	13%	36%	2026	51%	13%	36%
1987	50%	19%	30%	2007	51%	13%	36%	2027	51%	13%	36%
1988	50%	18%	30%	2008	51%	13%	36%	2028	51%	13%	36%
1989	50%	18%	31%	2009	51%	13%	36%	2029	51%	13%	36%

Fonte: a autora a partir de IPEA (2012) e Monteiro, Mansur e De Sá (1987).

Tabela 32 – Destinação final de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil, Cenário A.

Ano	Aterro sanitário	Aterro controlado	Vazadouro a céu aberto	Ano	Aterro sanitário	Aterro controlado	Vazadouro a céu aberto	Ano	Aterro sanitário	Aterro controlado	Vazadouro a céu aberto
1970	0%	0%	100%	1990	2,55%	10,75%	86,69%	2010	35,55%	28,88%	35,57%
1971	0,06%	0,51%	99%	1991	4,01%	11,91%	84,08%	2011	39,48%	32,07%	28,46%
1972	0,12%	1,01%	99%	1992	5,46%	13,06%	81,47%	2012	43,40%	35,25%	21,34%
1973	0,17%	1,52%	98%	1993	6,92%	14,22%	78,86%	2013	47,33%	38,44%	14,23%
1974	0,23%	2,02%	98%	1994	8,37%	15,37%	76,25%	2014	51,25%	41,63%	7,11%
1975	0,29%	2,53%	97%	1995	9,83%	16,53%	73,65%	2015	55,18%	44,82%	0,00%
1976	0,35%	3,03%	97%	1996	11,28%	17,68%	71,04%	2016	55,18%	44,82%	0,00%
1977	0,41%	3,54%	96%	1997	12,74%	18,84%	68,43%	2017	55,18%	44,82%	0,00%
1978	0,46%	4,04%	95%	1998	14,19%	19,99%	65,82%	2018	55,18%	44,82%	0,00%
1979	0,52%	4,55%	95%	1999	15,65%	21,15%	63,21%	2019	55,18%	44,82%	0,00%
1980	0,58%	5,05%	94%	2000	17,10%	22,30%	60,60%	2020	55,18%	44,82%	0,00%
1981	0,64%	5,56%	94%	2001	18,43%	22,33%	59,25%	2021	55,18%	44,82%	0,00%
1982	0,69%	6,06%	93%	2002	19,75%	22,35%	57,90%	2022	55,18%	44,82%	0,00%
1983	0,75%	6,57%	93%	2003	21,08%	22,38%	56,55%	2023	55,18%	44,82%	0,00%
1984	0,81%	7,07%	92%	2004	22,40%	22,40%	55,20%	2024	55,18%	44,82%	0,00%
1985	0,87%	7,58%	92%	2005	23,73%	22,43%	53,85%	2025	55,18%	44,82%	0,00%
1986	0,93%	8,08%	91%	2006	25,05%	22,45%	52,50%	2026	55,18%	44,82%	0,00%
1987	0,98%	8,59%	90%	2007	26,38%	22,48%	51,15%	2027	55,18%	44,82%	0,00%
1988	1,04%	9,09%	90%	2008	27,70%	22,50%	49,80%	2028	55,18%	44,82%	0,00%
1989	1,10%	9,60%	89,30%	2009	31,63%	25,69%	42,69%	2029	55,18%	44,82%	0,00%
								2030	55,18%	44,82%	0,00%

Fonte: a autora a partir de IBGE (2010).

Tabela 33 – Destinação final de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil, Cenário B.

