



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO TECNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E DESENVOLVIMENTO  
SUSTENTÁVEL**

**JUÇARA DE JESUS MONTEIRO DE GALIZA**

**ANÁLISE TÉCNICA E REGULATÓRIA DA GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR  
DO BIOGÁS DE ATERROS SANITÁRIOS NO ESPÍRITO SANTO**

**VITÓRIA - ES  
2017**

**JUÇARA DE JESUS MONTEIRO DE GALIZA**

**ANÁLISE TÉCNICA E REGULATÓRIA DA GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR  
DO BIOGÁS DE ATERROS SANITÁRIOS NO ESPÍRITO SANTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> D.Sc. Adriana Fiorotti Campos

Coorientador: Prof. Dr. Renato Ribeiro Siman

**VITÓRIA - ES**

**2017**

## FICHA CATALOGRÁFICA

## ATA DE APROVAÇÃO

*Aos meus amados pais, Léa e Carlinhos (in memoriam).*

*Ao meu amor, Fabio.*

*Aos meus irmãos, alicerces da minha vida, Moema, Luana e Junior.*

*Ao anjo da minha vida, Kalena.*

*A todos aqueles que partilham da mesma consciência ambiental e sentem o profundo desejo de contribuir para a regeneração do nosso planeta.*

## **AGRADECIMENTOS**

Ao maior mestre de todos os tempos, Jesus, por suscitar em mim inspiração para empreender esta jornada, e aos trabalhadores de sua seara, por me intuírem e guiarem nessa caminhada.

Ao meu companheiro, amigo e amor, Fabio, por vivenciar comigo cada fase desta tarefa e por suportar o cansaço, o choro, a ansiedade e toda tensão que uma mestranda pode vivenciar no decorrer de uma dissertação. Sua paciência e amor são parte da minha vitória.

À minha família, com agradecimentos extensivos à família Dazzi, por me dispensarem força, incentivo, compreensão, amparo e o amor de sempre.

Aos meus amigos, por compreenderem minha ausência em momentos importantes. Guardo todos no meu coração.

À minha orientadora, Adriana Fiorotti Campos, por me fazer acreditar na minha capacidade e por se mostrar incansável no trabalho de orientação, cujo resultado transcende as bases tradicionais da educação.

Ao meu coorientador, Renato Ribeiro Siman, por colaborar comigo sempre, com disponibilidade, profissionalismo e amizade, e por propiciar encontros, reflexões e questionamentos que me fizeram enredar pelos campos da engenharia para enriquecer este trabalho.

Ao Dr. Luciano Basto Oliveira, integrante da Equipe Técnica da EPE, por me honrar com sua participação e por ampliar meus conhecimentos com elucidações, acompanhamento e motivação durante a pesquisa.

À banca de defesa e qualificação, em especial à professora Glícia Vieira, por atuar com disponibilidade e profissionalismo e por me oferecer consideráveis contribuições.

Aos professores do Programa de Mestrado, por me oferecerem apoio e aprendizado, em especial ao professor Ednilson Felipe, por me dedicar a atenção de que eu necessitava em muitos momentos desta lida.

Ao professor Arlindo Villaschi, do Programa de Pós-Graduação em Economia, e à professora Sônia Dalcomuni, do Programa de Pós-Graduação em Gestão Pública, por me terem recebido em suas turmas de Economia Brasileira e Desenvolvimento Sustentável respectivamente.

Ao professor Élcio Alexandre, por ter sido um incentivador.

Aos colegas da Equipe Técnica, Eneias Oliveira e Talliana Cardoso, por se prestarem a me ajudar e, principalmente, por terem aceitado o desafio de pesquisar sobre o biogás.

Ao grupo Vip (Simone Barni, Giulliana Calmon, Maria Elisa de Freitas, Daniella Amorim, Lygia Wilken e Luciano Fasolo), por, além da ajuda inteligente, mesmo durante as madrugadas, me proporcionarem momentos de muitas risadas, companheirismo e força e por compartilharem comigo a dor e o prazer que se experimenta na caminhada pela realização de um sonho.

A todos os colegas do mestrado, especialmente a Juliana Botelho, pela amizade, a Luiz Guilherme, por me socorrer com presteza e competência nos momentos de dúvidas, a Guilherme Fiorot, Fernanda Passamani, Marcos Dalvi Garcia, Gisele Gavazza, Alexandre Araújo e Gustavo Ferreira, por sempre me fazerem sentir a sua disponibilidade.

A Victor Hugo Ives, Luan dos Santos, Uonis Pagel e Cynthia Scarpati, integrantes do grupo de pesquisa em Regulação do Setor Energético, coordenado pela professora Adriana, no qual também estou inserida, por me incentivarem e me apoiarem sempre.

Aos colegas do Laboratório de Gestão do Saneamento Ambiental (Lagesa) da UFES, em especial a Renato Dutra, por estarem sempre dispostos a me auxiliar e apoiar.

À Thaynara dos Santos e demais colaboradores do PPGES, por agir com toda presteza e paciência no atendimento às minhas solicitações.

A Alexandre de Mello Delpupo, servidor da Aspe (hoje ARSP), e demais pesquisadores da Equipe, pelas horas de estudo, diálogos e reflexões em reuniões presenciais ou não, na ASPE, na AGERH e na UFES, embora sem a formalização de um termo de cooperação institucional entre a UFES e a ARSP. Gratidão por

disponibilizar seus conhecimentos sob o ponto de vista de um cientista em Física e assim contribuir para a elaboração desta pesquisa.

Ao Claudio Guedes Coelho, colaborador da Marca Ambiental, cujo profissionalismo e amizade foram fundamentais à concretização deste trabalho, por me apresentar na prática todo o conhecimento que eu dominava somente na teoria.

Ao Sr. José Henrique Penido Monteiro, da Comlurb, pela incrível oportunidade de visitar o aterro de Gramacho e a Usina Gás Verde.

Ao Sr. Elias Gouvêa, por toda atenção que me foi proporcionada durante a visita técnica ao aterro de Gramacho.

Aos profissionais e representantes da Usina Gás Verde pela gentil recepção e esclarecimento de dúvidas durante a visita.

Aos profissionais das Usinas Termelétricas que prontamente responderam ao questionário e contribuíram para este trabalho.

Ao Sr. Paulo Costa, meu mentor, por me ajudar a descobrir que seria capaz de conquistar o título de Mestre e qualquer outro que quisesse conseguir.

À Cláudia Pacheco, minha mentora, por me ajudar a ir sempre além e redescobrir meu lugar.

À Luzi, por me tratar com cuidado e carinho, graças aos quais me fortaleci.

À Evellyn Zorzanelli, por me inspirar na busca da realização que o conhecimento proporciona. Tudo isso começou com você.

A todos os que participaram desta jornada, por terem contribuído, de alguma forma, para a consecução do trabalho.



*"Há um tempo em que é preciso abandonar as roupas usadas, que já têm a forma do nosso corpo, e esquecer os nossos caminhos, que nos levam sempre aos mesmos lugares. É o tempo da travessia: e, se não ousarmos fazê-la, teremos ficado, para sempre, à margem de nós mesmos".*

*Fernando Teixeira de Andrade*

## RESUMO

A utilização de biogás proveniente de digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos apresenta-se como uma importante opção para diversificar a matriz energética brasileira, além de contribuir para reduzir o impacto dos resíduos sólidos no meio ambiente. Assim, este estudo objetiva estimar a capacidade de oferta de biogás proveniente dos aterros sanitários do estado do Espírito Santo a fim de avaliar seu potencial energético para geração de energia elétrica. Analisa, também, as possibilidades regulatórias de comercialização e uso desse recurso no Brasil, especialmente no Espírito Santo e em suas macrorregiões. No que diz respeito à metodologia, emprega, em sua fase quantitativa, a coleta de informações em aterros sanitários em operação e a projeção de geração de resíduos para o Espírito Santo para inserção em modelo matemático denominado LandGEM, recomendado pela *United States Environmental Protection Agency* para previsão do potencial de geração de biogás. Em sua fase qualitativa de análises regulatórias de comercialização de energia a partir do biogás, utiliza pesquisa documental e bibliográfica. Realiza também entrevistas com representantes do setor energético e de usinas termoeletricas que operam com o biogás de resíduos sólidos urbanos no Brasil. Os resultados indicam que a energia disponível para abastecimento no período de 2016 a 2035 é de aproximadamente  $3,17 \times 10^9$  kWh (média anual de 158.687MWh/ano capaz de atender até 88.160 residências). A análise regulatória constata que esse potencial também encontra viabilidade para aplicação em caráter experimental e industrial, assim como para uso dedicado e para combustível veicular em frotas cativas. Constata também que, atualmente, o marco regulatório nacional inviabiliza a utilização desse recurso para injeção na rede de gás natural.

**Palavras-chave:** Biogás. Biometano. Recuperação Energética. Regulação.

## ABSTRACT

The use of biogas generated from anaerobic digestion of Solid Urban Waste (SUW) reveals itself as an important option for diversifying the Brazilian energetic sources plus reducing the impact of solid waste on the environment. So, this study tried to estimate the potential for biogas generation in the landfills in the state of Espírito Santo aiming to evaluate its energetic potential in the creation of electric energy. Also it analyzes regulatory possibilities for commercialization and the use of this resource in Brazil and especially in Espírito Santo and its macro regions. Regarding methodology this research used in its quantitative phase the gathering of information on operational landfills and a projection for waste generation for Espírito Santo to be included in Model Land GEM recommended by United States Environmental Protection Agency for prevision of biogas generation potential. In its qualitative phase of energy commercialization regulation analysis, was used bibliographical and documental research. We also used interviews with representatives of the energy sector and plants. The results indicate that the available energy for supply in the period from 2016 to 2035 is approximately  $3.17 \times 10^9$  kWh, an annual average of 158.687 MWh/year, capable to attend to 88.160 households. Based on regulatory analysis was noted the feasibility for use in experimental and industrial forms as well as for dedicated use and vehicular fuel in captive fleets. However, in the present time national regulations make it unfeasible the use of this resource in the natural gas (NG) network.

**Keywords:** Biogas. Biomethane. Energetic Recovery. Regulation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Oferta interna de energia no mundo.....	27
Figura 2 – Oferta interna de energia no Brasil.....	29
Figura 3 - Oferta interna bruta de energia no Espírito Santo.....	31
Figura 4 – Tipos de biomassa .....	34
Figura 5 – Proporção de energia renovável no consumo final mundial em 2013 .....	36
Figura 6 – Proporção da biomassa na matriz elétrica brasileira.....	37
Figura 7 – Caracterização e classificação dos resíduos conforme NBR 10.004:2004 .....	44
Figura 8 – Destinação final de RSU no Estado do Espírito Santo (t/dia).....	51
Figura 9 – Fases de geração de biogás em aterros de resíduos sólidos .....	58
Figura 10 – Rotas de conversão da biomassa em energia .....	64
Figura 11 – Diagrama com as alternativas de reaproveitamento do biogás.....	66
Figura 12 – Rotas para utilização do biogás de RSU.....	67
Figura 13 – Desenho esquemático do funcionamento de um motor ciclo Otto e ciclo Diesel .....	75
Figura 14 – Desenho esquemático do funcionamento de uma turbina a gás.....	76
Figura 15 – Componentes do sistema da microturbina .....	77
Figura 16 – Governança regulatória, eficiência e desempenho setorial.....	110
Figura 17 – Estrutura dos setores de energia, saneamento e gás natural .....	117
Figura 18 – Configuração do saneamento básico conforme a LNSB.....	118
Figura 19 – Objetivo da PNRS (2010) e hierarquia na gestão dos resíduos.....	127
Figura 20 – Organograma da ARSP .....	131
Figura 21 – Reforma do setor elétrico brasileiro (década de 2000).....	138
Figura 22 – Síntese dos principais mecanismos de comercialização de energias renováveis em alguns países .....	145

Figura 23 – Geração de energia elétrica convencional x geração distribuída .....	149
Figura 24 – Possibilidades regulatórias de aproveitamento energético dos RSU ...	152
Figura 25 – Sistema de Compensação de Energia Elétrica .....	159
Figura 26 – Nova configuração estrutural da indústria brasileira de gás natural.....	166
Figura 27 – Comparação da estrutura física de energia elétrica com a de gás no Brasil .....	168
Figura 28 – Competências regulatórias do setor de gás natural .....	169
Figura 29 – Recorte metodológico do objeto de estudo .....	180
Figura 30 – Fluxograma esquemático das fases e atividades propostas para a dissertação .....	181
Figura 31 – Descrição das etapas iniciais da parte técnica.....	182
Figura 32 – Distribuição municipal do Programa Espírito Santo sem Lixão .....	183
Figura 33 – Metodologia da pesquisa quantitativa .....	185
Figura 34 – Sequência de execução metodológica da fase regulatória .....	195
Figura 35 – Metodologia da pesquisa qualitativa .....	197
Figura 36 – Sequência de execução da pesquisa realizada com as UTEs .....	199
Figura 37 – Evolução típica da produção de biogás em aterro sanitário.....	210
Figura 38 – Marcos regulatórios para o biogás de RSU.....	218
Figura 39 – UTEs de RSU beneficiadas com incentivo.....	223

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Conceitos de biomassa .....	34
Quadro 2 – Classificação das fontes de biomassa segundo a Aneel.....	35
Quadro 3 – Classificação dos resíduos sólidos quanto à origem, conforme a PNRS. .....	45
Quadro 4 – Fatores que interferem na migração do gás de aterro.....	59
Quadro 5 – Modelos teóricos para geração de biogás.....	80
Quadro 6 – Planilhas do LandGEM e suas funções.....	85
Quadro 7 - Parâmetros utilizados para estimar a geração de CH <sub>4</sub> em aterros sanitários.....	86
Quadro 8 – Conceitos e objetivos da regulação.....	96
Quadro 9 – Tipos de assimetria no ambiente regulatório.....	107
Quadro 10 – Critérios para o bom desempenho da regulação.....	109
Quadro 11 – Mudanças no setor elétrico brasileiro .....	134
Quadro 12 – Diferenças entre ACL e ACR.....	141
Quadro 13 – Agentes do mercado de energia elétrica.....	142
Quadro 14 – Mudanças ocorridas no setor de gás natural no Brasil.....	163
Quadro 15 – Municípios integrantes da divisão regional do Programa Espírito Santo sem Lixão.....	184
Quadro 16 – Resumo das informações coletadas na pesquisa <i>Survey</i> .....	198
Quadro 17 – Arcabouço legal para o uso energético a partir de RSU no Brasil.....	217
Quadro 18 – Legislação estadual do Espírito Santo aplicada aos RSU <i>versus</i> energia .....	218
Quadro 19 – Possibilidades de aproveitamento do biogás de RSU para geração de energia elétrica.....	221
Quadro 20 – Possibilidades de aproveitamento do biogás de RSU como gás natural .....	229

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Usinas termelétricas por tipo .....	39
Tabela 2 – Usinas termelétricas operando com biogás de RSU no Brasil .....	40
Tabela 3 - Energia e potencial por tipo de biomassa no Espírito Santo (2001 a 2010) .....	42
Tabela 4 – Quantidade de RSU gerados por região no Brasil .....	48
Tabela 5 – Quantidade de RSU coletados por região no Brasil .....	49
Tabela 6 – Destinação final de RSU por unidade de destino no Brasil (%).....	49
Tabela 7 – Coleta e geração de RSU no estado do Espírito Santo.....	50
Tabela 8 – Composição gravimétrica estimada dos RSU coletados no Brasil .....	53
Tabela 9 – Composição típica de biogás gerado em reatores anaeróbios tratando esgoto doméstico, aterros sanitários na fase metanogênica e digestores de lodo....	62
Tabela 10 – Tecnologias de conversão.....	70
Tabela 11 – Valores de k sugeridos pelo Banco Mundial conforme precipitação anual .....	81
Tabela 12 – Valores de $L_0$ em função da degradabilidade do resíduo .....	82
Tabela 13 – Valores de $L_0$ determinantes do potencial de geração de metano .....	88
Tabela 14 – Valores da constante de decaimento k.....	89
Tabela 15 – Valores de k obtido por Ensinas (2003).....	92
Tabela 16 – Características de aterros sanitários em alguns países .....	94
Tabela 17 – Conceito de consumidor livre em determinadas agências estaduais ..	170
Tabela 18 – RSU dispostos nos aterros sanitários existentes no Espírito Santo até 2014 em Mg/ano. ....	186
Tabela 19 – Projeção populacional do Espírito Santo calculada com progressão aritmética.....	188
Tabela 20 – Estimativa de geração anual de resíduos em Mg/ano a serem coletados pelos aterros previstos no <i>Espírito Santo sem Lixão</i> .....	189

Tabela 21 – Valores de k e $L_0$ utilizados no LandGEM para a estimativa de geração estadual de biogás e metano. ....	191
Tabela 22 – Valores de poder calorífico de metano .....	192
Tabela 23 – Valores de eficiências (%) e custo (R\$/kW) dos motores, conforme sua potência.....	193
Tabela 24 – Resumo dos parâmetros adotados para o cálculo de geração de energia elétrica.....	194
Tabela 25 – Vazão de metano gerada e possível de ser recuperada, em m <sup>3</sup> /ano. .	208
Tabela 26 – Energia disponível a partir da geração gás metano estimado .....	211
Tabela 27 – Geração de energia por tonelada de resíduos .....	212
Tabela 28 – Metano/ano e energia/ano para as regiões do Espírito Santo sem Lixão .....	213
Tabela 29 - Objetivos da produção de energia nas UTEs de RSU .....	222



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>18</b>
1.1	INTRODUÇÃO AO TEMA DA PESQUISA	18
1.2	JUSTIFICATIVA	21
1.3	ESTRUTURA CAPITULAR	22
1.4	OBJETIVOS	23
1.4.1	<b>Objetivo Geral</b>	23
1.4.2	<b>Objetivos Específicos</b>	23
<b>2</b>	<b>PANORAMA ENERGÉTICO</b>	<b>25</b>
2.1	ENERGIA: MUNDO, BRASIL E ESPÍRITO SANTO	25
2.2	A BIOMASSA DE RSU COMO FONTE RENOVÁVEL NA MATRIZ ENERGÉTICA	33
2.3	ENERGIA E POTENCIAL DA BIOMASSA DE RSU NO ESPÍRITO SANTO	41
<b>3</b>	<b>RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)</b>	<b>43</b>
3.1	DEFINIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO	43
3.2	GERAÇÃO DE RESÍDUOS: MUNDO, BRASIL E ESPÍRITO SANTO	47
3.3	COMPOSIÇÃO DOS RSU NO BRASIL	52
<b>4</b>	<b>A GERAÇÃO DE ENERGIA COM O BIOGÁS DE ATERROS SANITÁRIOS</b>	<b>54</b>
4.1	ESTADO DA ARTE SOBRE O APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS	54
4.2	O BIOGÁS DE ATERRO SANITÁRIO	56
4.2.1	<b>Perda de gás na superfície do aterro</b>	59
4.2.2	<b>Composição do biogás de aterro sanitário</b>	62
4.3	RECUPERAÇÃO E CONVERSÃO ENERGÉTICA DO BIOGÁS	63

4.3.1	<b>Alternativas energéticas</b> .....	65
4.3.2	<b>Energia Elétrica</b> .....	68
4.3.3	<b>Energia Veicular (Biometano)</b> .....	70
4.4	<b>TECNOLOGIAS DO BIOGÁS APLICADAS NO ESTUDO</b> .....	73
4.4.1	<b>Motores de Combustão Interna</b> .....	73
4.4.2	<b>Turbinas</b> .....	75
4.4.3	<b>Microturbinas a gás</b> .....	76
4.5	<b>MODELOS TÉCNICOS PARA PREVISÃO DA GERAÇÃO DE GÁS</b> .....	78
4.5.1	<b>Metodologia do Banco Mundial</b> .....	81
4.5.2	<b>Metodologia do IPCC</b> .....	82
4.5.3	<b>Metodologia LandGEM (USEPA)</b> .....	83
4.5.3.1	Descrição do Modelo LandGEM .....	84
4.5.3.2	Potencial de geração de metano: parâmetro L0 .....	87
4.5.3.3	Constante de decaimento: parâmetro k.....	88
4.5.3.4	Resultados do LandGEM em literatura científica.....	89
<b>5</b>	<b>REGULAÇÃO ECONÔMICA DOS SETORES DE SANEAMENTO, ENERGIA ELÉTRICA E GÁS NATURAL</b> .....	<b>95</b>
5.1.	ASPECTOS GERAIS DA REGULAÇÃO .....	95
5.1.1.	<b>Monopólio x Monopólio Natural</b> .....	<b>98</b>
5.2.	PRINCIPAIS MOTIVOS DA REGULAÇÃO .....	100
5.3.	ASPECTOS ECONÔMICOS DA REGULAÇÃO .....	102
5.3.1.	<b>Formas de regulação econômica</b> .....	102
5.3.1.1.	Regulação por preço .....	103
5.3.1.2.	Regulação por quantidade.....	105
5.3.1.3.	Regulação por controle de entrada e saída de firmas do mercado ...	105
5.3.1.4.	Regulação por qualidade.....	105
5.3.2.	<b>Problemas da regulação</b> .....	<b>106</b>
5.3.3.	<b>Possibilidades de resolução dos problemas da regulação</b> .....	<b>109</b>
5.4.	A REGULAÇÃO DE SERVIÇOS PÚBLICOS DE INFRAESTRUTURA APLICADOS NO ESTUDO .....	111
5.5.	A REGULAÇÃO NO SETOR DE SANEAMENTO E OS RSU .....	118