Ano	Aterro sanitário	Aterro controlado	Vazadouro a céu aberto	Ano	Aterro sanitário	Aterro controlado	Vazadouro a céu aberto	Ano	Aterro sanitário	Aterro controlado	Vazadouro a céu aberto
1970	0%	0%	100%	1990	2,55%	10,75%	86,69%	2010	30,20%	24,53%	45,27%
1971	0,06%	0,51%	99%	1991	4,01%	11,91%	84,08%	2011	31,45%	25,54%	43,01%
1972	0,12%	1,01%	99%	1992	5,46%	13,06%	81,47%	2012	32,70%	26,56%	40,75%
1973	0,17%	1,52%	98%	1993	6,92%	14,22%	78,86%	2013	33,95%	27,57%	38,48%
1974	0,23%	2,02%	98%	1994	8,37%	15,37%	76,25%	2014	35,19%	28,59%	36,22%
1975	0,29%	2,53%	97%	1995	9,83%	16,53%	73,65%	2015	36,44%	29,60%	33,95%
1976	0,35%	3,03%	97%	1996	11,28%	17,68%	71,04%	2016	37,69%	30,62%	31,69%
1977	0,41%	3,54%	96%	1997	12,74%	18,84%	68,43%	2017	38,94%	31,63%	29,43%
1978	0,46%	4,04%	95%	1998	14,19%	19,99%	65,82%	2018	40,19%	32,65%	27,16%
1979	0,52%	4,55%	95%	1999	15,65%	21,15%	63,21%	2019	41,44%	33,66%	24,90%
1980	0,58%	5,05%	94%	2000	17,10%	22,30%	60,60%	2020	42,69%	34,67%	22,64%
1981	0,64%	5,56%	94%	2001	18,43%	22,33%	59,25%	2021	43,94%	35,69%	20,37%
1982	0,69%	6,06%	93%	2002	19,75%	22,35%	57,90%	2022	45,19%	36,70%	18,11%
1983	0,75%	6,57%	93%	2003	21,08%	22,38%	56,55%	2023	46,44%	37,72%	15,85%
1984	0,81%	7,07%	92%	2004	22,40%	22,40%	55,20%	2024	47,68%	38,73%	13,58%
1985	0,87%	7,58%	92%	2005	23,73%	22,43%	53,85%	2025	48,93%	39,75%	11,32%
1986	0,93%	8,08%	91%	2006	25,05%	22,45%	52,50%	2026	50,18%	40,76%	9,05%
1987	0,98%	8,59%	90%	2007	26,38%	22,48%	51,15%	2027	51,43%	41,78%	6,79%
1988	1,04%	9,09%	90%	2008	27,70%	22,50%	49,80%	2028	52,68%	42,79%	4,53%
1989	1,10%	9,60%	89,30%	2009	28,95%	23,51%	47,54%	2029	53,93%	43,81%	2,26%
								2030	55,18%	44,82%	0,00%

Fonte: a autora a partir de IBGE (2010).

APÊNDICE B – Cálculo da contribuição em termos de redução de emissão de GEE

A contribuição em termos de redução de emissão de GEE do potencial máximo de produção de biometano de aterro dimensionado na pesquisa foi calculado considerando a redução decorrente do uso do (i) biogás de aterro, e, portanto, destruição do metano gerado a partir da deposição de resíduos sólidos urbanos em locais de disposição final; e (ii) substituição do gás natural de origem fóssil por biometano.

(i) Emissões evitadas pela captura e utilização do gás de aterro para a produção de biometano

O dimensionamento do total de biogás produzido em locais de disposição de resíduos sólidos está descrito na seção 4.3. *Potencial de produção de biometano*. Foi considerado que a eficiência de coleta do sistema de extração forçada é de 75%, o que significa que apenas parte do gás produzido é efetivamente capturado e encaminhado para aproveitamento energético.

O total de biogás utilizado foi então multiplicado pelo Potencial de Aquecimento Global do metano, GWP_{CH_4} (do inglês, *Global Warming Potential*), de maneira que sua contribuição seja expressa em toneladas de dióxido de carbono equivalente (tCO_2eq). O GPW_{CH_4} é igual à 25. Os resultados estão apresentados na tabela abaixo.

Tabela 34 – Redução de emissões de GEE pela utilização de gás de aterro.

Ano	Gás de aterro disponível para uso – Cenário A (tCH_4)	Redução de Emissão de GEE – Cenário A (tCO_2eq)	Gás de aterro disponível para uso – Cenário B (tCH_4)	Redução de Emissão de GEE – Cenário B (tCO_2eq)
2015	1.180.808	29.520.193	1.301.272	32.531.810
2016	1.181.334	29.533.354	1.347.012	33.675.291
2017	1.174.944	29.373.608	1.390.050	34.751.244
2018	1.163.250	29.081.253	1.431.228	35.780.707
2019	1.147.357	28.683.923	1.471.122	36.778.045
2020	1.128.027	28.200.677	1.510.122	37.753.060
2021	1.103.913	27.597.820	1.548.500	38.712.489
2022	1.075.965	26.899.117	1.586.438	39.660.956
2023	1.044.836	26.120.892	1.624.063	40.601.563
2024	1.010.978	25.274.445	1.661.453	41.536.313
2025	978.630	24.465.742	1.698.654	42.466.358
2026	946.804	23.670.094	1.735.690	43.392.240
2027	914.850	22.871.256	1.772.561	44.314.023
2028	882.346	22.058.656	1.809.257	45.231.414
2029	851.061	21.276.522	1.845.757	46.143.916
2030	820.193	20.504.821	1.882.036	47.050.890

Fonte: a autora.