<b>5.5.1 Contexto histórico do setor de saneamento no Brasil .....</b>	<b>120</b>
<b>5.5.2 Regulação dos RSU por meio da Lei nº 11.445/2007 e do Decreto nº 7.217/2010 .....</b>	<b>122</b>
<b>5.5.3 Regulação e gestão de resíduos por meio da Lei nº 12.305/2010... ..</b>	<b>125</b>
<b>5.5.4 Aproveitamento energético dos RSU com base na Lei nº 12.305/2010.....</b>	<b>129</b>
<b>5.5.5 Regulação no Estado do Espírito Santo .....</b>	<b>130</b>
<b>5.6 REGULAÇÃO DO SETOR ELÉTRICO .....</b>	<b>133</b>
<b>5.1.1 Principais mudanças regulatórias do setor elétrico.....</b>	<b>137</b>
5.2.1.1 Ambientes de comercialização de energia elétrica no Brasil.....	140
<b>5.1.2 Comercialização de energias renováveis .....</b>	<b>143</b>
<b>5.1.3 O biogás como fonte de energia elétrica não convencional .....</b>	<b>147</b>
<b>5.1.4 Regulação e aproveitamento do biogás de RSU para geração de energia elétrica .....</b>	<b>150</b>
<b>5.1.5 Comercialização no mercado livre e geração distribuída.....</b>	<b>152</b>
<b>5.1.6 Comercialização por meio de autoprodução e produção independente.....</b>	<b>155</b>
<b>5.1.7 O sistema de compensação de energia elétrica .....</b>	<b>157</b>
<b>5.1.8 O ICMS no sistema de compensação de energia elétrica.....</b>	<b>161</b>
<b>5.2 REGULAÇÃO DO SETOR DE GÁS NATURAL.....</b>	<b>161</b>
<b>5.2.1 Principais mudanças regulatórias do setor de gás natural .....</b>	<b>165</b>
<b>5.2.2 Regulação do biogás e do biometano no Brasil .....</b>	<b>172</b>
<b>5.2.3 Regulação do biogás e do biometano no Espírito Santo.....</b>	<b>176</b>
<b>6 METODOLOGIA.....</b>	<b>179</b>
6.1 APRESENTAÇÃO GERAL .....	179
6.2 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO DA FASE TÉCNICA.....	181
<b>6.2.1 Dados de entrada do modelo matemático.....</b>	<b>185</b>
6.2.1.1 Dados de Entrada 1.....	185
6.2.1.2 Estimativa de coleta municipal de RSU a partir de 2015.....	187
6.2.1.2.1 <i>Projeção populacional</i> .....	187
<b>6.2.2 Geração teórica de biogás .....</b>	<b>190</b>

<b>6.2.3</b>	<b>Conversão de biogás em energia elétrica</b> .....	<b>192</b>
6.3	PROCEDIMENTO METODOLÓGICO DA FASE REGULATÓRIA .....	194
<b>6.3.1</b>	<b>Questionários e entrevistas</b> .....	<b>198</b>
6.4	PREMISSAS E LIMITAÇÕES DA PESQUISA.....	200
<b>7</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>203</b>
7.1	RESULTADOS DA FASE TÉCNICA .....	203
7.1.1	Estimativa de geração de metano até 2015.....	203
7.1.2	Estimativa de geração de metano a partir do ano 2015 .....	206
7.1.3	Elaboração de cenário com média ponderada de k e L0 .....	208
7.1.3.1	Vazão de metano em m <sup>3</sup> /h .....	208
7.1.3.2	Geração de energia elétrica .....	210
7.1.3.3	Gerações regionais de metano e energia elétrica .....	213
7.2	RESULTADOS DA FASE REGULATÓRIA .....	216
7.2.1	Viabilidade regulatória de comercialização do biogás de RSU... ..	219
7.2.1.1	Aproveitamento do biogás de RSU para geração de energia elétrica.....	220
7.2.1.2	Possibilidades de comercialização de energia elétrica no Espírito Santo.....	226
7.2.1.3	Aproveitamento do biogás de RSU como gás natural.....	228
7.2.1.4	Possibilidades de comercialização de gás no Espírito Santo .....	232
<b>8</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b> .....	<b>233</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>239</b>
	<b>APÊNDICE A</b> .....	<b>263</b>
	<b>APÊNDICE B</b> .....	<b>264</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 INTRODUÇÃO AO TEMA DA PESQUISA

O Brasil caracteriza-se por apresentar uma matriz energética “limpa” e com capacidade natural para a produção de energia a partir de fontes renováveis não convencionais, como a biomassa de resíduos. A utilização de tais fontes envolve dois objetivos estratégicos principais: incentivar a busca de soluções “limpas” e sustentáveis e diminuir os custos de produção de energia (POTTMAIER et al., 2013; GUERRA et al., 2015). Nesse aspecto, o aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos (RSU) apresenta-se como uma importante opção para diversificar a matriz energética brasileira (BLEY JR., 2015; PECORA, 2006), além de contribuir para a redução dos impactos ambientais causados pelos RSU (SALOMON; LORA, 2009), o que conferia a estes a caracterização como passivo ambiental.

A utilização do biogás de aterros sanitários teve ampla notoriedade com a aprovação do Protocolo de Quioto, em 1997, e, posteriormente, em 2005, quando passou a vigorar sua ratificação. Nesse período, havia uma expectativa otimista em relação ao mercado de créditos de carbono, o que impulsionou o surgimento de projetos que visavam reduzir emissões de gases de efeito estufa. No Brasil, conforme apontado por Veiga (2016), essa ideia estava associada a duas questões principais: a primeira vinculava-se à possibilidade de alavancar o desenvolvimento das fontes renováveis e não convencionais, especialmente para a geração de eletricidade; a segunda relacionava-se ao fato de existir um enorme potencial inexplorado do metano (CH<sub>4</sub>) oriundo de RSU dispostos em aterros, devido à deficiente gestão desses resíduos por parte dos municípios brasileiros. Assim, a instalação desses projetos representava a obtenção de receita adicional por parte dos prestadores do serviço de limpeza urbana e destinação final desses resíduos, além do atendimento às exigências ambientais. No entanto, esse mercado modificou-se significativamente a partir de 2009, como resultado da diminuição do preço das reduções certificadas de emissão.

Por conseguinte, em 2010, a aprovação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) representou um importante marco regulatório para o setor de saneamento

no Brasil, uma vez que simbolizou um significativo avanço para a dimensão sanitária e a gestão dos resíduos no País. Embora o Brasil ainda enfrente dificuldades relativas ao saneamento básico, tais como ausência de universalização do acesso aos serviços, ampliação e manutenção dos sistemas existentes, escassez de recursos (WILKEN, 2017), eliminação de vazadouros (“lixões”), entre outras, a PNRS contribuiu para ressignificar a antiga visão dos RSU como passivo ambiental, pois os inseriu numa hierarquia de valorização, o que incluiu também estratégias de aproveitamento energético. Dessa forma, o biogás retorna ao cenário como um ativo energético e passa a ser visto como um combustível utilizável na oferta de energia e matéria-prima para produção do biometano, um combustível gerado a partir da purificação do biogás, considerado como fonte renovável de energia (CENTRO INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS–BIOGÁS – CIBiogás, 2016).

A inserção desse potencial energético no planejamento nacional por meio da Nota Técnica DEA 13/14 da Empresa de Pesquisa Energética – EPE (2014d) foi o marco para a introdução efetiva de biogás e biometano no Brasil. Essa Nota indica que, em decorrência da limitação atual da oferta energética, a tendência é o crescimento da participação descentralizada de energia, que inclui o biogás. Em relação ao gás natural, conforme Nota Técnica citada anteriormente, a expansão das redes de gás, além do aumento do rigor da legislação de forma geral, indica a estrutura de um cenário que considera um maior aproveitamento energético de resíduos orgânicos, principalmente gasosos.

Nesse cenário, o biogás se destaca por ser um recurso energético amplamente flexível no uso, pois pode ser convertido em eletricidade, injetado na rede de gás<sup>1</sup> após tratamento, ou usado como combustível. Além disso, também pode ser produzido a partir de vários tipos de resíduos (rurais, industriais, urbanos e outros), além daqueles resíduos urbanos, objeto deste estudo (OLIVEIRA; HENRIQUES; PEREIRA JR., 2010; GE et al., 2014).

Essa versatilidade na aplicação do biogás indica um grau de descentralização na produção e uso de combustíveis vantajosos, além de ser fator de inovação no setor energético brasileiro. Prova disso é que, nos últimos cinco anos, onze unidades

---

<sup>1</sup> A injeção na rede de gás ainda está limitada aos resíduos agrossilvopastoris (AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS, 2015).

termelétricas que utilizam RSU entraram em operação no Brasil. De acordo com o Banco de Informações Gerenciais (BIG) da Agência Nacional de Energia Elétrica – Aneel (2016c), as usinas termelétricas (UTES) que utilizam a biomassa de resíduos para produzir energia somam um total de quinze, no País, com capacidade para gerar 113.246kW, o que representa uma média de 7,5MW por usina. Essas variadas formas de utilização da energia a partir do biogás de RSU já apresentam tecnologias consolidadas, embora ainda pouco empregadas de fato no Brasil e ainda ausentes no Espírito Santo.

No caso do Espírito Santo, em que a matriz energética é extremamente fóssil e dependente dos setores de petróleo, gás natural e carvão mineral, o desenvolvimento da indústria de fontes renováveis de energia é uma oportunidade de estímulo a investimentos locais (CAMPOS, 2016a). Assim, pressupõe-se que o aproveitamento energético do biogás proveniente de aterros sanitários poderá contribuir para a transformação dessa realidade do Estado.

Segundo estudo realizado pela Agência de Serviços Públicos de Energia do Estado do Espírito Santo – ASPE (2013, p. 60), o Estado apresentava, em 2013, uma estimativa de emissão de CH<sub>4</sub> em 20MW. Cabe salientar que esse número representa um potencial não aproveitado, que poderia abastecer 12.518 residências, consumindo 280kWh/mês.

No entanto, segundo a Empresa de Pesquisa Energética (2014b), o aproveitamento energético do biogás depende de diversos fatores, como, por exemplo, viabilidade de um mercado de energia, análises de custos dos projetos e de fontes de receita, além de determinadas considerações técnicas e regulatórias. Estas duas últimas variáveis têm maior enfoque nesta pesquisa, uma vez que, embora se constatem perspectivas positivas relacionadas ao aproveitamento energético do biogás produzido em aterros sanitários no Brasil, em termos técnicos e principalmente regulatórios, qualquer avanço pode ser limitado, postergado ou até mesmo inviabilizado por questões como escala de potencial energético dos RSU dispostos em aterros, perda de gás, condicionamento da célula, clima local, entre outras, além de ausência de políticas, incentivos, programas governamentais, integração de agentes envolvidos no setor e regulação que limite o uso e a comercialização do biogás de aterros no Brasil.

Soma-se a esses quesitos a ausência de literatura científica que agregue as questões técnicas e regulatórias que permeiam o biogás de RSU no Brasil, inclusive no Espírito Santo, de modo a reunir três áreas importantes, quais sejam: saneamento (RSU), energia elétrica e gás natural, fato que indica a relevância desta pesquisa.

Dessa forma, o presente estudo pretende analisar as variáveis técnicas bem como aquelas sob influência de regulação específica, em âmbito tanto federal como estadual, que envolvem a questão, de modo a identificar o potencial de biogás no Espírito Santo e as barreiras e oportunidades regulatórias que indiquem viabilidade no aproveitamento do biogás de RSU, tanto para geração de energia elétrica como para uso como gás natural. Para tal, coube discorrer sobre a regulação e os setores envolvidos na cadeia produtiva do biogás (saneamento, energia elétrica e gás natural).

## 1.2 JUSTIFICATIVA

O uso energético do biogás, proveniente de exploração agrícola, esgoto doméstico ou aterros sanitários, é uma prática já consolidada em países mais desenvolvidos. Na Europa, a injeção na rede de distribuição de gás natural e uso veicular, por exemplo, vem-se multiplicando (FERREIRA; MARQUES; MALICO, 2012).

No Brasil, o setor de saneamento encontra-se atrasado não somente em relação a cobertura e tratamento, mas também a qualidade dos serviços prestados. Assim como a eficiência dos sistemas, o consumo energético no setor também apresenta variadas oportunidades de melhoria. Nesse cenário, o desafio não é somente universalizar o serviço, mas realizá-lo com qualidade. Nesse aspecto, o uso energético de biogás e biometano representa mais qualidade na prestação dos serviços sanitários e maior eficiência energética, até mesmo porque o desperdício desse energético representa não somente uma prática pouco sustentável, como também a perda de possíveis receitas e redução de custos (VALENTE, 2015).

Do ponto de vista da formulação de implantação de políticas públicas, Veiga (2016) comenta que a promoção do uso energético de biogás e biometano no Brasil foi



colocada para a sociedade de forma otimista, tanto pela perspectiva de ações direcionadas à mitigação de mudanças climáticas, passando pela gestão e uso da energia, como pela perspectiva sanitária. Esta última tem como pano de fundo uma apropriação da experiência internacional relativa a iniciativas e resultados positivos obtidos com o uso desse recurso.

Assim, embora se tenham constatado algumas experiências associadas ao uso energético do biogás de aterros sanitários no Brasil, percebe-se ausência de aproveitamento dessa fonte no Espírito Santo. Por isso, verifica-se a necessidade de verificação do potencial de geração de biogás de RSU e energia elétrica provenientes dos aterros sanitários no Espírito Santo. Quanto à questão regulatória, nota-se a ocorrência de um arcabouço recente, que influencia diretamente no aproveitamento energético dessa fonte tanto no Brasil, de modo geral, como no Espírito Santo. São questões regulatórias que reúnem variáveis prévias a qualquer decisão de investimento, as quais, inclusive, são precedentes às variáveis econômicas e têm grande relevância, porque podem, inclusive, inviabilizar a utilização desse recurso energético. Como exemplo, tem-se, para o caso de injeção de biometano na rede de gás natural, a dificuldade de padronização do biogás e, conseqüentemente, a aplicação de seu uso apenas em caráter experimental, conforme Resolução ANP nº 21/2016.

Diante desse contexto, torna-se oportuno investigar sobre o uso energético do biogás de aterro sanitário, sobretudo analisar as variáveis técnicas e regulatórias que abrangem esse recurso no Brasil, com o objetivo de indicar viabilidade no aproveitamento dessa fonte no Espírito Santo.

### 1.3 ESTRUTURA CAPITULAR

Este estudo está organizado em oito capítulos, a saber: o Capítulo 1 apresenta a introdução ao tema da pesquisa, a justificativa, bem como a estrutura capitular e os objetivos; o Capítulo 2 traça um breve panorama energético que contextualiza a energia proveniente da biomassa de RSU como fonte renovável; o Capítulo 3 compreende uma revisão bibliográfica sobre os RSU de modo a embasar o início deste estudo; o Capítulo 4 discorre sobre a geração de energia com o biogás de

aterros sanitários, de forma a contribuir para o estudo técnico desse energético; o Capítulo 5 inclui a revisão bibliográfica sobre as bases regulatórias que sustentam as argumentações de aproveitamento do biogás de RSU para a geração de energia elétrica e sua utilização como gás natural; o Capítulo 6 apresenta a metodologia proposta, dividida em duas fases, a técnica e a regulatória, com as quais se pretende chegar aos objetivos estipulados. Por sua vez, o Capítulo 7 aborda os resultados e discussões deste estudo, os quais correspondem às análises de possibilidades regulatórias de comercialização energética de biogás (nacional e nas macrorregiões do Espírito Santo). Por fim, o Capítulo 8 traz as conclusões e sugestões para estudos futuros.

## 1.4 OBJETIVOS

### 1.4.1 Objetivo Geral

Apresentar as principais questões (projeções de geração e regulatórias) referentes ao aproveitamento energético do biogás gerado no Espírito Santo a partir da disposição final dos RSU em aterros sanitários, levando-se em consideração as intervenções propostas no Programa *Espírito Santo sem Lixão*.

### 1.4.2 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral supramencionado são adotados os seguintes objetivos específicos:

- estimar o potencial espírito-santense de geração de biogás de RSU encontrados em aterros sanitários, empregando modelo LandGEM;
- estimar o potencial espírito-santense de geração de energia elétrica a partir de biogás para os RSU dispostos em aterros sanitários;

- analisar a viabilidade regulatória espírito-santense para aproveitamento energético do biogás proveniente de aterros sanitários, tanto para geração de energia elétrica como para uso como gás natural.

## 2 PANORAMA ENERGÉTICO

Este capítulo aborda conceitos básicos a respeito da energia, tendo como base as matrizes energética e elétrica. Na sequência, apresentam-se a definição e a classificação da biomassa, inclusive sua importância como fonte de energia renovável. Neste cenário, destaca-se a biomassa de RSU, especialmente sua fração orgânica necessária para geração de biogás, objeto de estudo desta pesquisa. Dentro desse contexto, o biogás de RSU foi destacado como fonte de energia renovável não convencional. O texto procurou também contextualizar brevemente a geração de energia elétrica a partir da biomassa no mundo, apresentando também aplicações práticas, tecnologias, usinas no Brasil e um breve resumo sobre esse recurso no Espírito Santo. A revisão de literatura apresentada neste e nos capítulos subsequentes tem como função dar suporte à compreensão do tema estudado neste trabalho. Tal conhecimento torna-se fundamental para embasar as análises relativas ao aproveitamento do biogás realizadas mais adiante, nos Capítulos 7 e 8.

### 2.1 ENERGIA: MUNDO, BRASIL E ESPÍRITO SANTO

O uso da energia passou por transformações significativas até chegar ao estágio atual. O que norteou essas mudanças foi basicamente a capacidade de transformação e utilização da energia de forma sistemática. Com a Revolução Industrial, descobriram-se os benefícios da produção em série e a massificação do consumo de bens. A energia foi extremamente necessária para consolidar esse modelo de desenvolvimento (CARAPETO; ALVES; CAEIRO, 1998; CAMPOS, 2016a).

De forma geral, os modelos de crescimento têm a energia como ferramenta estruturante, viabilizadora e propulsora do futuro. A diversidade de fontes energéticas empregadas para sustentar o modelo é denominada matriz energética (POTTMAIER et al., 2013; KILEBER; PARENTE, 2015).

No contexto energético, devido à diversidade de fontes, costuma-se confundir a ideia de fonte renovável com fonte alternativa. Embora essas terminologias sejam

adotadas como sinônimos, apresentam diferenças importantes. Assim, cabe estabelecer brevemente alguns conceitos para apontar pontos que as distinguem.

A energia, para ser conceituada como renovável, deve ser procedente de fontes naturais cuja capacidade de regeneração, no curto e médio prazo, seja constante. Do contrário, não são renováveis. Campos e Moraes (2012) afirmam que as fontes renováveis são aquelas que não sofrem alterações perceptíveis (mensuráveis) com a contínua utilização humana, tais como a energia hidráulica, a eólica, a solar e as biomassas (cultivadas ou manejadas).

As fontes energéticas ainda podem ser consideradas como convencionais ou alternativas. Para Campos e Moraes (2012), a definição de fonte convencional depende do contexto (local, regional, continental ou mundial) no qual está inserida. Todavia, pode-se afirmar que são aquelas utilizadas pela sociedade e inseridas numa estrutura técnica e econômica. Como exemplo de fontes convencionais e não renováveis podem-se mencionar o carvão, o petróleo e o gás natural (de natureza fóssil). No caso da hidroeletricidade, apesar de ser uma fonte renovável, é considerada como convencional no Brasil e em diversos países por ser utilizada em larga escala.

As fontes alternativas são assim denominadas porque podem ser adotadas em substituição a uma fonte convencional. Além disso, a utilização delas no mercado costuma ocorrer em pequena escala e requer uma logística de distribuição mais adequada à geração elétrica de forma descentralizada. Assim, o uso das fontes alternativas se dá de forma complementar ao das convencionais, uma vez que também são intermitentes e têm pequena participação na matriz energética (CAMPOS; MORAES, 2012). Dentro desse contexto, o biogás de RSU é um exemplo de fonte alternativa de energia renovável e não convencional.

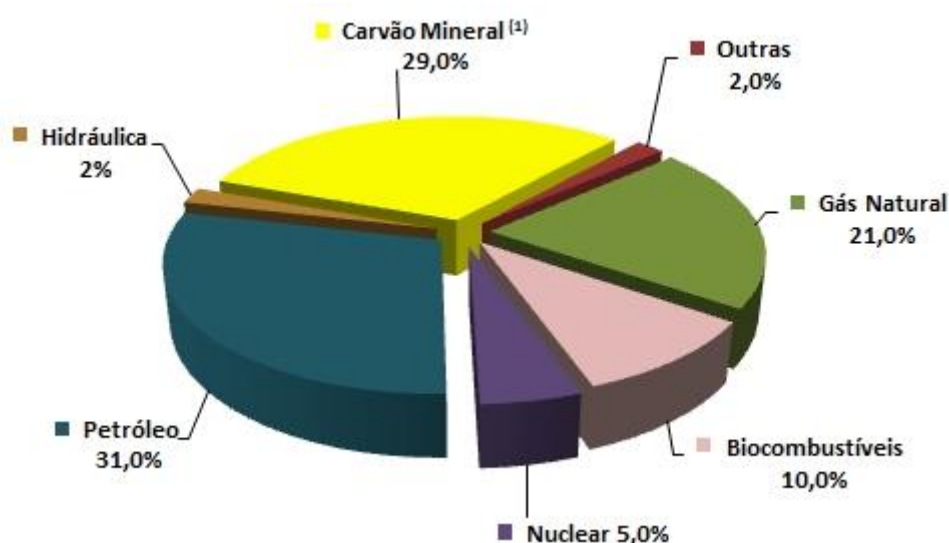
Por sua vez, a matriz energética pode ser conceituada como toda energia que é disponibilizada para ser transformada, distribuída e consumida nos diversos processos produtivos. Consiste, portanto, numa representação quantitativa da oferta de energia, mais especificamente da quantidade de recursos energéticos oferecidos por um país (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2008).

O resultado quantitativo relativo à oferta e ao consumo de energia é apresentado nos balanços energéticos, que envolvem as atividades e operações ligadas à

exploração e produção de recursos energéticos primários, à conversão em formas secundárias, às contas de importação e exportação, à distribuição e ao uso final de energia (CAMPOS, 2016a). Como exemplo, o Brasil dispõe de um Balanço Energético Nacional, e cada estado também tem o seu Balanço correspondente. No Espírito Santo tem-se o Balanço Energético do estado do Espírito Santo. Ambos, o nacional e o estadual, são documentos fundamentais para as atividades de planejamento e acompanhamento do setor energético. De forma mais ampla, para nortear ações de planejamento do setor energético é fundamental compreender a matriz energética em cenário mundial.

A oferta de energia no mundo está distribuída por fonte energética, conforme apresentado na Figura 1.