(ii) *Para a substituição do gás natural de origem fóssil por biometano*

O cálculo da redução de emissão de GEE dada a produção de biometano e consequente substituição do gás natural de origem fóssil considera a quantidade de gás de aterro disponível para o uso e a eficiência do processo de produção de biometano, que equivale à 70%, como descrito na seção 4.3. *Potencial de produção de biometano*. O fator de emissão do gás natural de origem fóssil foi estimado conforme a equação (1). Os parâmetros utilizados no cálculo e as fontes de onde foram obtidos constam da Tabela 35. Os resultados calculados estão apresentados na Tabela 36.

$$COFE_{CO2} = PC_{GN} * FE_{GN} * D_{GN} \quad (1)$$

Onde:

FE_{CO2} = coeficiente de emissão de CO₂ do gás natural (tCO₂/m³)

PC_{GN} = poder calorífico do gás natural (TJ/Gg)

FE_{GN} = fator de emissão de CO₂ do gás natural (tCO₂/TJ)

D_{GN} = densidade do gás natural (kg/m³)

Tabela 35 – Parâmetros do cálculo do fator de emissão de CO₂ do gás natural.

Parâmetro (Gás Natural)	Valor	Fonte
Densidade	0,74 kg/m ³	(EPE, 2015)
Poder calorífico	48 TJ/Gg	(GARG et al., 2006)
Fator de emissão	56,1 tCO ₂ /TJ	(GARG et al., 2006)
Fator de emissão	0,0020 tCO ₂ /m ³	Calculado (Equação 1)

Fonte: a autora.

Tabela 36 - Redução de emissões de GEE pela substituição de gás natural por biometano.

Ano	Potencial de produção de biometano – Cenário A (m³/h)	Redução de Emissão de GEE – Cenário A (tCO₂)	Potencial de produção de biometano – Cenário B (m³/h)	Redução de Emissão de GEE – Cenário B (tCO₂)
2015	215.755	3.766.175	237.766	4.150.396
2016	215.851	3.767.854	246.123	4.296.280
2017	214.683	3.747.473	253.987	4.433.550
2018	212.547	3.710.175	261.511	4.564.889
2019	209.643	3.659.484	268.800	4.692.129
2020	206.111	3.597.831	275.927	4.816.521
2021	201.705	3.520.919	282.939	4.938.924
2022	196.598	3.431.779	289.871	5.059.929
2023	190.910	3.332.493	296.745	5.179.932
2024	184.724	3.224.504	303.577	5.299.187
2025	178.813	3.121.330	310.375	5.417.841
2026	172.998	3.019.821	317.142	5.535.965
2027	167.160	2.917.906	323.879	5.653.566
2028	161.221	2.814.235	330.584	5.770.606
2029	155.504	2.714.450	337.253	5.887.023
2030	149.864	2.615.997	343.882	6.002.734

Fonte: a autora.

ANEXO A – Resolução ANP Nº08/2015

O texto apresentado abaixo corresponde à transcrição da resolução ANP que determina as especificações técnicas referentes ao uso do biometano no Brasil.

**AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS
RESOLUÇÃO ANP Nº 8, DE 30.1.2015 - DOU 2.2.2015**

A DIRETORA-GERAL da AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS - ANP, no uso de suas atribuições, tendo em vista o disposto nos incisos I e XVIII, do art. 8º, da Lei nº 9.478, de 6 de agosto de 1997, alterada pela Lei nº 11.097, de 13 de janeiro 2005 e com base na Resolução de Diretoria nº 39, de 22 de janeiro de 2015,

Considerando que compete à ANP proteger os interesses dos consumidores quanto a preço, qualidade e oferta de produtos;

Considerando que cabe à ANP estabelecer as especificações dos derivados de petróleo, gás natural e seus derivados e biocombustíveis;

Considerando que a Lei nº 12.490, de 16 de setembro de 2011, atribuiu à ANP a regulação e a autorização das atividades relacionadas com a indústria dos biocombustíveis;

Considerando que o Biometano atende à definição de biocombustíveis estabelecida na Lei nº 12.490/2011; e

Considerando que a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, dispõe em seu artigo 9º sobre tecnologias de recuperação energética a partir de resíduos sólidos urbanos,

Resolve:

Seção I

Das Disposições Preliminares

Art. 1º Fica estabelecida a especificação do Biometano contida no Regulamento Técnico ANP nº 1/2015, parte integrante desta Resolução.