Figura 1 – Oferta interna de energia no mundo



Fonte: International Energy Agency (2016a, tradução nossa).

<sup>(1)</sup> Inclui turfa e xisto betuminoso.

A Figura 1 mostra que a matriz energética mundial é amplamente dependente de combustíveis fósseis, como petróleo, carvão mineral e gás natural, que juntos representam 81% do total das fontes de energia (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2016a). Juntamente com a energia nuclear, constituem-se como fontes energéticas primárias. No entanto, não são renováveis e compreendem reservas limitadas. A energia proveniente das fontes hidrelétricas, embora seja renovável, é encontrada em quantidade limitada e de forma concentrada nos países. Além disso,

de acordo com Agência Nacional de Energia Elétrica (2008), os maiores potenciais hidráulicos remanescentes no Brasil localizam-se em regiões com fortes restrições ambientais e distantes de centros consumidores. Nesse aspecto, o uso de fontes renováveis não convencionais tem sido cada vez mais estimulado.

Nesse contexto, a biomassa de resíduos desempenha um papel importante, pois, além de contribuir para os aspectos ambientais, oferece a possibilidade de produção de energia de forma descentralizada, em locais próximos aos centros consumidores e até mesmo em locais que anteriormente eram desprovidos de energia elétrica. Menciona-se como exemplo um estudo de caso desenvolvido por Pinheiro e outros (2012) em uma comunidade isolada, situada em Santo Antônio, no estado do Pará. A partir do aproveitamento dos recursos naturais existentes na região, como a biomassa de resíduos, constatou-se a possibilidade de implantação de uma pequena usina adequada às condições locais.

Cabe reforçar que o uso de fontes renováveis alternativas também auxilia a reduzir a dependência de combustíveis fósseis, além de prover mais limpeza e segurança das matrizes energéticas. Quanto a isso, para Goldemberg, Coelho e Rei (2002), assim como para Lucon e Goldemberg (2009), a segurança energética desempenha um papel essencial para o desenvolvimento de fontes alternativas de energia. A incerteza relativa às reservas petrolíferas, somada às oscilações do preço do petróleo, bem como questões ambientais e sociais determinam a urgência de se modificarem as bases do desenvolvimento econômico e assim alterar a matriz energética mundial.

Nesse cenário, o Brasil se destaca mundialmente porque dispõe de uma das matrizes energéticas mais privilegiadas do planeta. O País conta com mais de 40% da oferta interna de energia oriunda de fontes renováveis, enquanto a média mundial é de 13,5%. Nos países da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE)<sup>2</sup>, a oferta interna de energia oriunda de fontes renováveis

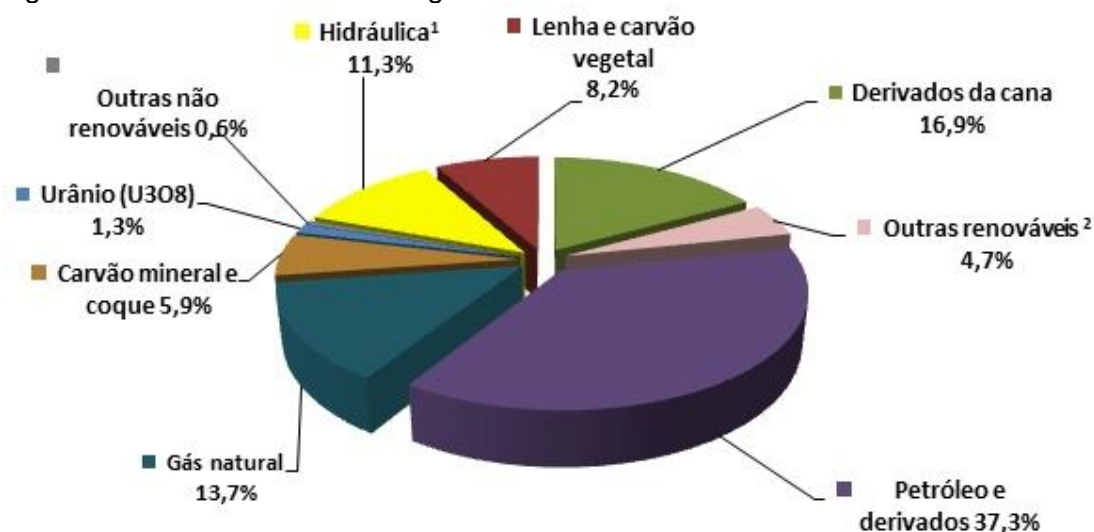
---

<sup>2</sup> Países membros da OCDE: Áustria, Austrália, Alemanha, Bélgica, Chile, Canadá, Coreia, Dinamarca, Estônia, Espanha, Eslovênia, Estados Unidos, Finlândia, França, Grécia, Hungria, Irlanda, Islândia, Israel, Itália, Japão, Letônia, Luxemburgo, México, Nova Zelândia, Noruega, Países Baixos, Polônia, Portugal, Suécia, Suíça, República Eslovaca, República Tcheca, Reino Unido, Turquia (ORGANIZAÇÃO PARA A COOPERAÇÃO E DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO, acesso em 28 out. 2016).

representa apenas 9,4% (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2016d). Por esse motivo, pode-se considerar que o Brasil tem uma matriz energética “limpa”<sup>3</sup>.

De acordo com as macroaplicações de energia no Brasil, podem-se constatar dois grandes sistemas de energia: o de mobilidade (transporte) de cargas e pessoas e o de fornecimento de energia elétrica para diversos fins. No primeiro sistema predominam os combustíveis líquidos, os derivados de petróleo e uma fração renovável representada pelo etanol e pelo biodiesel, com recente participação do gás natural. No segundo sistema destaca-se a hidroeletricidade. A soma de ambos os sistemas gera o resultado quantitativo da energia geral consumida no País, ou seja, a matriz energética brasileira (KILEBER; PARENTE, 2015; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2016d). Na Figura 2, pode-se observar a composição da matriz energética brasileira, conforme apresentado no Balanço Energético Nacional (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2016d).

Figura 2 – Oferta interna de energia no Brasil



Fonte: Elaborado com base em dados da Empresa de Pesquisa Energética (2016d).

(<sup>1</sup>) Inclui importação de eletricidade.

(<sup>2</sup>) Inclui energia eólica, solar, geotérmica, residual e outras.

De acordo com o Ministério de Minas e Energia (MME), a matriz elétrica do Brasil é considerada um subconjunto da matriz energética e apresenta a oferta interna de

<sup>3</sup> O termo "limpa", quando associado a energia, refere-se às fontes de origem renováveis e não poluentes da atmosfera (FOGAÇA, acesso em 12 jan. 2017).



energia elétrica do ano de 2015 em 581,5TWh. Desse total, a fonte hidráulica corresponde a 64,0% da matriz (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2016d).

Segundo apontado por Silva, Neto e Seifert (2016), a energia hidrelétrica é a espinha dorsal do setor brasileiro de geração de eletricidade. Embora seja uma energia “limpa” em termos de emissões poluentes de gases de efeito estufa, as severas secas dos últimos anos expuseram a fragilidade do País em relação à fonte hídrica. O sistema brasileiro de fornecimento de energia elétrica mostrou-se vulnerável à escassez de eletricidade por essa fonte e tal situação tem levado o Governo Brasileiro a buscar alternativas em outras fontes renováveis a fim superar esse desafio.

Kileber e Parente (2015) afirmam que, apesar de haver diversificação das fontes de energia elétrica no Brasil, o *mix* de eletricidade atual não é necessariamente mais renovável e mais limpo. Para garantir a segurança energética, a termoeletricidade vem suprimindo a hidroeletricidade (em momentos de insuficiência). Com isso, surgem novas preocupações. Se antes os impactos ambientais eram concentrados ao longo de sistemas fluviais, áreas represadas, reservatórios, incluindo fauna e flora e a população ribeirinha, hoje o crescimento da termoeletricidade traz preocupações com a poluição e os gases de efeito estufa.

Neste cenário relativo aos gases de efeito estufa, o País até se destaca com índices de emissão favoráveis. Guerra e outros (2015) inferem que, no ano de 2007, o Brasil já estava em uma posição privilegiada na comparação com outros países em termos de índices internacionais de emissão de gás carbônico equivalente (CO<sub>2</sub>e). Atualmente, 1,5% das emissões de gases de efeito estufa provém do setor elétrico no Brasil, e essa percentagem atinge 24% em nível global. Mesmo com índices favoráveis relativos às emissões de CO<sub>2</sub>e, o planejamento energético brasileiro se preocupa em manter uma matriz mais “limpa” e diversificada com o uso de fontes renováveis de energia. Assim, essa prerrogativa estratégica de planejamento também deve estender-se em nível estadual.

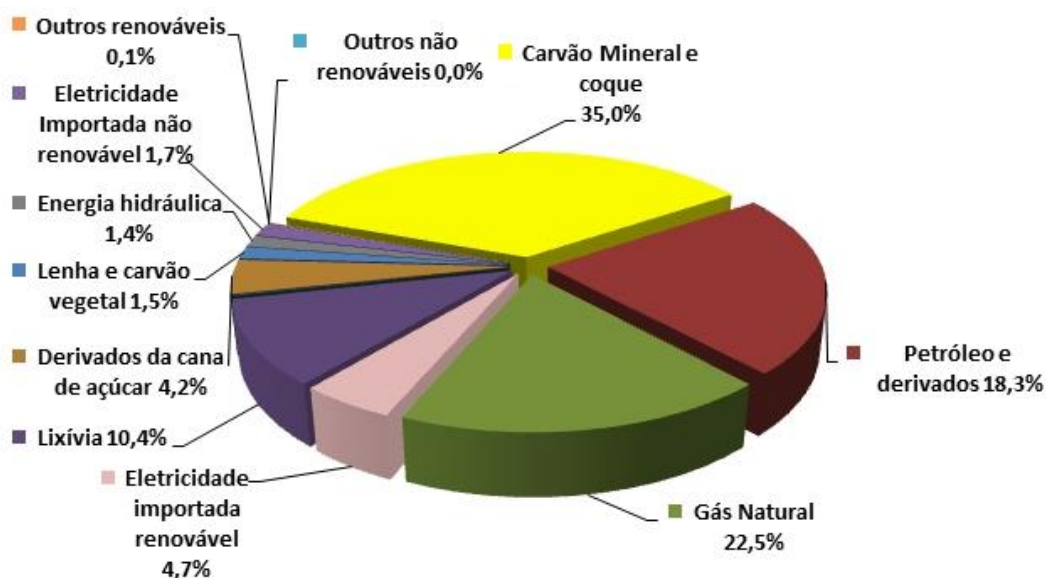
Com relação ao Espírito Santo, a matriz energética estadual apresenta elevada dependência de fontes não renováveis de energia (94%)<sup>4</sup>. O Balanço Energético do

---

<sup>4</sup> Dado disponível no Balanço energético do estado do Espírito Santo de 2016, ano base 2015 (AGÊNCIA DE SERVIÇOS PÚBLICOS DE ENERGIA DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO, 2016).

estado do Espírito Santo, elaborado de acordo com o Balanço Energético Nacional a partir de metodologia recomendada pela EPE, permite uma visualização da oferta interna de energia na região (AGÊNCIA DE SERVIÇOS PÚBLICOS DE ENERGIA DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO, 2016). Na Figura 3, visualiza-se a matriz local.

Figura 3 - Oferta interna bruta de energia no Espírito Santo



Fonte: Agência de Serviços Públicos de Energia do estado do Espírito Santo (2016).

Um estudo sobre as políticas energéticas e climáticas do Espírito Santo realizado por Fiorot (2016) mostrou que ainda existe incoerência entre as estratégias energéticas em níveis federal e estaduais. Segundo o autor, de forma geral, não há estratégia para uma gestão mais sustentável dos recursos no longo prazo. Ao contrário disso, percebe-se que as principais variáveis de decisão do setor estão mais atreladas à parte econômica, associadas a preços de mercado e à disponibilidade de produção, até mesmo porque a exploração dos recursos na região capixaba é realizada principalmente por empresas privadas, o que limita o controle do Estado à imposição de impostos e recebimento de *royalties*. Esse fato, segundo Campos (2016a), justifica a urgente necessidade de políticas públicas que incentivem o crescimento de fontes renováveis de energia, a eficiência energética e a conservação de energia no Espírito Santo.

Nesse sentido, Pottmaier e outros (2013) afirmam que o Brasil vem utilizando duas estratégias relacionadas ao setor energético: a primeira visa manter a matriz “limpa”

e renovável, preservando seu potencial hidráulico; a segunda pretende promover, conservar e utilizar a energia, de forma eficiente, por meio de vários programas governamentais, como o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (Procel), o Programa Nacional de Racionalização do Uso dos Derivados de Petróleo e do Gás Natural (Conpet), o Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE), o Plano Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC) e outros.

Relativo ao Espírito Santo, segundo Campos (2016a), a matriz energética é menos "limpa" se comparada à nacional. Quanto a isso, questões relacionadas aos incentivos a fontes renováveis por meio de políticas públicas foram ampliadas, principalmente com a criação de programas como o Programa Capixaba de Eficiência Energética e Energias Renováveis (ES Energia) e Programa Estadual de Eficiência Energética e de Incentivo ao uso de Energias Renováveis (Proenergia). Soma-se a isso a implementação de legislação que demonstra preocupação com as mudanças climáticas globais<sup>5</sup>, a gestão de resíduos sólidos<sup>6</sup>, entre outras.

Tanto para Guerra e outros (2015) como para Rovere e outros (2010), para cumprir essas estratégias e incentivar a geração de energia "limpa", investimentos direcionados à energia hidrelétrica e a outras fontes renováveis foram intensificados, como, por exemplo, à energia proveniente da biomassa.

Historicamente, a utilização da biomassa como fonte de energia foi essencial para a evolução humana, assim como as práticas para a sua obtenção e uso, que também evoluíram simultaneamente, desde a lenha catada para cocção, proteção e aquecimento, até as modernas práticas de produção silvo-agropecuárias e industriais, de transformação e uso de biocombustíveis para geração de calor, força motriz e eletricidade (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2016b).

Assim, cabe expor a representatividade da biomassa na matriz nacional, em especial a de RSU, por compor o presente estudo.

---

<sup>5</sup> Lei nº 9.531/2010, que institui a Política Estadual de Mudanças Climáticas – PEMC.

<sup>6</sup> Lei nº 9.264/2009, que institui a Política Estadual de Resíduos Sólidos e dá outras providências.

## 2.2 A BIOMASSA DE RSU COMO FONTE RENOVÁVEL NA MATRIZ ENERGÉTICA

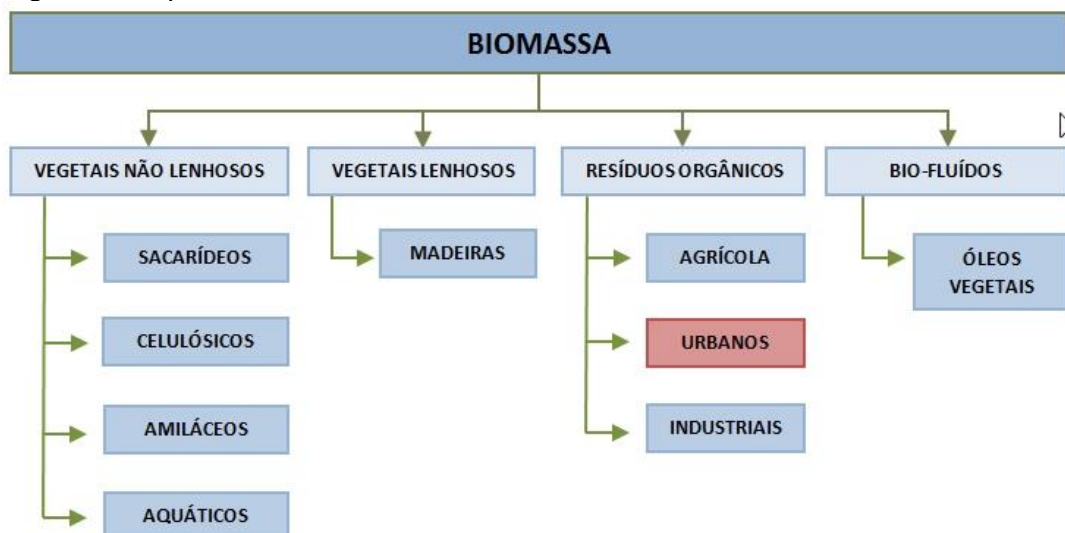
Alguns pesquisadores, como Juárez e outros (2014), Guerra e outros (2015), Sorrell (2015), Shariatzadeh, Mandal e Srivastava (2015), embora apresentem diferentes visões sobre o uso da energia, são unânimes em evidenciar a tendência de crescimento de seu consumo, até mesmo porque a disponibilidade energética traz progresso para a economia e eleva o bem-estar social, sendo, portanto, um insumo indispensável para a humanidade (IDDRISU; BHATTACHARYYA, 2015).

Assim, visando garantir o suprimento da demanda energética, principalmente em grandes centros urbanos, os governos têm buscado diferentes alternativas. Em função disso, a redução da dependência de combustíveis fósseis bem como a manutenção da sustentabilidade tornaram-se objetivo estratégico da maioria das cidades no mundo (PINCETL, 2012; SCHELL; CLARO; FISCHBECK, 2015). Desse modo, a geração de energia a partir de fontes renováveis, em especial da fonte biomassa, tornou-se amplamente difundida (ZHENG; PAN, 2014).

Ao contrário dos recursos energéticos de origem mineral, como o carvão, o petróleo, o gás natural e o urânio, que constituem reservas físicas limitadas, o emprego da biomassa como combustível ocorre devido às diversas atividades urbanas e rurais, como agricultura, pecuária, atividades florestais e industriais (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2016a; FORBES et al., 2016; KILPELAINEN et al., 2016; PINHEIRO et al., 2012; SALOMON; LORA, 2009; CHEN; HO, 2015). Assim, decorrentes dessas atividades, podem-se perceber distintos tipos de biomassa, conforme apresentado na Figura 4.

A variedade dos tipos de biomassa também amplia a diversidade de conceitos. No Quadro 1 apresentam-se alguns dos conceitos encontrados.

Figura 4 – Tipos de biomassa



Fonte: Elaborado com base em dados obtidos em Brasil (2014).

Quadro 1 – Conceitos de biomassa

CONCEITO	FONTE
Biomassa é todo material orgânico oriundo de plantas, que abrange tanto a vegetação na terra (árvores, colheitas) como a vegetação à base de água (algas), bem como todos os resíduos orgânicos.	(CHEN; HO, 2015)
Biomassa é a energia solar recolhida pelas plantas durante o processo de fotossíntese. Esse processo consiste basicamente na captação do dióxido de carbono e na conversão em materiais celulósicos.	(BILGILI; OZTURK, 2015)
Biomassa é todo recurso renovável oriundo de matéria orgânica, de origem animal ou vegetal, que pode ser utilizado para produção de energia.	(CENTRO NACIONAL DE REFERÊNCIA EM BIOMASSA, 2016)
Biomassa é qualquer matéria orgânica que pode ser transformada em energia mecânica, térmica ou elétrica.	(AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2008)

Fonte: Elaboração própria.

Hoogwijk e outros (2003) classificam os resíduos de biomassa em 1) primários, gerados na agricultura e silvicultura; 2) secundários, oriundos de indústrias de alimentos, bebidas, papéis e outros durante o processo produtivo; 3) terciários, resultantes do uso dos resíduos secundários, correspondentes à fração orgânica dos RSU. Assim, como esta pesquisa evidencia os resíduos terciários, no caso os RSU, como fonte de energia, obviamente os assuntos aqui tratados serão relativos àqueles que utilizam esse tipo de biomassa.

Como para este trabalho é adotado o conceito de biomassa utilizado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (2008), a classificação das fontes desse recurso

também será aquela adotada por esse órgão. No Quadro 2 apresenta-se a classificação das fontes de biomassa segundo a Aneel.

Quadro 2 – Classificação das fontes de biomassa segundo a Aneel

ORIGEM	FONTE NÍVEL 1	FONTE NÍVEL 2
<b>BIOMASSA</b>	Agroindustriais	Bagaço de cana-de-açúcar, biogás-AGR, capim-elefante, casca de arroz.
	Florestas	Lixívia, lenha, gás de alto forno, biomassa resíduos florestais, carvão vegetal, biogás - floresta.
	<b>Resíduos sólidos urbanos</b>	<b>Biogás - RSU</b>
	Resíduos animais (RA)	Biogás - RA
	Biocombustíveis líquidos	Etanol, óleos vegetais.

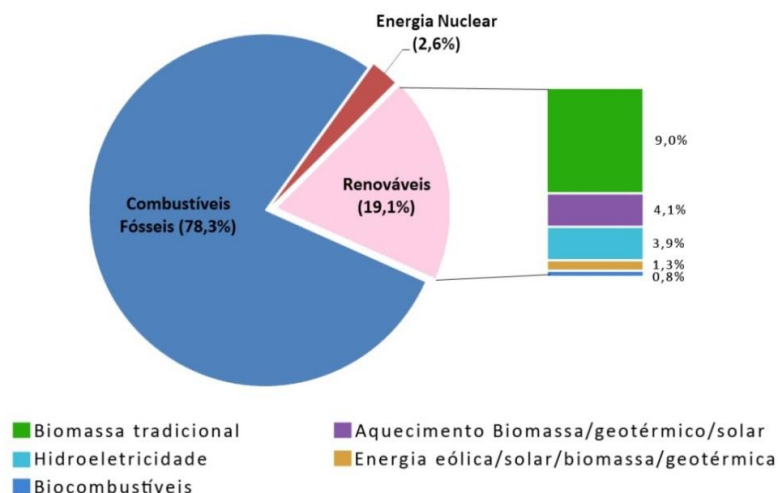
Fonte: Elaborado com base em dados do BIG da Agência Nacional de Energia Elétrica (2016b).

Dentre as fontes apresentadas no Quadro 2, destacou-se, para esta pesquisa, o grupo de RSU, aqui considerado a partir dos rejeitos orgânicos dispostos em aterros sanitários, pela geração de biogás.