Parágrafo único. A presente Resolução aplica-se ao Biometano oriundo de produtos e resíduos orgânicos agrossilvopastoris e comerciais destinado ao uso veicular (GNV) e às instalações residenciais e comerciais.

Art. 2º O uso residencial, comercial ou veicular de Biometano obtido a partir de resíduos sólidos urbanos ou resíduos de esgotamento sanitário, ainda que atenda a especificação contida no Regulamento Técnico, parte integrante desta Resolução, deverá obedecer ao disposto na Resolução ANP nº 23, de 13 de agosto de 2012.

Seção II

Das Definições

Art. 3º Para os fins desta Resolução ficam estabelecidas as seguintes definições:

I - Biogás: gás bruto obtido da decomposição biológica de produtos ou resíduos orgânicos;

II - Biometano: biocombustível gasoso constituído essencialmente de metano, derivado da purificação do Biogás;

III - Gás Natural Veicular (GNV): denominação do combustível gasoso, tipicamente proveniente do Gás Natural ou Biometano, ou da mistura de ambos, destinado ao uso veicular e cujo componente principal é o metano, observadas as especificações estabelecidas pela ANP;

IV - Resíduos agrossilvopastoris: os gerados nas atividades agropecuárias e silviculturais, incluídos os relacionados a insumos utilizados nessas atividades, de acordo com a Lei 12.305, de 2 de agosto de 2010;

V - Resíduos comerciais: resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços, de acordo com a Lei 12.305, de 2 de agosto de 2010.

Seção III

Das Regras de Utilização

Art. 4º É vedada a comercialização de Biometano que não atenda a especificação estabelecida no Regulamento Técnico, parte integrante desta Resolução.

Art. 5º O Biometano que atenda à especificação estabelecida no Regulamento Técnico, parte integrante desta Resolução, poderá ser misturado ao gás natural.

§ 1º Não se aplica o disposto no caput ao Biometano oriundo de resíduos sólidos urbanos ou resíduos de esgotamento sanitário.

§ 2º A mistura do Biometano com gás natural deverá atender ao Regulamento Técnico da Resolução ANP nº 16, de 17 de junho de 2008.

Seção IV

Do Controle da Qualidade

Art. 6º O produtor fica obrigado a realizar as análises do Biometano em linha e a emitir diariamente o Certificado da Qualidade, o qual deverá conter o resultado da análise de todas as características, os limites da especificação e os métodos empregados, comprovando que o produto atende à especificação constante do Regulamento Técnico, bem como a matéria-prima utilizada para a geração do Biogás.

§ 1º O Certificado da Qualidade deverá ser firmado pelo profissional de química responsável pelas análises, com indicação legível de seu nome e número de inscrição no respectivo órgão de classe.

§ 2º No caso de emissão eletrônica do Certificado da Qualidade, deverão estar indicados o nome e o número de inscrição no órgão de classe do químico responsável pelas análises realizadas.

§ 3º O produtor deverá enviar à ANP, até o 15º (décimo quinto) dia do mês subsequente àquele a que se referirem os dados enviados, um sumário estatístico dos Certificados da Qualidade, em formato eletrônico, conforme instruções disponíveis no sítio da ANP.

§ 4º O produtor deverá encaminhar juntamente com o sumário estatístico, anotações relativas à interrupção da produção, informando, a cada ocorrência, a data e hora do corte, bem como a data e hora da retomada do fornecimento.

Art. 7º O produtor deverá manter sob sua guarda os Certificados da Qualidade, pelo prazo mínimo de 12 (doze) meses a contar da data de emissão, e disponibilizá-los à ANP sempre que solicitados, no prazo máximo de 5 (cinco) dias, contados da data da solicitação.

Seção V

Das Disposições Gerais

Art. 8º O Biometano deverá estar odorado na distribuição, atendendo às exigências específicas da legislação estadual.