Diversos pesquisadores, como Hoogwijk e outros (2003), Faaij (2006), Smeets e outros (2007), Dutra e Szklo (2008), Sikkema e outros (2014), Bilgili e Ozturk (2015), Chen e Ho (2015), Ahmed, Uddin e Sohag (2016), Forbes e outros (2016), confirmam que a energia da biomassa, pelo fato de ser renovável, tem sido aceita como uma fonte alternativa de energia promotora do crescimento e do desenvolvimento sustentável em todo o mundo.

Nesse aspecto, a intensificação no desenvolvimento e implementação de fontes alternativas de energia provocou uma alteração na matriz energética mundial, que passou a inserir de maneira mais significativa as fontes renováveis. No ano de 2013, as fontes renováveis correspondiam a 19,1% do consumo final de energia mundial, dos quais a biomassa tradicional representou 9% e os biocombustíveis representaram 0,8%, conforme apresentado na Figura 5.

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



Fonte: Elaborado com base em dados de Veiga (2016).

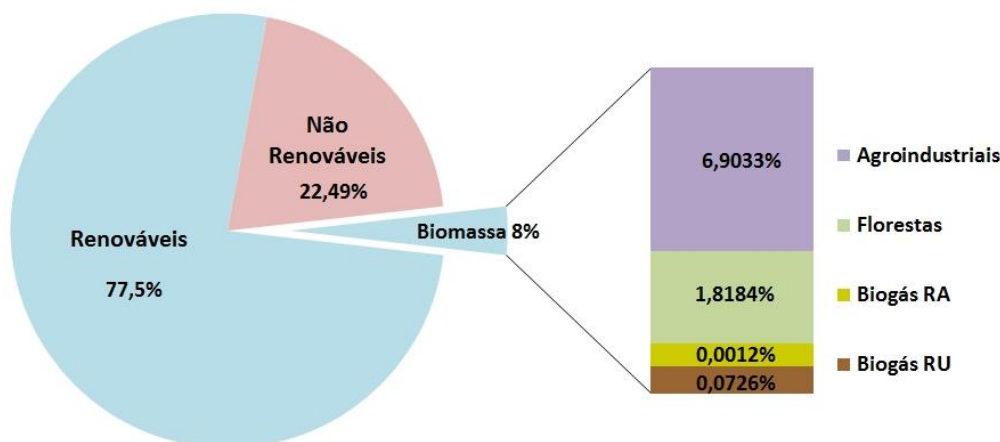
Faij (2006) afirma que a biomassa é uma das fontes de energia renovável capaz de oferecer uma grande contribuição para o abastecimento de energia mundial. Embora o real papel da bioenergia dependa de competitividade com os combustíveis fósseis e fatores políticos em todo o mundo, espera-se que sua contribuição evolua cada vez mais neste século XXI. Para Lebre e outros (2010), do ponto de vista socioeconômico, a exploração de fontes renováveis de energia tem o objetivo de fazer o melhor uso da energia local, utilizando as principais características da região.

Para Oliveira, Henriques e Pereira Jr. (2010), assim como para Ge e outros (2014), a abundância de biomassa em ambientes favoráveis, como o Brasil, torna essa fonte renovável extremamente promissora. De acordo com o Balanço Energético Nacional (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2016d), considerando-se como referência a energia elétrica no Brasil, cuja base sustenta o modelo de crescimento atual, o indicador de fontes renováveis do País é bem elevado, correspondente a 75,5% da oferta interna de eletricidade. Desse total, a biomassa é responsável por cerca de 8% da energia elétrica nacional e, de acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (2016b), vem apresentando grande potencial prospectivo<sup>7</sup>. Neste

<sup>7</sup> O cálculo de sua oferta potencial relacionado à geração centralizada (modelo convencional de produção de energia a partir de grandes centrais) pode atingir 380TWh, o que representa 51.000 MW de capacidade. Na forma de geração distribuída (produção de energia por meio de pequenas centrais situadas junto ou próximas dos consumidores) a capacidade pode chegar a 67 TWh, o que significa 9.000MW de capacidade (com fator de capacidade de 85%) até o ano de 2050 (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2016b).

trabalho, evidenciou-se a biomassa de RSU, que, uma vez disposta em aterros, se torna geradora do biogás, como um combustível amplamente versátil para fins energéticos. Na Figura 6 destaca-se a representatividade da biomassa na matriz elétrica brasileira, da qual o biogás de RSU é responsável por 0,0726%.

Figura 6 – Proporção da biomassa na matriz elétrica brasileira



Fonte: Elaboração própria com base em dados do BIG da Agência Nacional de Energia Elétrica (2016b).

Nota: RU (resíduos urbanos); RA (resíduos agroindustriais).

De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (2016a), a principal biomassa empregada para geração elétrica no Brasil é o bagaço de cana. Pode-se notar a grande proporção desse item na matriz elétrica (6,90%)<sup>8</sup> ilustrada na Figura 6.

No caso do biogás, Bley Jr. (2015) aponta que os setores de produção de alimentos e sucoalcooleiro juntos apresentam um potencial de produção de mais de 20 bilhões de m<sup>3</sup>/ano de biogás. Nesse campo, a Associação Brasileira de Biogás e de Biometano (2015) realizou um estudo para levantar a estimativa do potencial energético de biogás e biometano no Brasil, cujo resultado foi de 23 bilhões de m<sup>3</sup>/ano. Desse total, 12 bilhões de m<sup>3</sup>/ano provêm de cana-de-açúcar, 8 bilhões de m<sup>3</sup>/ano, de alimentos, e 3 bilhões de m<sup>3</sup>/ano, de resíduos. Esse montante equivale a aproximadamente 11 milhões de tep<sup>9</sup>, ou 12 bilhões de litros equivalentes de diesel

<sup>8</sup> A quantidade de energia elétrica gerada com a utilização de outras fontes de biomassa agroindustriais é menos representativa. Verificar na Tabela 1 a casca de arroz (0,0290%) e o capim elefante (0,0421%) como exemplo.

<sup>9</sup> Tonelada equivalente de petróleo.



ao ano (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE BIOGÁS E DE BIOMETANO, 2015). Godoi (2016) acrescenta que esse potencial estimado de biogás poderia suprir 12% da matriz energética do Brasil, o que representa a produção de 37 milhões de MWh. Nesse aspecto, a biomassa é considerada "[...] uma fonte renovável de energia que pode ser produzida em escala suficiente para desempenhar um papel expressivo na matriz energética nacional" (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2016b, p. 209).

Em 2016, o biogás proveniente da biomassa de RSU foi aproveitado por um total de quinze UTEs, com capacidade instalada de 113.246kW. Nesse setor, a produção de energia em usinas agroindustriais com o bagaço da cana liderou em quantidade, com 395 plantas e potência instalada de 10.756.760kW (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2016d). A Tabela 1 aponta a capacidade instalada de energia elétrica no Brasil, com evidência nas UTEs por tipo de fonte.

Apesar de o biogás de RSU apresentar-se com uma pequena parte do total de produção de energia elétrica (0,0726%), atualmente representa uma importante fonte para diversificar a matriz energética brasileira. Embora ainda incipiente, esse potencial tem crescido<sup>10</sup> cada vez mais, principalmente pela importância da bioenergia na matriz energética nacional. Além disso, Salomon e Lora (2009) reforçam que a recuperação do biogás de RSU, além de prover o aumento da geração de energia, também reduz impactos ambientais e contribui para melhorar as condições do sistema de saneamento como um todo no País.

Nesse aspecto, alguns empreendimentos no Brasil apresentam-se como uma opção viável e confirmam ganhos econômicos e ambientais associados à visão de sustentabilidade e valorização dos resíduos. Até o final de 2016, das quinze UTEs presentes na Tabela 1, sete estão localizadas no estado de São Paulo, quatro em Minas Gerais e as demais, na Bahia, no Rio Grande do Sul, em Santa Catarina e no Paraná. A maior parte dessas usinas começou a operar recentemente. Só nos últimos cinco anos onze unidades entraram em operação.

---

<sup>10</sup> Ao se considerar uma produção de 141.700 toneladas por dia de RSU e uma taxa de 50Nm<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub> por tonelada de RSU enviados para aterros sanitários regulamentados, é possível estimar que o Brasil tenha um potencial de cerca de 660MW de energia elétrica, com 30% de eficiência na conversão de energia (LEME et al., 2014).

Tabela 1 – Usinas termelétricas por tipo

Tipo			Usinas Termelétricas <sup>1</sup>			
			n° Usinas	Capacidade Instalada (KW) <sup>2</sup>	%	
Origem	Fonte Nível 1	Fonte Nível 2				
Biomassa	Agroindustriais	Bagaço de cana-de-açúcar	395	10.756.760	6,9033%	
		Biogás - AGR	3	1.822	0,0011%	
		Capim-elefante	3	65.700	0,0421%	
		Casca de arroz	12	45.333	0,0290%	
	Biocombustíveis Líquidos	Óleos vegetais	2	4.350	0,0027%	
		Carvão vegetal	8	54.097	0,0347%	
	Florestas	Gás de alto forno - Biomassa	10	114.265	0,0733%	
		Lenha	2	14.650	0,0094%	
		Licor negro	17	2.261.136	1,4511%	
		Resíduos florestais	51	389.525	0,2499%	
		Resíduos Animais	Biogás - RA	10	1.924	0,0012%
		<b>Resíduos Sólidos Urbanos</b>	<b>Biogás - RU</b>	<b>15</b>	<b>113.246</b>	<b>0,0726%</b>
	Fóssil	Carvão Mineral	Calor de processo - CM	1	24.400	0,0156%
Carvão mineral			13	3.389.465	2,1752%	
Gás de alto forno - CM			9	199.130	0,1277%	
Gás Natural		Calor de processo - GN	1	40.000	0,0256%	
		Gás natural	152	12.998.611	8,3420%	
Outros Fósseis		Calor de processo - OF	1	147.300	0,0945%	
		Gás de refinaria	7	339.960	0,2181%	
		Óleo combustível	40	4.055.973	2,6029%	
		Óleo diesel	2.149	4.672.803	2,9988%	
		Outros energéticos do petróleo	17	955.928	0,6134%	
Hídrica	Potencial Hidráulico	Potencial hidráulico	1224	95.622.078	61,366%	
Nuclear	Urânio	Urânio	2	1.990.000	1,2771%	
Solar	Radiação Solar	Radiação solar	40	22.962	0,0147%	
Eólica	Cinética do Vento	Cinética do vento	384	9.368.830	6,0125%	
<b>Importação</b>				8.170.000	5,2455%	
<b>Total</b>			<b>4568</b>	<b>155.820.248</b>	<b>100,0%</b>	

Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica (2016d).

Na Tabela 2, apresentam-se as usinas mencionadas, organizadas em ordem crescente por potência instalada.

Tabela 2 – Usinas termelétricas operando com biogás de RSU no Brasil

<b>Usina</b>	<b>Proprietário</b>	<b>Local</b>	<b>Ano de Operação</b>	<b>Potência (kW)</b>	<b>Destino</b>
São João Biogás	São João Energia Ambiental S.A.	São Paulo - SP	2008	24.640	PIE
Termoverde Caieiras	Termoverde Caieiras Ltda.	Caieiras - SP	2016	29.547	PIE
Termoverde	Termoverde Salvador S.A.	Salvador - BA	2010	19.730	PIE
Biotérmica Recreio	Biotérmica Energia S.A.	Minas do Leão - RS	2015	8.556	PIE
Guatapará	Guatapará Energia S.A.	Guatapará - SP	2014	5.704	PIE
Bandeirantes	Biogás Energia Ambiental S.A.	São Paulo - SP	2014	4.624	REG
Asja BH	Consórcio Horizonte Asja	Belo Horizonte - MG	2010	4.278	REG
CTR Juiz de Fora	Valorgás - Energia e Biogás Ltda.	Juiz de Fora - MG	2013	4.278	REG
Curitiba Energia	Curitiba Energia SPE Ltda.	Fazenda Rio Grande - PR	2016	4.278	REG
Tecipar	Tecipar Engenharia e Meio Ambiente Ltda.	Santana - SP	2015	4.278	REG
Uberlândia	Energás Geração de Energia Ltda.	Uberlândia - MG	2011	2.852	REG
Arrudas	Companhia de Saneamento de Minas Gerais	Belo Horizonte - MG	2011	2.400	REG
Ambient	Ambient Serviços Ambientais de Ribeirão Preto S.A.	Ribeirão Preto - SP	2011	1.500	REG
Itajaí Biogás	Itajaí Biogás e Energia S.A.	Itajaí - SC	2013	1.065	REG
Energ-Biog	Biomass Users Network do Brasil	Barueri - SP	2002	30	REG

Fonte: Elaboração própria com base em dados do BIG da Agência Nacional de Energia Elétrica (2016c).

Nota: PIE (Produtor Independente de Energia); REG (Usinas Sujeitas a Registro).

Conforme pode ser percebido na Tabela 2, das UTEs atuais cadastradas no BIG da Aneel, 66,66% estão como REG, reunindo um total de dez usinas nesta categoria. De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (2016b), a divisão REG indica que são usinas sujeitas a registro, com capacidade reduzida de produção, ou seja, até 1MW para hidráulicas e até 5MW para as demais fontes, incluindo o biogás de RSU. Assim, a usina pode gerar energia para consumo próprio ou para vender no mercado livre, conforme seu interesse e possibilidade. O percentual de 33,33% restante corresponde à categoria PIE, que representa um total de cinco

empreendimentos cadastrados. Nessa divisão, a pessoa jurídica ou um conjunto de empresas reunidas em consórcio recebem concessão ou autorização do poder concedente para produzir energia elétrica destinada ao comércio de toda a energia produzida, ou parte dela, por sua conta e risco.

Os benefícios desse processo vão muito além do aspecto de tratamento adequado dos resíduos, uma vez que eles se tornam matéria-prima para as usinas termoelétricas (ZGLOBISZ et al., 2010). Assim aplicados, é possível obter ganhos econômicos, ambientais e sociais, até mesmo porque, na visão de Piechota, Ski e Buczkowski (2013), os preços ainda elevados e os recursos limitados de combustíveis fósseis tornam a utilização do biogás uma boa maneira de produzir energia verde, barata e “limpa”

Dessa forma, o estudo atual contempla dois tipos de aplicações para o biogás de RSU: geração de energia elétrica e combustível (gás natural veicular – GNV). Assim, embora o viés econômico também seja importante, busca-se enfatizar mais adiante as questões técnicas e regulatórias que envolvem o setor. Optou-se por essa forma porque, mesmo quando há viabilidade econômica de um empreendimento do tipo, tanto o viés técnico quanto o viés regulatório podem inviabilizar o negócio, portanto são imprescindíveis nas decisões de investimento.

Com relação à biomassa no estado do Espírito Santo, em sequência, apresenta-se brevemente o potencial dessa fonte, com destaque para a biomassa de RSU.

### 2.3 ENERGIA E POTENCIAL DA BIOMASSA DE RSU NO ESPÍRITO SANTO

Com o intuito de incentivar a utilização da biomassa para fins energéticos, a Aspe<sup>11</sup> elaborou, no ano de 2013, o Atlas de Bioenergia do Espírito Santo, que aponta os recursos mais importantes para reaproveitamento energético da biomassa local. Segundo a Aspe, o potencial de toda essa biomassa foi calculado e estimado em 540MW. Existem alguns exemplos de sucesso dessa atividade no Espírito Santo,

---

<sup>11</sup> Conforme a Lei Complementar nº 827/2016, a Aspe agora é Agência de Regulação de Serviços Públicos do Espírito Santo (ARSP), responsável por regular e fiscalizar tanto os serviços de energia elétrica e gás natural como os de abastecimento, esgotamento sanitário e infraestrutura viária.

encontrados em pequenas centrais onde o biogás é produzido por meio do tratamento de dejetos de animais das fazendas. Os dejetos são utilizados para gerar energia elétrica e aquecer as granjas.

Na Tabela 3 são apresentados os resultados dessa pesquisa sobre o potencial da biomassa no estado do Espírito Santo.

Tabela 3 - Energia e potencial por tipo de biomassa no Espírito Santo (2001 a 2010)

<b>Tipo de Biomassa</b>	<b>Quantidade produzida em [toneladas]</b>	<b>Energia por tipo de biomassa em [MWh]</b>	<b>Potencial por tipo de biomassa em [MWh]</b>	<b>Energia por tipo de biomassa em %</b>	<b>Potencial por tipo de biomassa em %</b>
Lavoura temporária	4.312.179	139.827	24	3,20%	4,40%
Lavoura permanente	854.202	110.941	13,1	2,60%	2,40%
Silviculturas	1.851.203	755.922	90,8	17,40%	16,80%
Efluentes animais * (cabeças)	17.604.726	3.104.371	373	71,50%	69,10%
Efluentes domésticos e comerciais (habitantes)	3.392.775	64.310	18,5	1,50%	3,40%
<b>RSU** (habitantes)</b>	<b>3.392.775</b>	<b>168.237</b>	<b>20,2</b>	<b>3,90%</b>	<b>3,70%</b>
<b>Biomassa total</b>		<b>4.343.608</b>	<b>539,7</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>

Fonte: Agência de Serviços Públicos de Energia do Estado do Espírito Santo (2013).

Nota: Dados adaptados pela autora.

(\*) Dados do IBGE 2000 a 2009; (\*\*) Resíduos Sólidos Urbanos.

De acordo com dados da ASPE, “[...] o Espírito Santo possui uma estimativa de emissão de CH<sub>4</sub> em 20MW” (AGÊNCIA DE SERVIÇOS PÚBLICOS DE ENERGIA DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO, 2013, p. 60). As regiões com o maior potencial de biogás proveniente de resíduos sólidos urbanos são Vila Velha, Serra, Cariacica e Vitória, com potencial de 1.079 a 2.347KW. Pela Tabela 3, é possível perceber que os RSU oferecem um percentual significativo para geração de energia. A representatividade de 3,70% do potencial da biomassa de RSU equivale ao abastecimento de 12.518 residências que consomem 280kWh/mês.

Cabe salientar que o presente estudo vai contribuir para a atualização desses dados a partir do cálculo do potencial atual, que será apresentado mais adiante, no Capítulo 7.

### 3 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)

Este capítulo apresenta a definição de RSU e sua classificação bem como a aplicação dos conceitos relacionados no presente estudo. O texto também aborda brevemente a geração de resíduos no mundo, contextualizando a geração no Brasil e no Espírito Santo. O capítulo também discorre sobre a recuperação energética do biogás de RSU, evidenciando os produtos alcançados a partir dessa atividade assim como alguns usos no País.

#### 3.1 DEFINIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO

A Lei nº 12.305/2010, que institui a PNRS, em seu artigo 3º, inciso XVI, define resíduos sólidos como

[...] material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível (BRASIL, 2010a, p. 1).

Dutra (2016) explica que, devido à grande variedade de resíduos sólidos existentes, fez-se necessária sua classificação, agrupando-os por características afins, de forma a tornar mais fácil a sua gestão e seu gerenciamento. A NBR nº 10.004:2004 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) classifica os resíduos em duas classes, perigosos e não perigosos, considerando os seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública. A PNRS, em seu artigo 13, além de classificá-los quanto à periculosidade, também os classifica quanto à sua origem (BRASIL, 2010a).

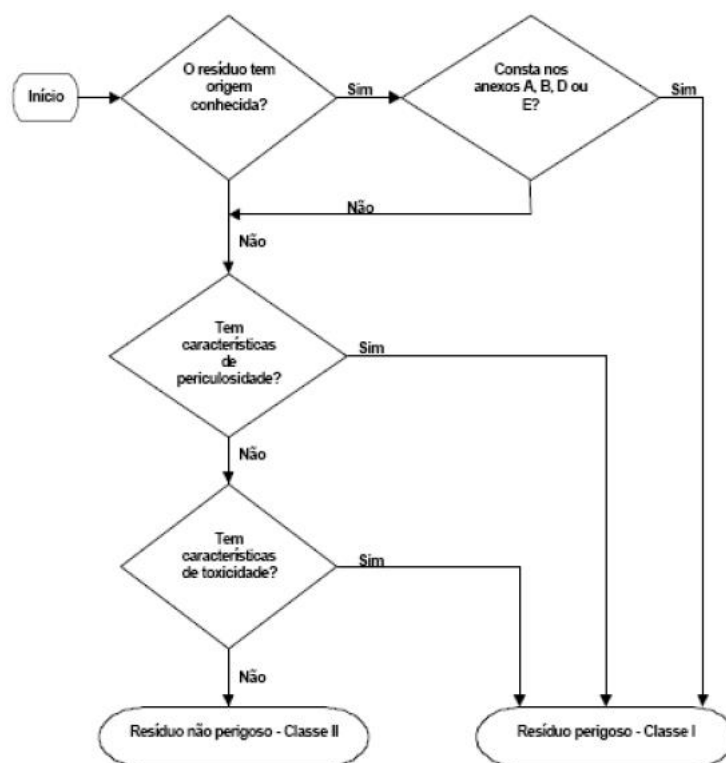
Os resíduos não perigosos são subdivididos ainda em duas categorias: inertes e não inertes. Figueiredo (2012) comenta que essa classificação é importante porque auxilia na determinação do tipo de aterro que receberá cada tipo de resíduo. Dessa forma, são denominados:

a) Resíduos Classe I (perigosos) – Inserem-se nesta categoria os resíduos que, conforme suas características, podem apresentar riscos à saúde da comunidade e/ou ao meio ambiente em geral, caso sua disposição seja inadequada. O que confere periculosidade a esses resíduos são características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade (contaminantes).

b) Resíduos Classe II (não perigosos) – Nesta classificação os resíduos podem ser II A (não inertes) e II B (inertes). O primeiro compreende os resíduos não enquadrados nas classificações Classe I ou II B. Além disso, apresentam características de combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água. O segundo são os resíduos que, quando submetidos a uma amostra representativa e a um contato dinâmico e estático com água destilada ou desionizada à temperatura ambiente, não demonstram nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspectos de cor, turbidez, dureza e sabor, tais como metais, vidros, terra, cinzas e restos desses materiais.

Essa classificação está representada na Figura 7.

Figura 7 – Caracterização e classificação dos resíduos conforme NBR 10.004:2004



Cabe mencionar que quando se fala sobre biogás de aterros sanitários, comumente se faz referências aos resíduos não perigosos da Classe II A, uma vez que são estes inseridos nas unidades de disposição final constituídas por células impermeabilizadas. Quanto à origem, os resíduos classificados segundo o artigo 13 da PNRS (BRASIL, 2010a) são distribuídos em onze tipos, conforme apresentados no Quadro 3.

Quadro 3 – Classificação dos resíduos sólidos quanto à origem, conforme a PNRS.

TIPOS		CARACTERÍSTICAS
a)	Resíduos domiciliares	Oriundos de atividades domésticas em residências urbanas.
b)	Resíduos de limpeza urbana	Oriundos da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana.
c)	Resíduos sólidos urbanos	Oriundos da junção dos resíduos domiciliares com resíduos de limpeza urbana.
d)	Resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços	Gerados nas atividades de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços, exceto os resíduos de limpeza urbana, de serviços públicos de saneamento básico, de serviços de saúde, de construção civil e de serviços de transportes.
e)	Resíduos dos serviços públicos de saneamento básico	Gerados nas atividades dos serviços públicos de saneamento básico, exceto os classificados como resíduos sólidos urbanos.
f)	Resíduos industriais	Gerados nos processos de produção e instalação industriais.
g)	Resíduos de serviços de saúde	Gerados nos serviços de saúde, conforme definido em regulamento ou em normas estabelecidas pelos órgãos do Sisnama e do SNVS.
h)	Resíduos da construção civil	Gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluindo os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis.
i)	Resíduos agropecuários e silvopastoris	Gerados nas atividades agropecuárias e silviculturais, inclusive os relacionados a insumos utilizados nessas atividades.
j)	Resíduos de serviços de transportes	Originários de portos, aeroportos, terminais alfandegários, rodoviários e ferroviários, além de passagens de fronteiras.
k)	Resíduos de mineração	Gerados em atividades de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios.

Fonte: Brasil (2010a).

Nota: Dados adaptados pela autora.

Ressalte-se que os RSU, compostos pelos resíduos sólidos domiciliares (RSD) e pelos resíduos de limpeza urbana (RLU), têm maior relevância nesta pesquisa. Assim, cabe explicitar melhor essas denominações. Os RSD incluem os resíduos domiciliares oriundos de ações domésticas em residências localizadas no meio urbano. Os RLU são originários dos serviços de varrição, limpeza de vias públicas,



limpeza de logradouros e outros serviços gerais de limpeza urbana (BRASIL, 2010a).

Os RSD gerados nas atividades residenciais do meio urbano são compostos por resíduos tanto secos como úmidos. Consideram-se como resíduos secos os constituídos por embalagens fabricadas com papéis, plásticos, vidros e metais. Os resíduos úmidos são constituídos, sobretudo, por restos de alimentos, podendo conter também, em sua composição, outros elementos, como folhas, cascas e sementes, restos de alimentos industrializados e outros úmidos em geral (BRASIL, 2012a).

Cabe salientar que tanto os RSD como os RLU são incluídos na categoria de rejeitos quando contiverem parcelas contaminadas, como, por exemplo, embalagens que não se conservaram secas, resíduos úmidos que não puderam ser aproveitados em conjunto com os demais, resíduos de atividades de higiene e outros tipos de resíduos que não foram utilizados (BRASIL, 2012a).

Assim, de acordo com a Lei nº 12.305/2010, artigo 3º, inciso XV, entende-se por rejeito os resíduos sólidos que, quando esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra alternativa que não a disposição final ambientalmente adequada (BRASIL, 2010a). Dessa forma, por meio da aplicação dessa Lei, espera-se que futuramente apenas os rejeitos sejam enviados para os aterros sanitários.

Com relação à quantificação, cabe reforçar que, neste estudo, a taxionomia dos RSU abrange tanto os RSD e RLU como os resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços. Estes últimos, conforme explicado por Dutra (2016), são similares aos resíduos domésticos e geralmente dispostos junto com resíduos domiciliares, e assim também são coletados pelo Poder Público, principalmente quando estão em menores quantidades. Como na prática não há diferenciação na coleta, este estudo abarca os RSD, os RLU e os resíduos comerciais. Assim, inclui especificamente a fração úmida desses resíduos, aqui denominada de resíduos orgânicos, devido ao seu elevado potencial para a produção de biogás quando dispostos em aterros.

### 3.2 GERAÇÃO DE RESÍDUOS: MUNDO, BRASIL E ESPÍRITO SANTO

Os dados do World Bank, citados em documento elaborado por Hoornweg e Bhada-Tata (2012), demonstram que as médias de geração de resíduos globais são amplas, e as taxas de produção variam conforme a região, o país e a cidade. Segundo o documento, a variação ocorre devido à influência de fatores econômicos, ao grau de industrialização, aos hábitos e ao clima local. Geralmente, quanto maior o desenvolvimento urbano e econômico da região, maior será a geração de resíduos sólidos.

Por outro lado, Khan, Kumar e Sammadder (2016) acrescentam que a geração de resíduos sólidos está relacionada diretamente com o crescimento demográfico, além de associada a fatores socioeconômicos, como Produto Interno Bruto (PIB), educação, ocupação, renda, quantidade de pessoas na família, entre outros fatores, como a diversificação de bens e serviços e a intensificação do consumo.

A elevada geração de resíduos sólidos tem afetado várias cidades no mundo e despertado preocupação relativa à busca de alternativas para lidar com esse problema, até mesmo porque, nas cidades, principalmente nas localizadas no meio urbano, se concentram os maiores índices de geração de resíduos, além das principais fontes de consumo e renda e dos elevados índices de desigualdade socioeconômica (VOJNOVIC, 2014).

Assuntos relacionados à geração de resíduos e à sua destinação adequada têm sido discutidos mundialmente, tanto por preocupação econômica como por fatores ambientais, sociais ou de saúde pública. A escassez dos recursos naturais, a degradação de solos, de águas superficiais e subterrâneas, além da contaminação dos habitantes por contato direto ou indireto com o resíduo têm atingido os países desenvolvidos e em desenvolvimento, cada qual com suas peculiaridades (DUTRA, 2016).

As disparidades relativas à geração de resíduos no mundo são sentidas profundamente nos países mais pobres ou em desenvolvimento, que vivenciam extremas dificuldades urbanas, ambientais e de saúde, como é o caso do Brasil.

De acordo com pesquisa realizada pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais – Abrelpe (2014), a geração de RSU no Brasil foi de aproximadamente 78,6 milhões de toneladas no ano de 2014. Esse número representou um crescimento de 2,9% em relação ao constatado no ano de 2013.

A Tabela 3 mostra a quantidade de RSU gerados no Brasil, com índices de kg/hab/dia referentes aos anos de 2013 e 2014 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS, 2014). Nota-se que esses índices são mais elevados na Região Sudeste, obviamente por essa Região conter a maior parcela do total de habitantes do País.

Obviamente os locais com alta concentração populacional são responsáveis pelas maiores quantidades de resíduos gerados. Como a tendência de crescimento populacional é constante, conclui-se que os desafios à situação dos resíduos também só tende a aumentar, necessitando da busca urgente de novas formas de gestão e tratamento, por vezes não tradicionais, como a recuperação energética. Na Tabela 4 pode-se verificar a quantidade de RSU gerados no Brasil em cada região.

Tabela 4 – Quantidade de RSU gerados por região no Brasil

Regiões	2013		2014	
	RSU Gerado (t/dia)/Índice (kg/hab/dia)	População Total (hab.)	RSU Gerado (t/dia)	Índice (kg/hab/dia)
NORTE	15.169 / 0,892	17.261.983	15.413	0,893
NORDESTE	53.465 / 0,958	56.186.190	55.177	0,982
CENTRO-OESTE	16.636 / 1,110	15.219.608	16.948	1,114
SUDESTE	102.088 / 1,209	85.115.623	105.431	1,239
SUL	21.922 / 0,761	29.016.114	22.328	0,770
<b>BRASIL</b>	<b>209.280 / 1,041</b>	<b>202.799.518</b>	<b>215.297</b>	<b>1,062</b>

Fonte: Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (2014).

Na Tabela 5, apresenta-se a quantidade de RSU coletados por regiões do Brasil.

Tabela 5 – Quantidade de RSU coletados por região no Brasil

Regiões	2013	2014
	RSU Total (t/dia)	RSU Total (t/dia)
NORTE	12.178	12.458
NORDESTE	41.820	43.330
CENTRO-OESTE	15.480	15.826
SUDESTE	99.119	102.572
SUL	20.622	21.047
<b>BRASIL</b>	<b>189.219</b>	<b>195.233</b>

Fonte: Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (2014).

O resultado da análise dos dados apontados na Tabela 5 permite perceber, pela comparação entre a quantidade de RSU gerada e a coletada, que existem mais de vinte mil toneladas de resíduos que, provavelmente, tiveram destinação desconhecida. Todavia, a cobertura de coleta dos RSU chegou a 90,68% em 2014, ou seja, foi quase total, uma porcentagem importante, uma vez que esses dados revelam que houve certo avanço na coleta de um ano para outro.

O Relatório Técnico Único BRA/OEA 08/001, do Ministério do Meio Ambiente (MMA) em parceria com a Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano (SRHU) (BRASIL, 2012b), referente à melhoria da gestão ambiental urbana no Brasil, apresenta, conforme a Tabela 6, os percentuais sobre a destinação final de RSU no Brasil por unidade de destino de resíduos, nos anos de 1989, 2000 e 2008. Os dados relativos aos anos de 2013 e 2014 são da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (2014) e foram acrescentados para comparação.

Tabela 6 – Destinação final de RSU por unidade de destino no Brasil (%)

Ano	Vazadouro a céu aberto (Lixão)	Aterro Controlado	Aterro Sanitário
1989	88,2	9,6	1,1
2000	72,3	22,3	17,3
2008	60,8	22,6	27,7
2013	17,4	24,3	58,3
2014	17,4	24,2	58,4

Fonte: Elaboração própria com base em dados do IBGE (2008), Brasil (2012b) e Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (2014).

Observa-se na Tabela 6 que a destinação final por unidade de destino de RSU se refere a vazadouro a céu aberto, popularmente conhecido como “lixão”. Com base nesses dados, pode-se ter uma noção de como a destinação final de RSU está mudando no País, principalmente pela diminuição de resíduos enviados para vazadouros (lixões) e pelo aumento dos resíduos enviados para aterros. Nota-se que, após o ano de 2008, o aterro sanitário tornou-se a opção mais utilizada para a destinação final dos RSU no Brasil. Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (2014), 58,4% dos resíduos urbanos coletados foram para aterro sanitário, e os demais, para aterros controlados (24,2%) e “lixões” (17,4%).

Embora tenha ocorrido certa melhora relativa à destinação final dos RSU no País, percebe-se que boa parte desses resíduos ainda tem destino impróprio. Apesar dos avanços já alcançados, a disposição final adequada dos resíduos urbanos ainda é um desafio a ser superado por grande parte dos estados do Brasil, inclusive o Espírito Santo.

O panorama dos resíduos sólidos urbanos no Espírito Santo revelou que o Estado chegou a produzir 3.291 toneladas de RSU por dia (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS, 2014). Segundo a fonte consultada, mais da metade desses resíduos seguiu para aterros sanitários, enquanto o restante seguiu para aterros controlados e “lixões”. A Tabela 7 apresenta o total de coleta e geração de RSU no Estado.

Tabela 7 – Coleta e geração de RSU no estado do Espírito Santo

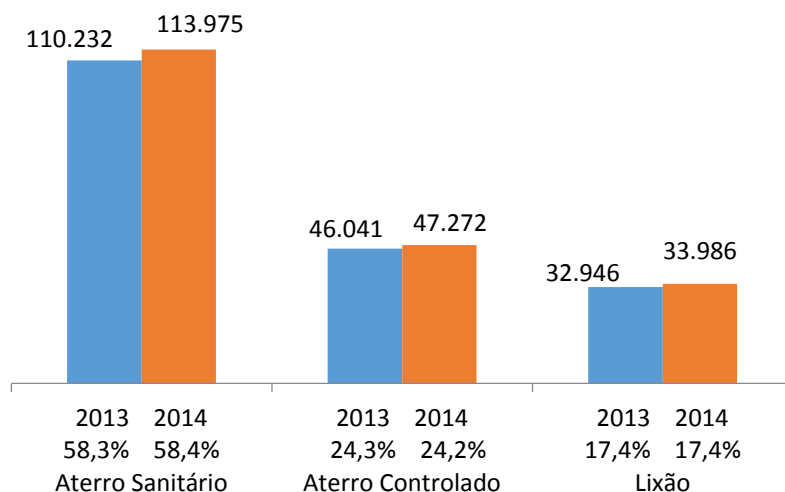
População Total		RSU Coletado				RSU Gerado (t/dia)	
		kg/hab./dia		(t/dia)			
2013	2014	2013	2014	2013	2014	2013	2014
3.839.366	3.839.366	0,763	0,777	2.931	3.019	3.197	3.291

Fonte: Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (2014).

Com relação aos dados apresentados na Tabela 7 e na Figura 8, é possível perceber um tímido avanço na área, principalmente após a implantação da Lei nº 12.305/2010, que instituiu a PNRS. Mas a dificuldade persiste até mesmo nas cidades que utilizam aterros sanitários, pois os depósitos de resíduos têm vida útil

limitada. É nesse sentido que a PNRS direciona metas estratégicas para readequar o volume de resíduos depositados, entre outras. Este assunto será enfatizado mais adiante, no Capítulo 5.

Figura 8 – Destinação final de RSU no Estado do Espírito Santo (t/dia)



Fonte: Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (2014).

Segundo informações contidas no Relatório Técnico Único BRA/OEA 08/001 do MMA/SRHU (BRASIL, 2012b), os municípios têm grande dificuldade em gerenciar soluções adequadas para os resíduos sólidos nas cidades, seja por meio individual seja por consórcio. Um dos maiores problemas enfrentados é a disposição final desses resíduos em “lixões”.

Com a intenção de eliminar definitivamente os “lixões”, o Governo do Estado lançou o Programa *Espírito Santo sem Lixão*, no ano de 2008, com o intuito de dar destino, de forma correta, a todo o lixo gerado no Estado. Posteriormente, procurou adequar-se à Lei nº 12.305/2010. Nesse cenário, o estado do Espírito Santo se destaca por iniciativas importantes na área de planejamento dos serviços públicos de resíduos sólidos por meio da Lei nº 9.264/2009, da elaboração do Plano Estadual de Resíduos Sólidos<sup>12</sup>, do Comitê Gestor de Resíduos Sólidos (Cogeres), do Conselho Metropolitano de Desenvolvimento da Grande Vitória (Comdevit), do Programa Capixaba de Materiais Reaproveitáveis, da Rede Ecociência e das associações de

<sup>12</sup> Encontra-se em processo de licitação.

catadores (BRASIL, 2012b).

### 3.3 COMPOSIÇÃO DOS RSU NO BRASIL

Nesta pesquisa, cabe comentar as principais características dos RSU no Brasil, que se diferenciam das de alguns países, principalmente pela quantidade de matéria orgânica presente. Um estudo publicado em 1988 pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo sobre a composição dos RSU brasileiros, apresentado também pela Empresa de Pesquisa Energética (2014c) revela que a composição inicial considera nos resíduos a presença de 60% de fração orgânica, 5% de inertes e 35% de recicláveis (18% de papéis, 12% de plásticos, 3% de vidros e 2% de metais).

Assim, projeções foram realizadas com base nesses valores, considerando-se também o crescimento populacional e o aumento da renda *per capita*, incluindo o fato de que, com o aumento da renda *per capita*, ocorrem também mudanças na composição dos resíduos gerados, como sucede hoje em países de maior renda, conforme mencionado por Khan, Kumar e Sammadder (2016). Quanto ao teor de umidade no lixo brasileiro, as projeções mantiveram-se na faixa de 60% sobre a parcela de restos alimentares, e, quanto à produção, utilizou-se um fator de produção *per capita*, para o ano base de 2010, de 0,89kg/dia (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2014c).

O “Caderno de diagnóstico: resíduos sólidos urbanos”, parte constitutiva da Minuta do Plano Nacional de Resíduos Sólidos (INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA – IPEA, 2011), apresenta a composição gravimétrica presente nos resíduos urbanos brasileiros no ano de 2011. De acordo com Dutra (2016), esse Caderno tem sido uma das fontes mais utilizadas para dimensionar os sistemas urbanos de coleta de resíduos no Brasil. Para o cálculo desse levantamento, foram utilizados dados de 93 estudos de caracterização física realizados no período de 1995 a 2008. Na Tabela 8 podem-se visualizar tanto os dados relativos às projeções da EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (2014c) quanto os do Caderno de diagnóstico (INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA, 2011).

Tabela 8 – Composição gravimétrica estimada dos RSU coletados no Brasil

MATERIAIS	PARTICIPAÇÃO (%)	
	2011	2014
Metais	2,9	2,1
Papel, papelão e tetrapark	13,1	18,5
Plástico total	13,5	12,3
Vidro	2,4	3,1
Total de material reciclável	31,9	36
<b>Total de matéria orgânica</b>	<b>51,4</b>	<b>59</b>
Outros	16,7	5
<b>TOTAL COLETADO</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

Fonte: Elaborado pela autora com base em dados do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (2011) e da Empresa de Pesquisa Energética (2014c).

Na Tabela 8, nota-se que a matéria orgânica é o integrante de maior proporcionalidade nos resíduos brasileiros (entre 50% e 60% em massa). De 2011 a 2014 houve um aumento tanto de recicláveis quanto de matéria orgânica. Como o destino final da maior parte desses materiais ainda são os aterros sanitários, cabe aproveitá-los como instrumentos que vão além da questão do saneamento ambiental, uma vez que, mediante o uso de resíduos, também é possível obter benefícios econômicos com a produção energética. Especialmente por conter elevada fração de matéria orgânica geradora do biogás, a recuperação dessa matéria para geração de energia tem despertado interesse (OLIVEIRA; ROSA, 2003; OLIVEIRA et al., 2008; CHO; MOON; KIM, 2012; MAIER; OLIVEIRA, 2014). Esse assunto será tratado em detalhes no próximo capítulo.



## 4 A GERAÇÃO DE ENERGIA COM O BIOGÁS DE ATERROS SANITÁRIOS

Este capítulo versa especialmente sobre o aproveitamento energético do biogás, com ênfase no biogás de aterros sanitários. Em seguida, apresenta as tecnologias utilizadas para a conversão desse energético, destacando as mais empregadas para a geração de energia elétrica e combustível, uma vez que são objetos de estudo do presente trabalho. Por fim, mostra como o emprego dessas tecnologias pode contribuir para reduzir a emissão de gases de efeito estufa.

### 4.1 ESTADO DA ARTE SOBRE O APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS

Segundo Bley Jr. (2015), em 1970, o biogás foi integrante do modelo chamado de “Revolução Verde”, movimento que disseminou em todo o mundo novas formas de agricultura. No entanto, o biogás não seguiu um caminho naturalmente próspero, especialmente pelo fato de estar vinculado ao valor dos derivados de petróleo e apresentar experiências malsucedidas em seu histórico. Cabe destacar as centenas de biodigestores que foram instalados, depois abandonados porque continham ferro em sua composição, e que foram corroídos pelo gás sulfídrico, constituinte do biogás. Nesse período, logo na primeira crise, o biogás desapareceu. Assim, passaram-se quarenta anos sem que o biogás tivesse relevância (BLEY JR., 2015; BRASIL, 2016c).

Em 1990, a questão ambiental teve maior proeminência devido à Conferência Rio-92, que reforçou a necessidade de redução da emissão de gases de efeito estufa. Soma-se a esse pano de fundo, a perspectiva de rendas com o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo. As metodologias do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), orientadas pelo Protocolo de Kyoto, estabeleceram que a destruição do gás CH<sub>4</sub> poderia ocorrer em duas situações: a primeira, por simples queima do biogás, e a segunda, por aplicações em sua conversão energética. Devido à complexidade da segunda opção, priorizou-se, como solução, a simples queima do CH<sub>4</sub> em *industrial flare*. Assim, os projetos que surgiram nessa época incluíam

apenas a queima do biogás, e não o seu aproveitamento energético. Logo, com a diminuição dos preços internacionais dos certificados de redução de emissões decorrente da crise econômica dos países compradores, o biogás sumiu novamente do mercado (CENTRO INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS–BIOGÁS, 2016).

Bley Jr. (2015) explica ainda que, se a prática inicialmente adotada para o biogás fosse diferente, os setores atrelados a esse processo poderiam encontrar reais possibilidades de geração de renda e cobertura de seus custos em investimentos ambientais.

Por volta do ano 2000, o biogás retornou ao cenário e voltou a ser visto como um combustível utilizável para geração de energia. Dessa forma, deixou de ser um passivo ambiental para tornar-se um ativo energético. O biogás voltou a ser uma matéria prima para geração de biometano, um produto combustível gerado a partir da purificação do biogás, considerado como fonte renovável de energia, modificando completamente os insucessos do passado (CENTRO INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS–BIOGÁS, 2016).

Ao longo desse período, a matriz energética brasileira precisou de mais de quarenta anos para atentar especificamente para a energia gerada com a aplicação do biogás produzido em processos de biodigestão anaeróbia<sup>13</sup> de resíduos orgânicos, agrícolas, urbanos ou industriais (CENTRO INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS–BIOGÁS, 2016).

Maier e Oliveira (2014) acrescentam que existe um potencial significativo de fontes de produção desse tipo de gás ainda a ser explorado. O aproveitamento desses resíduos mencionados apresenta muitas vantagens socioambientais. Por esse motivo, existe interesse em viabilizar o seu aproveitamento energético no Brasil. De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (2016a), a produção de energia elétrica, por exemplo, já apresenta opções tecnológicas maduras para esse tipo de atividade.

---

<sup>13</sup> Os RSU, uma vez inseridos em ambientes confinados, como em aterros sanitários, sob condições anaeróbias, sofrem decomposição e, a partir de sua parcela orgânica, inicia-se a liberação do biogás (THOMPSON et al., 2009; ZHOU et al., 2014).

Assim, esta pesquisa procurou evidenciar a opção do biogás oriundo dos RSU condicionados em aterros sanitários e, por essa razão, apresenta uma descrição mais detalhada para este estudo.