Art. 9º A ANP poderá, a qualquer tempo, submeter o produtor à auditoria de qualidade, a ser executada por seu corpo técnico ou por entidades credenciadas pelo Inmetro, sobre procedimentos e equipamentos de medição que tenham impacto sobre a qualidade e a confiabilidade dos serviços de que trata esta Resolução e seu Regulamento Técnico.

Parágrafo único. O produtor deverá dispor de padrões de referência, acompanhados dos respectivos certificados de composição emitidos pelos fabricantes, para a aferição dos instrumentos utilizados na análise do produto e proceder às verificações solicitadas na auditoria.

Seção VI

Das Disposições Finais

Art. 10. Fica alterado o inciso X do art. 4º da Resolução ANP nº 41, de 5 de novembro de 2013, que passa a vigorar com a seguinte redação:

"X - Gás Natural Veicular (GNV): denominação do combustível gasoso, tipicamente proveniente do GN ou Biometano, ou da mistura de ambos, destinado ao uso veicular e cujo componente principal é o metano, observadas as especificações estabelecidas pela ANP;"

Art. 11. Fica alterado o art. 1º da Resolução ANP nº 23, de 13 de agosto de 2012, que passa a vigorar com a seguinte redação:

"Art. 1º Fica sujeita à autorização prévia da ANP a utilização de Biocombustíveis não Especificados e de suas misturas com combustíveis e/ou biocombustíveis especificados no país, destinados ao Uso Experimental ou

ao Uso Específico, caso o Consumo Mensal seja superior a 10.000 litros para combustíveis líquidos e 10.000 Nm³ (a 20°C e 1 atm) para combustíveis gasosos."

Art. 12. Ficam incluídos os incisos I e II ao § 1º do art. 1º da Resolução ANP nº 23, de 13 de agosto de 2012:

"I - Fica dispensada a autorização para Uso Experimental e Específico de biocombustível gasoso não especificado e de suas misturas com combustíveis e/ou biocombustíveis especificados em Equipamentos de Uso Industrial, desde que tenha sido comprovada sua viabilidade técnica e ambiental e com a implantação de programa de monitoramento de emissão de gases tóxicos aprovado pelo órgão ambiental, nos termos do art. 9º da Lei nº 12.305/2010;

II - Na hipótese do inciso I, ficam os agentes envolvidos na comercialização e uso responsáveis pelos eventuais danos causados aos equipamentos empregados, ao meio ambiente e outros."

Art. 13. Fica incluído o § 7º ao art. 3º da Resolução ANP nº 23, de 13 de agosto de 2012, com a seguinte redação:

"§ 7º No caso de Biometano obtido a partir resíduos sólidos urbanos, a documentação exigida no inciso IV do art. 3º deverá estar em conformidade com o disposto no § 1º, do artigo 9º, da Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, além de outros requisitos que o órgão ambiental julgar aplicáveis."

Art. 14. Fica incluído o art. 3º-A na Resolução ANP nº 23, de 13 de agosto de 2012, com a seguinte redação:

"Art. 3º-A O transporte de biometano oriundo de resíduos sólidos urbanos ou de resíduos de esgotamento sanitário poderá ser feito por meio de Veículos Transportadores de Gás Comprimido, para realização do uso experimental.

§ 1º O transportador do biometano de que trata o caput deverá comprovar a utilização de Veículos Transportadores de Gás Comprimido de uso exclusivo para o transporte desse produto com identificação da empresa proprietária e placa das carretas.

§ 2º A unidade de compressão nas instalações do produtor poderá ser objeto de inspeção pela ANP antes do início do uso experimental.

§ 3º Veículo Transportador de Gás Comprimido: veículo utilizado para o transporte do biometano de que trata o caput, construído e operado com observância às normas técnicas aplicáveis e que atenda, ainda, as diretrizes legais estabelecidas para o transporte rodoviário de produtos perigosos."

Art. 15. Fica alterado o art. 4º da Resolução ANP nº 23, de 13 de agosto de 2012, que passa a vigorar com a seguinte redação:

"Art. 4º A ANP poderá solicitar documentação adicional, incluindo, mas não limitada, à Licença para Uso de Configuração de Veículo ou Motor (LCVM) e garantia do fabricante do motor, na hipótese de se tratar de Produto que não seja objeto de autorização concedida pela ANP."