## 4.2 O BIOGÁS DE ATERRO SANITÁRIO

De acordo com Pavan (2010), o aterramento de resíduos sólidos como forma de destino final é uma prática antiga. Os povos nabateus, na Mesopotâmia (2.500 anos a.C.), já enterravam os resíduos domiciliares e agrícolas em trincheiras escavadas no solo. Passado um período de tempo, essas trincheiras eram abertas e a matéria decomposta era retirada e utilizada como fertilizante orgânico na produção de cereais.

Embora se tenham observado recentes exigências relativas às novas alternativas para a disposição dos resíduos em todo o mundo, principalmente por causa de problemas ambientais de aterros antigos e menor disponibilidade de áreas para aterramento, os aterros ainda têm sido uma das práticas mais utilizadas para a disposição dos RSU (ZANETTE, 2009; FAAIJ, 2006).

No Brasil, conforme exposto no capítulo anterior, os tipos de disposição de resíduos existentes são os vazadouros a céu aberto (“lixões”), os aterros controlados e os aterros sanitários<sup>14</sup>. Conforme o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (2012), essas três formas de destinação dos RSU receberam praticamente 97% da quantidade total de resíduos coletados no Brasil no ano de 2008. Entre essas opções, observou-se uma tendência de redução dos resíduos enviados para “lixões” e um progressivo aumento dos resíduos enviados para aterros (rever Tabela 6). Tal fato pode ser associado ao cumprimento de exigências legais por parte dos municípios brasileiros, principalmente pelo fato de o aterro sanitário ser a opção mais adequada ambientalmente, uma vez que é fundamentada em critérios de

---

<sup>14</sup> O aterro controlado, apesar de também utilizar métodos de engenharia, não dispõe de confinamento seguro, coleta e tratamento de lixiviado de aterro e biogás. No caso do vazadouro ou “lixão”, o despejo dos resíduos é feito diretamente sobre o solo, sem o uso de técnica ou medida de proteção. Por esse motivo, esta prática está proibida no Brasil.

engenharia e normas específicas que visam garantir a proteção do meio ambiente e da saúde pública.

Assim, os resíduos sólidos, quando dispostos em aterros sanitários, são compactados e cobertos diariamente com terra, organizados em células diárias, dispostas lado a lado, de forma a permitir a formação de camadas de resíduos sobre o solo (PAVAN, 2010). De acordo com Zanette (2009), nos aterros, os resíduos são isolados da água para evitar a geração de chorume e, conseqüentemente, a poluição do solo. Nesse caso, o objetivo principal é isolar o resíduo do ambiente em um invólucro de solo compactado e plástico. Essa cobertura plástica normalmente é uma camada fina de polietileno de alta densidade, combinada com uma camada de solo para formar a capa.

Santos (2011) menciona que, uma vez inserido nesse ambiente, o resíduo passa por transformações físico-químicas denominadas “processo de decomposição”. Durante esse processo, o resíduo reduz sua massa inicial basicamente devido a duas transformações na sua composição: primeiro, a matéria orgânica presente produz um gás, o chamado biogás, composto basicamente de  $\text{CH}_4$ <sup>15</sup> e gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ); segundo, a umidade ( $\text{H}_2\text{O}$ ) naturalmente presente nesses resíduos combina com a matéria orgânica restante gerando o chorume, um percolato com altas concentrações de matéria orgânica e de outros compostos com elevado potencial poluente. Após a decomposição de toda a fração orgânica, a matéria inorgânica remanescente no resíduo permanece por um período mais longo na célula, até a sua total decomposição. Esse tempo pode variar, conforme a composição do material de origem inorgânica.

Nogueira (2013) acrescenta que a fração orgânica de cada tipo de resíduo tem diferentes velocidades de decomposição. Por isso, esse processo biológico acontece em fases variadas, que podem ocorrer de forma simultânea, e relaciona-se com o volume da célula do aterro. A duração das fases e a concentração de produtos dependem de diversos fatores, como as características físicas, químicas e biológicas dos resíduos e do aterro. Nesse caso, o aterro funciona como um reator biológico, promovendo a decomposição em dois processos, inicialmente o aeróbio e, por fim, o

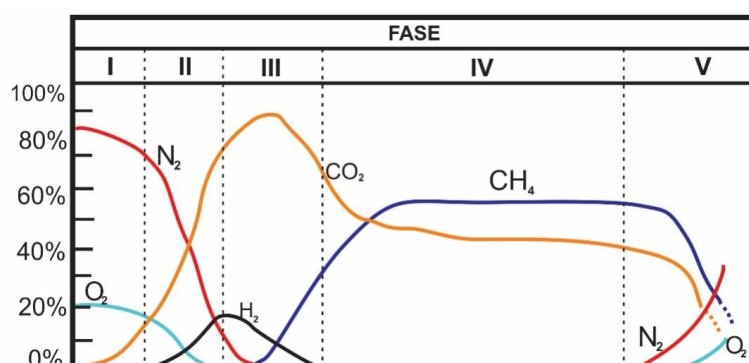
---

<sup>15</sup> Tanto para Chakraborty e outros (2013) como para Qdais, Hani e Shatnawi (2010), a composição do metano pode variar de 50% a 60%.

anaeróbico, responsável pela geração de  $\text{CH}_4$ , que confere o potencial energético ao biogás.

Tchobanoglous e outros (1994), citados por Borba (2006), afirmam que a geração de gás em aterros pode ocorrer num processo que passa por quatro ou cinco fases, dependendo da descrição de cada autor. Nesse aspecto, a Empresa de Pesquisa Energética (2014c) admite quatro fases, já a *United States Environmental Protection Agency* (USEPA), citada por Brito Filho (2005), admite cinco fases. Na Figura 9 apresentam-se as cinco fases mencionadas.

Figura 9 – Fases de geração de biogás em aterros de resíduos sólidos



Fonte: Elaboração própria com base em dados de Borba (2006).

Nota: Fase I - Ajuste inicial; Fase II - Transição; Fase III - Ácida; Fase IV - Metanogênica; Fase V - Maturação.

A geração de  $\text{CH}_4$  em volume significativo inicia-se de seis meses a dois anos após a disposição dos resíduos na célula e pode durar até décadas, dependendo das condições do local, das características dos resíduos e da quantidade de resíduos no aterro. O  $\text{CH}_4$  produzido migra do seu local de origem no aterro e, por meio de regiões de baixa pressão no solo, consegue atingir a atmosfera. Nesse processo, o solo oxida aproximadamente 10% do  $\text{CH}_4$  gerado no aterro a dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), e os 90% restantes são emitidos como  $\text{CH}_4$ , caso não seja recuperado em um sistema de recuperação de gases e então utilizado ou queimado (ZANETTE, 2009).

A ocorrência de emissão de  $\text{CH}_4$  pela superfície do aterro dá-se por vários fatores, tais como a grossura e o material de cobertura, o tipo de projeto implantado e a forma de operação do sistema de coleta de gás, a composição dos resíduos e o clima (AMINI; REINHART; NISKANENC, 2013). A esses fatores mencionados, Brito

Filho (2005) acrescenta os caminhos naturais e não naturais percorridos pelo gás no aterro, a velocidade e direção do vento no local, a umidade, os níveis de água, assim como a temperatura e a pressão do gás no solo. Tais fatores são mencionados mais especificamente a seguir.

#### 4.2.1 Perda de gás na superfície do aterro

Tanto para Karanjekar e outros (2015) como para Brito Filho (2005), existem perdas significativas de CH<sub>4</sub> na superfície do aterro. De forma geral, presume-se que, em relação à quantidade total de CH<sub>4</sub>, somente uma parte é recuperada por meio do sistema de recuperação de biogás. Nas condições normais, os gases produzidos no solo escapam para a atmosfera por difusão molecular<sup>16</sup>. No caso de um aterro em operação, a pressão interna ainda é maior que a pressão atmosférica, o que força os gases para fora do solo por difusão e fluxo convectivo, ou seja, o gás é conduzido por pressão. No Quadro 4 apresentam-se os principais fatores que influenciam no processo de migração do gás de aterro.

Quadro 4 – Fatores que interferem na migração do gás de aterro

(Continua)

FATORES	DESCRIÇÃO
TIPO DE COBERTURA	No caso de a cobertura do aterro ser constituída de material razoavelmente permeável, como cascalho ou areia, o gás tende a migrar através dessa camada. Do contrário, se a cobertura do aterro for de siltes e argilas, a permeabilidade é reduzida; assim o gás pode migrar horizontalmente pelo subsolo.
CAMINHOS (NATURAIS E NÃO NATURAIS)	Os drenos, trincheiras e passagens aterradas, como túneis e dutos, agem como condutores para a movimentação do gás.
DIREÇÃO E VELOCIDADE DO VENTO	O gás de aterro tende a escapar pela superfície e é direcionado pelo vento. O vento dissipa o gás com ar, conduzindo-o para outras áreas do aterro. A velocidade e a direção do vento determinam a concentração do gás no ar, que sofre variações diárias e/ou horárias.

<sup>16</sup> Gobbi (2015) conceitua difusão molecular como parte do transporte de um soluto em um fluido devido à agitação (movimento browniano) das moléculas que o compõem. Resume-se em um fenômeno físico de transporte de matéria (líquido ou gás).

Quadro 4 – Fatores que interferem na migração do gás de aterro

(Conclusão)

FATORES	DESCRIÇÃO
UMIDADE	A umidade superficial do solo pode impedir a fuga do gás. Tanto a chuva quanto a umidade podem infiltrar-se nos caminhos vazios do aterro forçando a saída dos gases desses locais.
NÍVEIS DE ÁGUA NO SOLO	A direção do gás é influenciada pelas variações apresentadas no nível de água do solo. Se a água contida no ambiente segue na direção de uma área, o gás de aterro também segue no mesmo caminho.
TEMPERATURA	Elevações de temperatura induzem o movimento da partícula de gás e podem aumentar sua difusão. Assim, o gás pode dispersar-se mais rapidamente em condições de elevada temperatura. A ocorrência de ciclos de esfriamento e aquecimento pode gerar a ruptura na superfície do solo e causar a migração do gás de aterro para cima ou horizontalmente.
PRESSÃO DE GÁS NO SOLO E BAROMÉTRICA	A redução da pressão atmosférica induz o gás a migrar para fora do aterro. Com o aumento da pressão, o gás pode permanecer retido temporariamente no local até que ocorra um novo balanço de pressão.

Fonte: Elaborado pela autora com base em informações de Brito Filho (2005).

Todos esses parâmetros apresentados no Quadro 4 devem ser considerados quando se pretende recuperar o biogás de aterro. Algumas medidas são empregadas para reduzir perdas de gás. Um dos métodos mais comuns, segundo Brito Filho (2005), é reduzir a pressão do gás dentro do aterro. Para tal, chaminés podem ser instaladas através da cobertura final da massa de resíduos sólidos. Nesse caso, se o CH<sub>4</sub> no gás fugitivo tiver concentração suficiente, várias chaminés podem ser conectadas e equipadas com um queimador de gás<sup>17</sup>.

Abichou e outros (2015) consideram que a vegetação também pode auxiliar na redução das emissões fugitivas de gás no aterro, uma vez que melhora a

<sup>17</sup> Todavia, Brito Filho (2005) ressalta certo cuidado com esta utilização porque pode ocorrer de as chaminés passivas com queimadores não destruírem totalmente os compostos orgânicos voláteis e os odores. Assim, torna-se difícil o cumprimento de exigências dos órgãos ambientais para o controle da qualidade do ar.

aglomeração, o isolamento térmico contra a variação de temperatura e a estabilização mecânica. Acrescentam ainda que solos, como argila e sedimento, são ricos em partículas de grãos mais finos, que podem selar a camada superficial do solo quando úmido. Esse processo pode ocasionar o bloqueio de poros e limitar a difusividade do ar do solo, além de reduzir a oxidação do  $\text{CH}_4$  devido à baixa concentração de oxigênio. Nesse caso, uma zona de vegetação pode neutralizar este tipo de erosão vertical e estabilizar as partículas. As raízes das plantas favorecem a aeração do solo ao criar macroporos maiores, que propiciam a difusão de oxigênio, assim como o fornecimento de  $\text{CH}_4$  a bactérias. Assim, espera-se um aumento do potencial de oxidação do  $\text{CH}_4$  de solos vegetativos (ABICHOU et al., 2015).

Desse modo, reitera-se que a oxidação de  $\text{CH}_4$  também pode sofrer influências de processos de estruturação de vegetação do solo. Somam-se a isso as condições ambientais de temperatura e precipitação, que também podem influenciar no desempenho do processo de oxidação de  $\text{CH}_4$  dos solos que cobrem os aterros.

Amini, Reinhart e Niskanen (2013) indicam que uma fração de oxidação padrão é de 0,10, conforme recomendado em 2004 pela USEPA e em 2000 pelo IPCC. Nesse aspecto, Broun e Sattler (2016) utilizam um valor padrão de 10% para a oxidação do  $\text{CH}_4$  na cobertura de aterros, conforme sugerido pelo banco de dados AP-42 da USEPA e pelo inventário de US GHG. Justificam essa porcentagem pelas incertezas e ausência de uma metodologia padronizada para determinação da taxa de oxidação do  $\text{CH}_4$  por meio do solo de cobertura do aterro.

Barlaz, Chanton e Green (2009) enfatizam que, mesmo num típico aterro construído com padrões de engenharia, o caminho dos gases muda com o passar do tempo. Após a disposição do resíduo no local, existe um período de tempo, antes da coleta, em que o gás é emitido para a atmosfera por meio de oxidação parcial em coberturas do solo. Uma vez instalado um sistema de coleta, uma parte do gás é coletada por uma rede de poços e/ou trincheiras mantidos sob pressão negativa. Porém, embora se recupere uma fração desse gás, nem os sistemas de controle de gases mais eficientes coletam todos os gases gerados em aterros sanitários.

As estimativas da *United States Environmental Protection Agency* (2015) contemplam eficiência de coleta de biogás em aterros nos Estados Unidos na média



de 75%. O *Intergovernmental Panel on Climate Change* (2006) assume a recuperação de gás de aterros sanitários na faixa de 10 a 90%. Yang e outros (2013) consideram uma eficiência de coleta de 50% em alguns aterros sanitários da China. Por outro lado, os estudos de Broun e Sattler (2016) indicam que, a partir do encerramento da célula e da inserção da cobertura do solo, a eficiência da coleta pode chegar a 75%. Todavia, após aplicação da cobertura final no solo, a eficiência de coleta pode elevar-se para 95%. De acordo com os autores, constata-se esse padrão de eficiência pelo menos após vinte anos do início da operação da célula.

#### 4.2.2 Composição do biogás de aterro sanitário

De acordo com Lobato (2011), os constituintes usualmente encontrados no biogás gerado em aterros sanitários, em digestores de lodo e em reatores anaeróbios no tratamento do esgoto doméstico são o CH<sub>4</sub>, o CO<sub>2</sub>, o monóxido de carbono (CO), o nitrogênio (N<sub>2</sub>), o hidrogênio (H<sub>2</sub>), o sulfeto de hidrogênio (H<sub>2</sub>S) e o oxigênio (O<sub>2</sub>), conforme exposto na Tabela 9. A esses gases, Brito Filho (2005) acrescenta ainda o amoníaco (NH<sub>3</sub>). Chernicharo e Stuetz (2000) reiteram ainda que, em alguns casos, principalmente se oriundo de aterro sanitário, o biogás pode conter siloxanos, constituídos a partir da degradação anaeróbia de materiais geralmente encontrados em cosméticos, desodorantes, aditivos de alimentos e sabão.

Tabela 9 – Composição típica de biogás gerado em reatores anaeróbios tratando esgoto doméstico, aterros sanitários na fase metanogênica e digestores de lodo

Parâmetro	Unidade	Composição volumétrica típica		
		Biogás de reatores anaeróbios	Biogás de aterro sanitário	Digestores de lodo
Metano – CH <sub>4</sub>	%	60 a 85	45 a 50	60 a 70
Gás carbônico – CO <sub>2</sub>	%	5 a 15	30 a 45	20 a 40
Monóxido de carbono – CO	%	0 a 0,3	0 a 0,2	-
Nitrogênio – N <sub>2</sub>	%	10 a 25*	0 a 15	< 2
Hidrogênio – H <sub>2</sub>	%	0 a 3	Traços a > 1	-
Sulfeto de hidrogênio – H <sub>2</sub> S	ppm	1.000 a 2.000	10 a 200	até 1.000
Oxigênio – O <sub>2</sub>	%	traços	0,8	-

Fonte: Lobato (2011). (\*) A elevada fração de nitrogênio no biogás de reatores anaeróbios deve-se ao N<sub>2</sub> dissolvido no esgoto doméstico.

Lobato (2011) enfatiza ainda que o  $\text{CH}_4$  é o principal constituinte do biogás. Além disso, é um gás inodoro, incolor e mais leve que o ar (com densidade igual a 0,55 em relação ao ar). Sua molécula é tetraédrica, apolar ( $\text{CH}_4$ ) e tem pouca solubilidade em água. É considerado o mais simples dos hidrocarbonetos e tem alto valor combustível.

Sobre o fato de o  $\text{CH}_4$  ser o principal componente do biogás, cabe informar que este é 21 vezes mais poluente que o  $\text{CO}_2$ , em se tratando de efeito estufa. Por esse motivo, só a queima desse gás já representa um benefício para o meio ambiente. Conforme mencionado, esse procedimento geralmente ocorre em queimadores (*flares*), um sistema por onde o gás é conduzido para ser queimado, procedimento que evita explosões e emissão direta de  $\text{CH}_4$  para a atmosfera (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2014c). Broun e Sattler (2016) afirmam que esse processo de queima tem sido a principal forma de minimizar as emissões de  $\text{CH}_4$  oriundas de aterros. Nesse aspecto, cabe reforçar que, embora a queima gere benefícios por causa da redução das emissões de gases poluentes, se perde a oportunidade de utilizar o biogás de aterro como uma fonte de energia considerada “limpa” e renovável. Assim, o aproveitamento energético nesse caso deve ser incentivado, uma vez que permite um destino mais nobre para o gás.

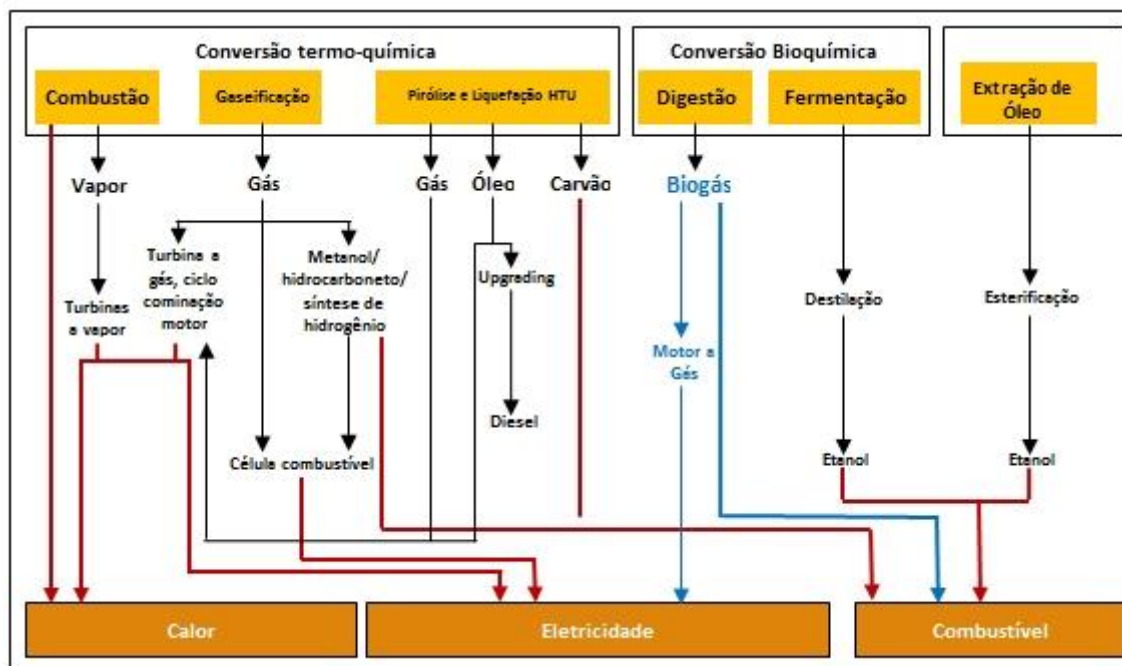
#### 4.3 RECUPERAÇÃO E CONVERSÃO ENERGÉTICA DO BIOGÁS

A busca pela segurança energética, o aumento dos preços da energia, os mercados mundiais cada vez mais competitivos, a pressão relativa a emissões ambientais e rigorosos regulamentos são forças motrizes primárias voltadas a tecnologias sustentáveis e economicamente viáveis para abordagens eficientes e “limpas” na conversão e utilização de energia (SRINIVASAN; MAGO; KRISHNAN, 2010).

Nesse aspecto, para gerar energia a partir da biomassa podem ser usados vários sistemas, com diversas alternativas na sua aplicação. A escolha dessas alternativas é fundamentada em diversas variáveis, institucionais, econômicas, ambientais, técnicas e regulatórias (BRASIL, 2012b). Estas duas últimas recebem maior enfoque neste estudo. Para a fundamentação técnica torna-se essencial a compreensão das

rotas de conversão da biomassa em energia, apresentada na Figura 10. A rota do biogás foi selecionada na cor azul para melhor compreensão do processo de conversão.

Figura 10 – Rotas de conversão da biomassa em energia



Fonte: Turkenburg (2000).

Nota: Dados adaptados pela autora.

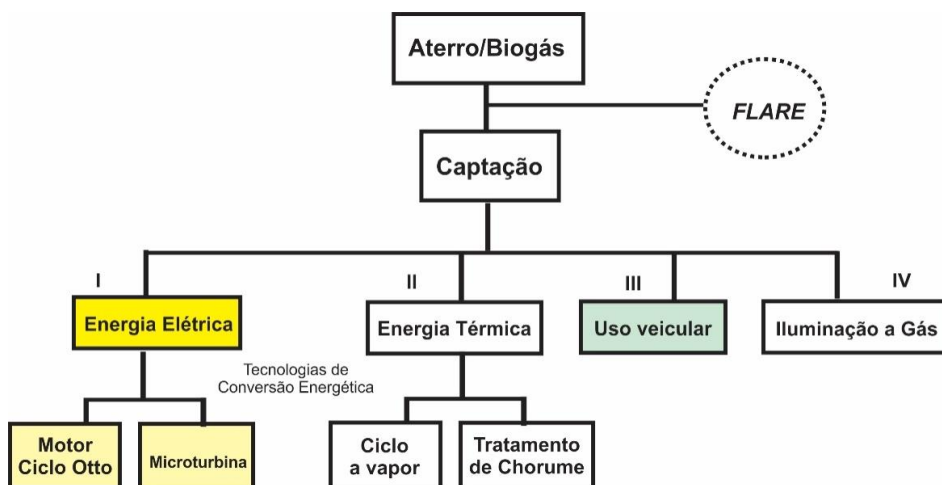
Dentre as rotas apresentadas por Turkenburg (2000) na Figura 10, as mais utilizadas para o processo de conversão de RSU em energia são a digestão anaeróbia (em aterros sanitários) e a combustão (tratamento térmico). Faaij (2006) afirma que o motivo de a digestão anaeróbia ser muito praticada é por ter sido essa tecnologia desenvolvida há bastante tempo e, por isso, encontrar-se numa fase tecnicamente estável. Além disso, pode ser aplicada no caso tanto de resíduos orgânicos úmidos homogêneos quanto de heterogêneos, como os RSU. Somam-se a isso outros fatores, como a difusão da tecnologia, o aterro sanitário como opção mais utilizada mundialmente para o tratamento de resíduos, a atratividade financeira e a mitigação de gases de efeito estufa. Essas razões motivaram o estudo do biogás de aterros nesta pesquisa.

### 4.3.1 Alternativas energéticas

Conforme apresentado, a biomassa pode produzir energia de diversas maneiras. As tecnologias empregadas para a conversão desses recursos em energia dependem das características e objetivos desses recursos. Em função disso, a conversão energética foi conceituada como o processo que transforma um tipo de energia em outro. Com base nesse conceito, o biogás apresenta-se como um gás versátil e fonte energética renovável, uma vez que a sua energia pode ser (1) convertida em energia mecânica por meio de processos de combustão controlada em motores, que, por sua vez, movem geradores e promovem a conversão direta em energia elétrica; (2) utilizada para a cogeração de energia térmica, empregada para geração de água quente e vapor produzido com as elevadas temperaturas do motor; (3) queimada, aplicada como fonte de energia térmica em caldeiras; (4) combustível, utilizada como gás veicular purificado em motores automotivos e estacionários, como energia veicular (SALOMON; LORA, 2009; COIMBRA-ARAÚJO et al., 2014; CENTRO INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS–BIOGÁS, 2016). Recentemente, começaram a surgir outras aplicações, como a utilização do biogás para obtenção de hidrogênio (RASI, 2009; BLEY JR., 2015; VALENTE, 2015); todavia, esta última aplicação não será tratada nesta pesquisa por ainda ser incipiente e carecer de mais estudos.

Para *Local Governments for Sustainability – Iclei* (2009), após sua captação, além da geração de energia elétrica, térmica e combustível, o biogás também pode ser utilizado para iluminação. Quando não aproveitado para esses fins, é queimado em *flare*, procedimento que evita emissão direta do CH<sub>4</sub> para a atmosfera conforme já mencionado. Na Figura 11, apresenta-se um resumo das soluções mencionadas.

Figura 11 – Diagrama com as alternativas de reaproveitamento do biogás

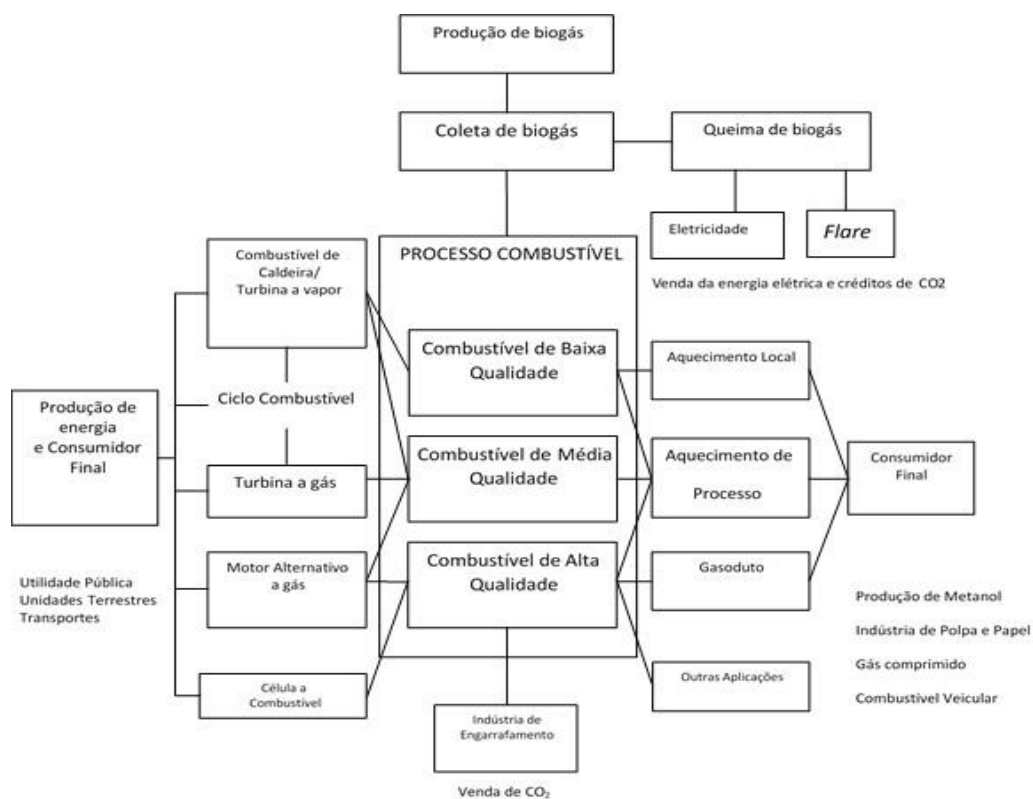


Fonte: *Local Governments for Sustainability* (2009).

Nota: Dados adaptados pela autora.

Para Santos (2011), independente do uso energético dado ao biogás, o mais importante para o sucesso de qualquer empreendimento do tipo é a utilização de um bom sistema de extração e de tratamento do biogás. Esse sistema permite determinar tanto a quantidade quanto a qualidade do combustível que será recuperado desses gases. A Empresa de Pesquisa Energética (2014c) salienta que, tanto para geração de energia elétrica como para produção de combustível, a infraestrutura necessária para a recuperação do biogás depende de um custo de implantação e operação que deve ser avaliado para cada aterro. Embora este estudo não contemple a avaliação econômica, por ser um assunto que se desvia dos objetivos desta pesquisa, cabe ressaltar que a viabilidade de um projeto de recuperação de biogás também está associada à quantidade de gás gerado no aterro. Na Figura 12, exemplificam-se as rotas para utilização do biogás de RSU.

Figura 12 – Rotas para utilização do biogás de RSU



Fonte: Elaborado pela autora com base em informações da Empresa de Pesquisa Energética (2014c).

A escolha da melhor opção para um sistema de conversão energética a partir do biogás de aterro depende de vários fatores, inclusive da viabilidade de um mercado de energia, de análises de custos dos projetos, das fontes de receita, além de determinadas considerações técnicas e regulatórias, conforme já mencionado (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2014c).

Todavia, qualquer que seja o destino objetivado para o biogás, Lobato (2011) ressalta que sempre haverá a necessidade de algum tipo de tratamento. Esse requisito pode ser mínimo, a exemplo da simples remoção de condensado para usos menos nobres, como a combustão direta, ou de forma completa, quando se quer a injeção na linha de gás natural ou a utilização como combustível veicular.

Embora o biogás abarque os propósitos apresentados nas Figura 11 e 12, esta pesquisa concentra atenção apenas nas alternativas de reaproveitamento para geração de energia elétrica e combustível, este último com foco no biometano.

A escolha dessas alternativas baseia-se, essencialmente, na premissa de os biocombustíveis serem indicados como principais substitutos de combustíveis fósseis e a eletricidade proveniente de RSU ser uma energia sustentável (GUZIANA, et al., 2014). Assim, cabe apresentar detalhadamente os processos selecionados neste estudo.

#### **4.3.2 Energia Elétrica**

De acordo com Santos (2011), para gerar energia elétrica a partir do biogás são utilizados dispositivos que inicialmente convertem a energia química presente no combustível, no caso o  $\text{CH}_4$ , em energia cinética de rotação, por meio do motor. Em seguida, o motor é conectado a um gerador, que transforma essa energia cinética de rotação em energia elétrica. Segundo o autor, qualquer que seja o dispositivo de conversão da energia química do  $\text{CH}_4$  em energia cinética de rotação, este deve estar conectado a um gerador para a geração de energia elétrica.

A Empresa de Pesquisa Energética (2014c) explica que o biogás é comumente utilizado na alimentação de grupos motores geradores de combustão interna de pequena potência, adequados à queima de gás pobre. No entanto, "[...] mesmo alimentados com combustível de baixo poder calorífico, o rendimento desses geradores pode superar 35%" (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2014c, p. 18).

Aydi e outros (2015) afirmam que os motores de combustão interna representam a tecnologia mais empregada para a conversão do biogás em eletricidade. Além disso, apresentam uma eficiência de geração de energia elétrica de 33%. Para Yang e outros (2013), esta eficiência se situa na faixa de 25 a 35%.

Para Nogueira (2013), além dos motores a combustão interna, as turbinas a gás e as microturbinas também são utilizadas para produzir energia. Para a conversão, os motores de combustão interna oferecem mais eficiência e custo de aquisição mais acessível. De acordo com o autor, as turbinas a gás apresentam maior eficiência global de conversão, quando operadas em cogeração (calor e eletricidade simultaneamente), mas o valor do equipamento e seus custos de operação e

manutenção são mais elevados. Além disso, as microturbinas necessitam do gás combustível com propriedades mais controladas que os motores convencionais (NOGUEIRA, 2013).

Dentre as tecnologias convencionais para a conversão energética do biogás já mencionadas por Santos (2011) e Nogueira (2013), Abreu, Avelino e Mônaco (2011), assim como a *United States Environmental Protection Agency* (2015), também destacam as turbinas a gás e os motores de combustão interna (ciclos Otto e Diesel). Argumentam que os motores a combustão interna são indicados para gerar energia a pequenas e médias capacidades, uma vez que são mais adequados devido ao seu menor custo e maior eficiência nessa faixa. As turbinas são mais indicadas para altas capacidades a fim de obter viabilidade, com possibilidade de melhorar quando operadas em ciclos combinados.

Segundo a *United States Environmental Protection Agency* (2015), as turbinas a gás são recomendadas para utilização em projetos a partir de 5MW, uma vez que assim é possível obter maiores ganhos de escala. Tanto o custo por kW de capacidade de geração como a eficiência são menores quando se aumenta o tamanho da turbina. Assim, em projetos de energia com o biogás, geralmente a eficiência fica em torno de 20% a 28% em processos de operação com plena carga. Já em ciclo combinado, em processos de recuperação do calor perdido nos gases de escape da turbina para capturar eletricidade adicional, a eficiência pode chegar a 40% em comparação com a dos motores de combustão interna.

Nos estudos de Abreu, Avelino e Mônaco (2011), os motores a combustão interna de ciclos Otto ou Diesel revelaram maior eficiência. No caso dos motores de ciclo Diesel, os autores trabalharam com taxas de compressão mais elevadas, com necessidade de operar com o biogás misturado ao diesel ou ao biodiesel, o que representou um insumo adicional para o aterro sanitário.

Na Tabela 10, apresenta-se a comparação entre potência e rendimento para as tecnologias mencionadas.



Tabela 10 – Tecnologias de conversão

TECNOLOGIA	POTÊNCIA INSTALADA	RENDIMENTO ELÉTRICO
Motores a gás (Ciclo Diesel)	30kW – 1MW	30% - 40%
Motores a gás (Ciclo Otto)	30kW – 20MW	25% - 40%
Turbina a gás (Médio Porte)	500kW – 150MW	35% - 42%
Microturbinas (Pequeno Porte)	30kW – 100kW	24% - 28%

Fonte: Elaborado pela autora com base em informações de Pecora e outros (2008); Pavan (2010); Abreu, Avelino e Monaco (2011); Lobato (2011); Barros, Tiago Filho, Silva (2014); Valente (2015).

Segundo Pecora e outros (2008), o mercado brasileiro já dispõe de motores Otto adaptados para operar com o biogás, além de técnicos especializados, o que favorece a viabilidade de instalação desses equipamentos nos aterros sanitários do Brasil.

Srinivasan, Mago e Krishnan (2010) também argumentam que os motores de combustão interna são as principais escolhas quando altas densidades de energia e eficiência são desejáveis. Devido à disponibilidade de combustível relativamente barato em décadas passadas, os motores de combustão interna haviam sido otimizados para altas densidades de energia e baixas emissões. No entanto, nos últimos anos, com a escalada dos preços dos combustíveis e a preocupação com a sustentabilidade, a eficiência do motor assumiu maior importância (SRINIVASAN; MAGO; KRISHNAN, 2010). Para melhorar a eficiência do motor e preservar o seu funcionamento, cabe reforçar a necessidade de tratamento do biogás, principalmente para uso veicular.

#### 4.3.3 Energia Veicular (Biometano)

A Resolução ANP nº 8/2015, em seu artigo 3º, conceitua biometano como "[...] biocombustível gasoso constituído essencialmente de CH<sub>4</sub>, derivado da purificação do biogás" (AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS, 2015). Para efeitos dessa Resolução, o biogás difere do biometano por ser um gás bruto. Quando purificado para atender as especificações

do gás natural, transforma-se em biometano e pode ser utilizado nos veículos adaptados para utilizar o GNV como combustível.

Para Rasi (2009), o biogás é considerado um biocombustível de CO<sub>2</sub> neutro. Se for utilizado como combustível veicular, emite menores quantidades de óxido de nitrogênio, hidrocarbonetos e CO do que os motores a gasolina ou diesel. Rasi (2009) reforça ainda que o interesse no uso de biogás como combustível para veículos e em células de combustível é crescente, mas, se for utilizado para esses fins, precisa passar por um processo exigente de purificação de modo a remover, principalmente, o sulfureto de hidrogênio e os compostos halogenados, comumente encontrados, que podem causar corrosão nos motores ou turbinas além de reduzir a eficiência do sistema.

Aos compostos já mencionados por Rasi (2009), Chernicharo e Stuetz (2009) acrescentam o siloxano, material presente em cosméticos, desodorantes, aditivos de alimentos e sabão, destacando que merece atenção. Durante o processo de combustão do biogás contendo esse elemento, pode ocorrer a formação de depósitos contendo sílica (SiO<sub>2</sub>) ou silicatos (SixOy), além de cálcio, enxofre, zinco e fósforo. Esses depósitos minerais provocam incrustações com espessuras variadas e precisam ser removidos por meio de métodos químicos ou mecânicos a fim de não causarem prejuízos físicos às instalações por onde passa o biogás (CHERNICHARO; STUETZ, 2009).

De acordo com exigências da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), a purificação do biogás proveniente de um sistema de biodigestão anaeróbia implica remover ou reduzir principalmente compostos, como o gás sulfídrico (H<sub>2</sub>S), o CO<sub>2</sub> e a água (H<sub>2</sub>O), a fim de promover o aumento do seu poder calorífico e elevar o potencial de CH<sub>4</sub>.

Henriques (2004) complementa que, dependendo da aplicação particular, além de necessitar de ajustes de modo que não contenha esses elementos prejudiciais, é preciso uma série de filtros para remover os compostos citados.

A remoção desses componentes inclui a retirada do CO<sub>2</sub> até que a porcentagem de CH<sub>4</sub> se aproxime à do gás natural, para assim ser utilizado para os mesmos fins. De acordo com a Portaria ANP n° 128/2001, a porcentagem mínima de CH<sub>4</sub> no gás natural para uso veicular deve ser de 86%, e máxima de CO<sub>2</sub>, de 5% (LOCAL

GOVERNMENTS FOR SUSTAINABILITY, 2009). Atualmente, essa Portaria foi substituída pela Resolução ANP nº 8/2015, a qual estabelece que a porcentagem mínima de CH<sub>4</sub> seja de 96,5 %, e máxima de CO<sub>2</sub>, de 3 %<sup>18</sup>.

A retirada do CO<sub>2</sub> do biogás é uma operação unitária em que um integrante da mistura é dissolvido em um líquido com carbonato de potássio, hidróxido de cálcio, hidróxido de sódio, entre outros. Dentre os métodos físicos podem-se destacar os crivos moleculares, a separação por membranas e as colunas de absorção. Esses métodos são muito utilizados por causa da facilidade de regeneração dos reagentes empregados no processo de absorção (WONG; BIOLETTI, 2002, apud LOCAL GOVERNMENTS FOR SUSTAINABILITY, 2009).

Segundo *Local Governments for Sustainability* (2009), os processos de remoção dos contaminantes do biogás são cada vez mais estudados a fim de se promover sua utilização. A aplicação para abastecimento da frota veicular de aterros sanitários é bem comum na Alemanha. No Brasil, esse tipo de aplicação começou no ano de 1985, quando a Companhia Municipal de Limpeza Urbana do Rio de Janeiro (Comlurb) utilizou o biogás como combustível veicular, chegando a dispor de uma frota de aproximadamente 150 veículos movidos a biogás, além de usá-lo no abastecimento de táxis.

Cunha (2016) acrescenta que, recentemente, empresários do setor de biogás começaram a abrir postos para abastecimento de frotas particulares com o biometano. A Fundação Parque Tecnológico de Itaipu, localizada em Foz do Iguaçu, desenvolve um projeto com biometano produzido em uma granja, projeto elaborado pelo CIBiogás e, com esse combustível, abastece mais de quarenta veículos da Itaipu Binacional. Esse tipo de aplicação também ocorre em ônibus de uma montadora ligada a esse projeto. No caso do biometano produzido em aterro, pode-se citar o combustível produzido na usina do Aterro Sanitário Dois Arcos, no Rio de Janeiro, cuja injeção ocorre em caminhões de coleta de lixo.

---

<sup>18</sup> Exceto Região Norte (AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS, 2015). Ver Nota 65.

#### 4.4 TECNOLOGIAS DO BIOGÁS APLICADAS NO ESTUDO

Conforme exposto nos itens anteriores, o objetivo de um projeto que visa à recuperação energética do gás CH<sub>4</sub> gerado em aterros sanitários é a sua conversão em energia útil, tais como vapor, aquecimento, combustível para caldeiras ou fogões, combustível para veículos ou geração de eletricidade. As tecnologias mais empregadas nesses processos são as de geração de eletricidade em cogeração ou uso direto.

Geração e cogeração de energia podem ser conceituadas como a geração simultânea de duas ou mais formas de prover energia útil a partir de uma única fonte (SZKLO; TOLMASQUIM, 2001). As tecnologias empregadas nesses processos já se desenvolveram e se consolidaram no mercado atual, permitindo uma diversidade de sistemas e potências com o uso de diferentes combustíveis, inclusive com o biogás (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2014c; VALENTE, 2015).

As principais tecnologias são os motores de combustão interna, as turbinas e microturbinas (PAVAN, 2010; LOBATO, 2011; VALENTE, 2015). Por essa razão, essas tecnologias são descritas em detalhes a seguir.

##### 4.4.1 Motores de Combustão Interna

De acordo com Valente (2015), os motores de combustão interna são máquinas que convertem a energia térmica de um combustível líquido ou gasoso em energia mecânica por meio do acionamento de pistões confinados em cilindros. Esses motores geralmente baseiam-se em dois tipos de ciclos: Otto e Diesel, ou motores de ignição por centelha e de ignição por compressão, respectivamente.

Os motores de combustão interna podem utilizar diversos combustíveis gasosos, tais como gás natural, propano, butano, biogás, gás de síntese, nafta química e outros; combustíveis líquidos, como álcool, gasolina, diesel, biodiesel, entre outros, e também admitem a mistura de ambos, ou seja, a mistura de combustíveis gasosos com líquidos, chamada de bicomcombustível, numa proporção que permita a autoignição (VALENTE, 2015).

Para Lobato (2011), a cogeração consiste em aproveitar o calor residual originado nos processos termodinâmicos de produção de energia elétrica, que, de outra forma, seria desperdiçado. Para uma aplicação secundária, esse aproveitamento pode dar-se sob a forma de vapor (água quente e/ou fria).

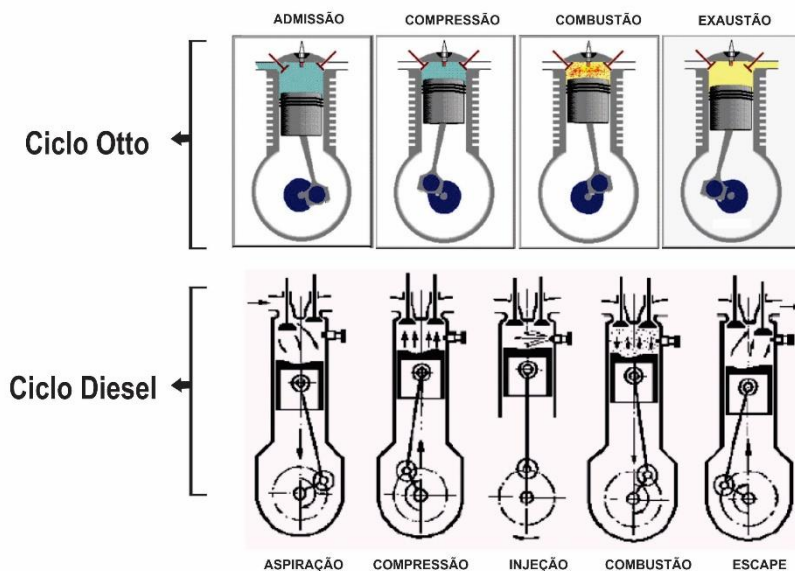
Por mais eficiente que seja a transformação da energia de um combustível em energia elétrica, a maior parte dessa energia é transformada em calor e perdida para o meio ambiente. Assim, por meio da cogeração, pode-se aproveitar esse calor antes perdido, elevando a eficiência energética do processo. Os motogeradores, seja de ciclo Otto seja de Diesel, apresentam eficiência de rendimento em torno de 30% a 40%, conforme já apresentado na Tabela 10. Geralmente atingem eficiências globais de 70% a 80% nas aplicações de cogeração de calor e eletricidade (LOBATO, 2011).