Art. 16. Fica alterado o inciso II do art. 5º da Resolução ANP nº 23, de 13 de agosto de 2012, passa a vigorar com a seguinte redação:

"II - no caso de realização de testes com o Produto, durante um período mínimo de 6 (seis) meses, com Consumo Mensal inferior a 10.000 (dez mil) litros para combustíveis líquidos, mediante apresentação da seguinte documentação:"

Art. 17. Fica incluído o inciso VIII no art. 3º da Resolução ANP nº 16, de 17 de junho de 2008, com a seguinte redação:

"VIII - Gás Natural Veicular (GNV): denominação do combustível gasoso, tipicamente proveniente do Gás Natural ou Biometano, ou da mistura de ambos, destinado ao uso veicular e cujo componente principal é o metano, observadas as especificações estabelecidas pela ANP."

Art. 18. Fica alterado o caput do art. 4º da Resolução ANP nº 16, de 17 de junho de 2008, que passa a vigorar com a seguinte redação:

"Art. 4º A presente Resolução aplica-se ao gás natural a ser utilizado como combustível para fins industriais, residenciais, comerciais, automotivos (GNV) e de geração de energia."

Art. 19. Ficam incluídos os incisos XIII e XIV no Art. 2º da Resolução ANP nº 41, de 05 de dezembro de 2007, com a seguinte redação:

"XIII - Biogás: gás bruto obtido da decomposição biológica de produtos ou resíduos orgânicos;

XIV - Biometano: biocombustível gasoso constituído essencialmente de metano, derivado da purificação do Biogás."

Art. 20. Fica incluído o § 3º no art. 1º da Resolução da Resolução ANP nº 41, de 5 de dezembro de 2007, com a seguinte redação:

"§ 3º Para fins desta Resolução, o Biometano especificado conforme a Resolução ANP nº 8, de 30 de janeiro de 2015, será tratado de forma análoga ao Gás Natural."

Art. 21. Os casos omissos poderão ser objeto de análise e deliberação da ANP.

Art. 22. O não atendimento ao disposto nesta Resolução sujeita o infrator às sanções administrativas previstas na Lei nº 9.847 de 26 de outubro de 1999, alterada pela Lei nº 11.097, de 13 de janeiro de 2005, e no Decreto nº 2.953, de 28 de janeiro de 1999, sem prejuízo das penalidades de natureza civil e penal.

Art. 23. Esta Resolução entra em vigor na data de sua publicação.

MAGDA MARIA DE REGINA CHAMBRIARD

ANEXO

REGULAMENTO TÉCNICO ANP Nº 1/2015

1. Objetivo

Este Regulamento Técnico aplica-se ao Biometano oriundo de produtos e resíduos orgânicos agrossilvopastoris e comerciais destinado ao uso veicular e às instalações residenciais e comerciais, de origem nacional, a ser comercializado em todo o território nacional.

1.1. Nota explicativa

O Biometano objeto desta especificação permanece no estado gasoso sob condições de temperatura e pressão ambientes. É produzido a partir do biogás oriundo da digestão anaeróbica de resíduos orgânicos de origem vegetal, animal ou de processamento da agroindústria, que contém principalmente metano e dióxido de carbono, podendo ainda apresentar componentes inertes do ponto de vista da aplicação, tais como nitrogênio, oxigênio e dióxido de carbono, bem como traços de outros constituintes. É intercambiável com o gás natural entregue à distribuição nas regiões nordeste, centro oeste, sudeste e sul. Requer os mesmos cuidados, na compressão, distribuição e revenda, dispensados ao gás natural.

O Biometano deve apresentar concentrações limitadas de componentes potencialmente corrosivos de modo que a segurança e a integridade dos equipamentos sejam preservadas. Esses componentes são sulfeto de hidrogênio, dióxido de carbono e água.

2. Sistema de Unidades

O sistema de unidades a ser empregado no Regulamento Técnico é o SI de acordo com a norma brasileira NBR/ISO 1000.

Desta forma, a unidade de pressão é o Pa e seus múltiplos e a unidade de temperatura o K (Kelvin) ou o °C (grau Celsius).

3. Condição de referência

A condição de temperatura, pressão e umidade de referência requerida para o cálculo das características especificadas neste Regulamento Técnico são 293,15 K e 101,325 kPa e base seca.

4. Normas Aplicáveis

A determinação das características do produto far-se-á mediante o emprego de normas da American Society for Testing and Materials (ASTM), da International Organization for Standardization (ISO) e da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Os dados de incerteza, repetitividade e reprodutibilidade, fornecidos nos métodos relacionados neste Regulamento, devem ser usados somente como guia para aceitação das determinações em duplicata de ensaio e não devem ser considerados como tolerância aplicada aos limites especificados.

A análise em linha do produto deverá ser realizada de acordo com o método ISO 10715 - Natural Gas: Sampling Guidelines.

As características incluídas no Quadro

I - Tabela de especificação do Biometano deverão ser determinada de acordo com a publicação mais recente

dos seguintes métodos de ensaio:

4.1. Normas ABNT

MÉTODO	TÍTULO
NBR/ISO 1000	Unidades SI e recomendações para o uso dos seus múltiplos e de algumas outras unidades
NBR 14903	Gás natural - Determinação da composição por cromatografia gasosa
NBR 15616	Odoração do gás natural canalizado
NBR 15631	Gás natural - Determinação de compostos sulfurados utilizando cromatografia em fase gasosa
NBR 15765	Gás natural e outros combustíveis gasosos - Determinação do teor de vapor de água através de analisadores eletrônicos de umidade

4.2. Normas ASTM

MÉTODO	TÍTULO
D 1945	Analysis of natural gas by gas chromatography
D 5454	Water vapor content of gaseous fuels using electronic moisture analyzers
D 5504	Determination of sulfur compounds in natural gas and gaseous fuels by gas chromatography and chemiluminescence
D 6228	Determination of sulfur compounds in natural gas and gaseous fuels by gas chromatography and flame photometric detection

4.3. Normas ISO

MÉTODO	TÍTULO
6326-1	Natural gas - Determination of sulfur compounds, Part 1: General introduction
6326-3	Natural gas - Determination of sulfur compounds, Part 3: Determination of hydrogen sulfide, mercaptan sulfur and carbonyl sulfide sulfur by potentiometry
6326-5	Natural gas - Determination of sulfur compounds, Part 5: Lingener combustion method
6327	Gas analysis - Determination of water dew point of natural gas - Cooled surface condensation hygrometers
6974-1	Natural gas - Determination of composition with defined uncertainty by gas chromatography, Part 1: Guidelines for tailored analysis
6974-5	Natural gas - Determination of composition with defined uncertainty by gas chromatography, Part 5: Determination of nitrogen, carbon dioxide and C1 to C5 and C6+ hydrocarbons for a laboratory and on-line measuring system using three columns
10101-1	Natural gas - Determination of water by the Karl Fischer method - Part 1: Introduction
10101-2	Natural gas - Determination of water by the Karl Fischer method - Part 2: Titration procedure

10101-3	Natural gas - Determination of water by the Karl Fischer method - Part 3: Coulometric procedure
10715	Natural gas - Sampling Guidelines
11541	Natural gas - Determination of water content at high pressure
18453	Natural gas - Correlation between water content and water dew point
19739	Natural gas - Determination of sulfur compounds using gas chromatography

Tabela I: Tabela de especificação do Biometano (1)

CARACTERÍSTICA	UNIDADE	LIMITE		MÉTODO		
		Região Norte - Urucu	Demais Regiões	NBR	ASTM	ISO
Metano	% mol.	90,0 a 94,0 (2)	96,5 mín.	14903	D1945	6974
Oxigênio, máx.	% mol.	0,8	0,5	14903	D1945	6974
CO ₂ , máx.	% mol.	3,0	3,0	14903	D1945	6974
CO ₂ +O ₂ +N ₂ , máx.	% mol.	10,0	3,5	14903	D1945	6974
Enxofre Total, máx.(3)	mg/m ³	70	70	15631	D5504	6326-3 6326-5 19739
Gás Sulfídrico (H ₂ S), máx.	mg/m ³	10	10	15631	D5504 D6228	6326-3 19739
Ponto de orvalho de água a 1atm, máx.	°C	-45	-45	15765	D5454	6327 10101-2 10101-3 11541 (4)

Observações:

(1) O Biometano deve ser isento de partículas sólidas ou líquidas devendo ser usado um filtro de 0,2 µm no produtor e 1,0 µm no revendedor varejista.

(2) A especificação de 90,0 a 94,0 % mol de metano deve ser seguida somente nas localidades da Região Norte abastecidas pelo gás natural de Urucu.

(3) A odorização do Biometano quando necessária deverá atender a norma ABNT NBR 15616.

(4) O ponto de orvalho de água deve ser calculado por meio da norma ISO 18453 quando se usar método para a determinação do teor de água.