A principal diferença entre os ciclos Otto e Diesel consiste na forma de combustão. No ciclo Otto, a combustão acontece devido à explosão do combustível por meio de uma faísca na câmara de combustão, enquanto, no ciclo Diesel, a combustão ocorre por meio da compressão do combustível na câmara de combustão (PECORA, 2006). Na Figura 13, exemplificam-se ambos os processos.

Mendes (2005) afirma que a vantagem dos motores de combustão interna é a flexibilidade para implantar o sistema de geração, uma vez que podem ser de pequeno porte e ampliados conforme o crescimento da quantidade de gás gerado durante o período de vida útil do aterro.

Pavan (2010) complementa que o uso de motores de combustão interna é a alternativa mais adotada no aproveitamento de gases de aterro por seu baixo custo, facilidade de operação e manutenção e elevada eficiência quando aplicados em cogeração.

Figura 13 – Desenho esquemático do funcionamento de um motor ciclo Otto e ciclo Diesel



Fonte: Elaborado pela autora com base em dados de PECORA (2006).

#### 4.4.2 Turbinas

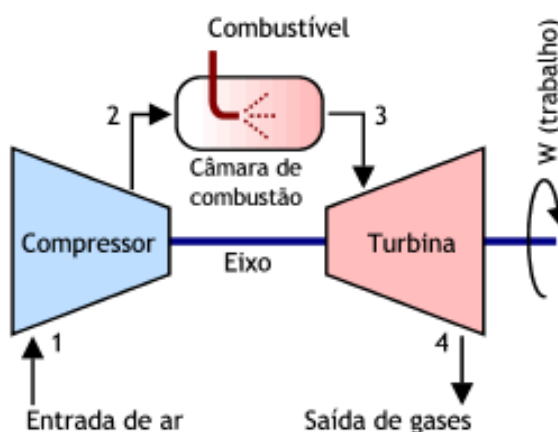
As turbinas a gás geralmente são utilizadas para geração de eletricidade quando existe um maior fluxo de gás de aterro, o que as torna ideais para grandes locais de disposição, com projetos de, no mínimo, 3 a 4MW (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2002, apud PAVAN, 2010). Nesse caso, a economia na produção elétrica e a eficiência do sistema crescem conforme a escala do projeto.

As turbinas a gás tendem a apresentar menos problemas de corrosão, no entanto têm maiores custos quando comparadas aos motores de combustão interna. Além disso, necessitam de gás com maior qualidade. A exigência de pressões muito maiores de gás na entrada ocorre pela necessidade de compressores de gás, com elevados custos de instalação e de operação (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 1996, apud MENDES, 2005; LOBATO, 2011).

Apesar de ser mais cara que os motores de combustão interna, a turbina a gás oferece muitas vantagens atrativas, tais como tamanho mais compacto, alta flexibilidade, confiabilidade, rapidez na partida, menos necessidade de mão de obra

para operar, além de melhor desempenho ambiental quando comparada à turbina a vapor e aos motores de combustão interna. Cabe ressaltar que também apresenta baixa eficiência, principalmente em carga parcial, mas é uma desvantagem que pode ser superada pela cogeração (GUPTA; REHMAN; SARVIYA, 2010). Na Figura 14 apresenta-se um esquema de como funciona esse equipamento.

Figura 14 – Desenho esquemático do funcionamento de uma turbina a gás



Fonte: MSPC (2016).

Conforme exposto na Figura 14, o combustível é fornecido para a câmara de combustão a uma pressão bem elevada, entre seis e onze atm, onde é queimado junto com o ar. A liberação de calor provoca a expansão dos gases, que, na sequência, movimentam a turbina, e esta, o gerador, produzindo energia. Para a produção combinada de eletricidade e calor, as turbinas a gás devem ser equipadas com uma unidade de recuperação de calor dos gases de exaustão, a fim de permitir a conversão em energia térmica (LOBATO, 2011).

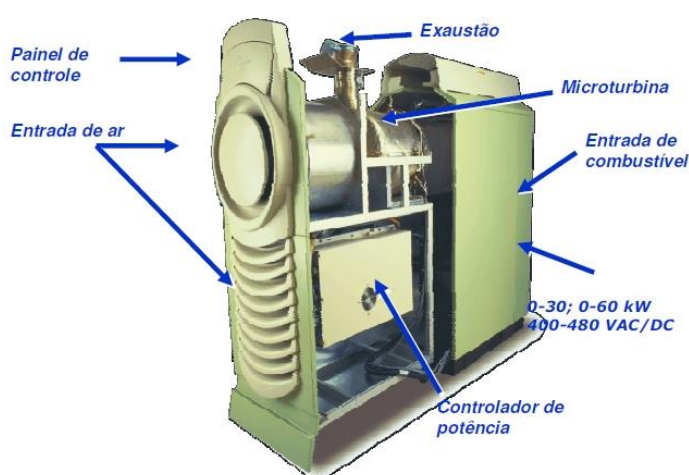
#### 4.4.3 Microturbinas a gás

As microturbinas consistem em pequenas turbinas de combustão operando na faixa de 20 a 250kW, com maiores velocidades de rotação e versatilidade no uso de diversos tipos de combustível, tais como o gás natural, o biogás, o gás liquefeito de

petróleo (GLP), o gás de poços de petróleo e plataformas *offshore*, diesel/gas oil e querosene (PECORA, 2006).

O processo nas microturbinas ocorre quando o ar é aspirado e forçado a seguir para o interior da turbina em meio a condições de alta velocidade e pressão. Assim, o ar mistura-se ao combustível e é queimado na câmara de combustão, local onde o processo de queima é administrado para obtenção de maior eficiência e menores níveis de emissão. Os gases gerados nesse processo são expandidos nas palhetas da turbina, produzindo trabalho. Os gases não aproveitados nesse sistema são exauridos para a atmosfera (PECORA, 2006). Na Figura 15 exemplifica-se esse processo.

Figura 15 – Componentes do sistema da microturbina



Fonte: Pecora (2006).

Pilavachi (2002) apresenta as características vantajosas da microturbina, que, por ser de pequeno porte, permite maior flexibilidade operacional, o que favorece a geração de energia em pequenas localidades e, com isso, a ampliação de regiões com potencial para a recuperação de biogás. Somada a isso, uma outra vantagem da microturbina é a redução nas emissões, especialmente de óxidos de nitrogênio, quando comparada aos motores de combustão interna e às turbinas de grande



porte<sup>19</sup>. Para Knowles e Lee (2012), recentemente, devido às melhorias técnicas na fabricação de turbinas mais robustas, as turbinas a gás podem atingir eficiência térmica entre 30% e 45% em ciclo simples (Ciclo Brayton), com temperaturas de entrada na turbina superior a 1.400C. A única desvantagem consiste em exigir um custo elevado para pequenas potências, decorrente da pequena escala de produção. No entanto, reforça-se a sua contribuição ambiental para reduzir emissões poluentes. Nesse aspecto, cabe informar que o Brasil assumiu importante compromisso na Convenção Quadro das Nações Unidas sobre as Alterações Climáticas, relacionado à participação dos resíduos.

Segundo a Lei nº 12.187/2009, que instituiu a Política Nacional sobre Mudança do Clima, juntamente com o seu Decreto Regulamentador nº 7.390/2010, o Brasil assumiu voluntariamente o compromisso de reduzir a emissão de gases de efeito estufa num patamar entre 36,09% e 38,90% até 2020. O artigo 5º desse Decreto informa que a projeção-base das emissões nacionais de gases de efeito estufa para o ano de 2020 é de 3.236 milhões tonCO<sub>2</sub>eq. Desse total, a redução do setor de Processos Industriais e Tratamento de Resíduos deve ser de 7,23%, ou seja, de 234 milhões de tonCO<sub>2</sub>eq (BRASIL, 2010b). Assim, salienta-se que o emprego das tecnologias mencionadas pode contribuir para auxiliar nessa questão.

#### 4.5 MODELOS TÉCNICOS PARA PREVISÃO DA GERAÇÃO DE GÁS

A previsão de geração de gás é essencial para a avaliação técnica e econômica que determina a viabilidade da implantação de projetos de aproveitamento de gás de aterros sanitários, mas, terminada a fase de projeto, é importante, sobretudo, para auxiliar na gestão e controle das emissões de gases nesses locais (ABREU, 2014).

Para Lamborn (2012), os modelos de previsão de gás mais simples consideram somente o crescimento microbiano e a degradação. Já os modelos de maior complexidade consideram tanto o crescimento microbiano e a degradação como o

---

<sup>19</sup> As emissões ficam num patamar abaixo de 9 ppm, enquanto para turbinas a gás elas são de 50 ppm. No caso de motores de combustão interna, as emissões podem atingir até 3.000 ppm (PILAVACHI, 2002).

líquido, o transporte de gás e de calor por meio dos resíduos bem como as reações químicas ocorridas no interior do aterro.

Segundo Paraskaki e Lazaridis (2005), a literatura científica fornece vários modelos empregados para quantificar a produção de gases em aterros sanitários. Esses modelos incluem estimativas estequiométricas e cinéticas. Os cálculos estequiométricos permitem estimar a máxima produção teórica de biogás, considerando-se a reação de decomposição anaeróbia da matéria orgânica (cálculos estáticos). Os cálculos cinéticos são realizados por modelos empíricos que, baseados em equações matemáticas, simulam os processos biológicos e físico-químicos primários da produção de biogás no aterro sanitário.

Fernandes (2009) orienta que, para a utilização dos modelos matemáticos, é de fundamental importância a caracterização química dos resíduos. Assim, pode-se obter o potencial de produção teórica do biogás. No caso de ausência desses dados, pode-se ainda utilizar de forma indireta a composição gravimétrica dos resíduos.

Fernandes (2009) salienta ainda que, embora existam diversos modelos para estimar a produção de biogás, todos podem ser utilizados para desenvolver uma curva de geração que prediz a geração de gás por um período de tempo. Tanto a produção total de gás quanto a taxa em que os gases são gerados podem sofrer variações conforme o modelo utilizado, porém a quantidade do resíduo presumido passível de decomposição é o parâmetro de entrada mais importante e comum a todos os modelos.

Para Scharff e Jacobs (2006), os modelos de previsão de geração de gás de aterro mais utilizados são os monofásicos e os multifásicos de primeira ordem, os quais descrevem o decaimento de geração de  $\text{CH}_4$  durante um período de tempo. Porém, esses modelos necessitam de validação em regiões que apresentam diferenças climáticas e de caracterização dos resíduos. Nesse caso, a validação dos modelos é necessária e pode ocorrer por meio das medições de gás coletado, considerando-se a eficiência na coleta e a oxidação do  $\text{CH}_4$ . No Quadro 5 apresentam-se os principais modelos teóricos de geração de biogás.

Quadro 5 – Modelos teóricos para geração de biogás

<b>Modelos Teóricos</b>	
<b>Modelos Monofásicos</b>	Modelo TNO
	Modelo LandGEM (USEPA)
<b>Modelos Multifásicos</b>	Modelo TNO Multifásico (Afvalzorg)
	Modelo EPER Francês
	Modelo IPCC, 2006 e Banco Mundial

Fonte: Abreu (2014).

Conforme descrito por Abreu (2014), os modelos monofásicos consideram a matéria orgânica contida nos aterros em sua totalidade com uma taxa constante de degradação, obtida a partir da média da quantidade de carbono biodegradável que cada tipo de resíduo contém nessa mistura. Os modelos multifásicos dividem os RSU em diferentes grupos, conforme sua respectiva taxa e potencial de degradação.

Embora este trabalho utilize o Modelo LandGEM em sua metodologia, os modelos recomendados pelo Banco Mundial e pelo IPCC também serão apresentados porque utilizam equações cinéticas de primeira ordem e têm os mesmos parâmetros de entrada, conforme indicado por Borba (2006):

- massa de resíduos inserida no aterro anualmente;
- tempo de atividade do aterro e/ou após o fechamento;
- taxa de geração de CH<sub>4</sub> (k);
- potencial de geração de CH<sub>4</sub> (L<sub>0</sub>).

O parâmetro L<sub>0</sub>, relativo à capacidade potencial de geração de CH<sub>4</sub>, depende somente do tipo de resíduo contido nos aterros e varia entre 5 e 310m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/t resíduo. O valor de L<sub>0</sub> é proporcional à quantidade de matéria orgânica presente, ou seja, quanto mais elevado o conteúdo orgânico, maior será também o valor de L<sub>0</sub> (ABREU, 2014).

A taxa de geração de CH<sub>4</sub>, representada pela variável "k", determina a velocidade de geração do biogás e de esgotamento do vazadouro. "É função da umidade do resíduo, tipo de resíduo, disponibilidade de nutrientes para o processo anaeróbico, pH e temperatura" (BORBA, 2006, p. 18). Assim, segundo a Empresa de Pesquisa Energética (2014b), quanto maior o valor de k, mais elevada será a taxa de geração de CH<sub>4</sub>. Todavia, após a estabilização da matéria orgânica contida nos aterros, essa taxa tende a cair.

Abreu (2014) afirma ainda que as taxas mais rápidas ( $k = 0,2$  ou uma meia-vida de aproximadamente 3 anos) associam-se a condições de umidade elevada e materiais rapidamente degradáveis, como restos alimentares. As taxas mais lentas ( $k = 0,03$  ou uma meia-vida de aproximadamente 23 anos) estão associadas a aterros de resíduos secos e resíduos de degradação lenta, tais como a madeira e o papel.

#### 4.5.1 Metodologia do Banco Mundial

A metodologia do Banco Mundial utiliza o Modelo *Scholl-Canyon*, caracterizado como um modelo cinético de primeira ordem e embasado na premissa de que há uma fração constante de material biodegradável no aterro por unidade de tempo (ABREU, 2014). Esse modelo é representado pela Equação 1, conforme segue:

$$Q_{(\text{CH}_4)_i} = k \times L_0 \times m_i \times e^{-k \cdot t} \quad (1)$$

Onde:

$Q_{(\text{CH}_4)_i}$  = metano produzido no ano  $i$  a partir da seção  $i$  dos resíduos ( $\text{m}^3/\text{ano}$ );

$k$  = taxa de geração de metano ( $\text{ano}^{-1}$ );

$L_0$  = potencial de geração de metano ( $\text{m}^3\text{CH}_4/\text{t}$  resíduos);

$m_i$  = massa de resíduos despejada no ano  $i$  ( $\text{t}/\text{ano}$ );

$t$  = anos após o fechamento.

Os valores indicados para a constante de geração de  $\text{CH}_4$  ( $k$ ) sofrem variações de acordo com a precipitação anual, conforme elencados na Tabela 11.

Tabela 11 – Valores de  $k$  sugeridos pelo Banco Mundial conforme precipitação anual

Precipitação anual	Campo dos valores $k$ ( $\text{ano}^{-1}$ )		
	Relativamente inerte	Moderadamente degradável	Altamente degradável
< 250 mm	0,01	0,02	0,03
> 250 e < 500 mm	0,01	0,03	0,05
> 500 e < 1000 mm	0,02	0,05	0,08
> 1000	0,02	0,06	0,09

Fonte: Abreu (2009).

Tanto para Borba (2006) como para Abreu (2014), o potencial de geração de CH<sub>4</sub> (L<sub>0</sub>) representa sua produção total por tonelada de resíduo. Valores típicos para esse parâmetro podem variar de 125m<sup>3</sup> a 300m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub> por tonelada de resíduo.

O Banco Mundial sugere ainda o uso de um valor preestabelecido de L<sub>0</sub> de 170m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub>/t de resíduos ou valores, conforme apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Valores de L<sub>0</sub> em função da degradabilidade do resíduo

Categorização do resíduo	Campo dos valores L <sub>0</sub> (m <sup>3</sup> de CH <sub>4</sub> /t RSU)	
	Valor mínimo	Valor máximo
Relativamente inerte	5	25
Moderadamente degradável	140	200
Altamente degradável	225	300

Fonte: Abreu (2009).

Nota: Dados adaptados pela autora.

Abreu (2014) e Borba (2006) mencionam ainda que a Equação 1 não permite uma representação adequada de aterros de RSU ativos, uma vez que, nesse caso, a exponencial da equação assume o valor um (1), o que fornece para aterros sem grandes inserções anuais de resíduos uma geração constante de CH<sub>4</sub>. Tal situação independe do tempo de atividade do aterro.

#### 4.5.2 Metodologia do IPCC

As instruções do IPCC sugerem dois métodos para estimativa das emissões de CH<sub>4</sub> originadas em aterros: (1) o método simplificado, embasado na suposição de que o total de CH<sub>4</sub> potencial é liberado durante o ano em que se produz a disposição dos resíduos, representado pela Equação 2, e (2) o método de decomposição de primeira ordem, representado pelas Equações 3 e 4. Este último método gera um perfil de emissões que depende do tempo transcorrido e que retrata melhor as legítimas pautas do processo de degradação ao longo do tempo (BORBA, 2006; ABREU 2014).

$$\text{CH}_4\text{gerado}[\text{t/ano}] = \sum [(A \times k \times \text{RSU}_T(x) \times \text{RSU}_F(x) \times L_0(x)) \times e^{-k(t-x)}] \quad (2)$$

$$\text{CH}_4\text{emitido} \left[ \frac{\text{t}}{\text{ano}} \right] = [\text{CH}_4\text{gerado} - R(t)] \times (1 - \text{OX}) \quad (3)$$

$$L_0 = \text{FCM}(x) \cdot \text{COD}(x) \cdot \text{COD}_F \cdot F \cdot 16/12 \quad (4)$$

Onde:

$t$  = ano de realização do inventário (ano);

$x$  = ano de contribuição (desde o início de atividade até  $t$  em ano);

$A = \frac{(1-e^{-k})}{k}$  = fator de normalização para corrigir a soma (adm.);

$k$  = constante de geração ( $\text{ano}^{-1}$ );

$\text{RSUT}(x)$  = total de RSU gerado no ano  $x$  (t/ano);

$\text{RSUF}(x)$  = fração de RSU depositada no aterro no ano  $x$  (adm.);

$\text{RSUT}(x)$  = massa de resíduos despejada no ano  $x$  (t/ano);

$L_0$  = potencial de geração de metano (t  $\text{CH}_4$ /t RSU);

$\text{FCM}(x)$  = fator de correção do metano no ano  $x$  (adm.);

$\text{COD}(x)$  = fração de carbono orgânico degradável no ano  $x$  (t C/t RSU);

$\text{COD}_F$  = fração do carbono orgânico degradável assimilada (adm.);

$F$  = fração de metano no gás do aterro (na ausência de dados 0,5) (adm.);

16/12 = conversão de carbono a metano (adm.);

$R(t)$  = quantidade de metano recuperada no ano  $t$  (t  $\text{CH}_4$ /ano);

$\text{OX}$  = fator de oxidação (adm.).

Borba (2006) acrescenta ainda que a Equação 2 não permite uma representação pertinente de aterros de RSU fechados, uma vez que a fração exponencial é sempre crescente, o que resulta num crescimento constante na geração de biogás. Por outro lado, se o ingresso de resíduos no aterro for considerado como zero, a equação é zerada.

#### 4.5.3 Metodologia LandGEM (USEPA)

Para Scharff e Jacobs (2006), o modelo matemático LandGEM é muito simples e direto. Por isso é amplamente utilizado e indicado como base para outros modelos,

como o USEPA. Felca e outros (2015) afirmam que é um modelo de primeira ordem elaborado pelo *Control Technology Center* (CTC) da *Environmental Protection Agency* (EPA) em 2005, empregado para contabilizar a quantidade e as variações na geração de gases em aterros, que calcula, além do CH<sub>4</sub>, a emissão de 49 outros componentes.

De acordo com Thompson e outros (2009), o LandGEM utiliza os mesmos cálculos do modelo *Scholl-Canyon*, porém a massa de resíduos é dividida por dez. A equação utilizada na versão 2.01 do LandGEM considera a geração de CH<sub>4</sub> por ano, de forma semelhante à do *Scholl-Canyon*. Entretanto, a equação da versão 3.02 considera a geração de CH<sub>4</sub> a cada 0,1 incremento de ano, produzindo apenas uma pequena redução na estimativa das emissões, se comparada à versão anterior.

Para Emkes, Coulon e Wagland (2015), o modelo LandGEM exige uma pequena quantidade de dados de entrada para gerar uma estimativa da evolução das emissões de gases de aterro cumulativos ao longo do tempo. Do mesmo modo, Felca e outros (2015) realizaram uma análise do LandGEM e do modelo sugerido pelo Banco Mundial. O resultado desse estudo revelou que ambos demonstraram ser eficazes para calcular a produção de biogás, mas o modelo LandGEM destacou-se como mais adequado pelo baixo custo e pela melhor resposta das variáveis utilizadas.

Nesse aspecto, após comparar diversos métodos, Mendes (2007) também confirma que o modelo LandGEM é considerado o mais apropriado para prever a geração de gases em aterros.

Pelos motivos argumentados, justifica-se o uso desse método no presente estudo e, assim, cabe aprofundar os detalhes relativos à sua utilização.

#### 4.5.3.1 Descrição do Modelo LandGEM

O modelo LandGEM é uma ferramenta com interface do *software Microsoft Excel*® cuja utilização pode estimar as taxas de emissão total de gases em aterros sanitários, sendo estes: CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, gases não metânicos e poluentes atmosféricos específicos de aterros de resíduos sólidos municipais.

O LandGEM compreende nove planilhas contidas em uma planilha eletrônica do software *Microsoft Excel*<sup>®</sup>. O nome das planilhas bem como suas funções estão apresentados no Quadro 6. As planilhas mais importantes para o cálculo da produção de CH<sub>4</sub> são: “entrada do usuário” (*User Inputs*), “resultados” (*Results*) e “gráficos” (*Graphs*).

Quadro 6 – Planilhas do LandGEM e suas funções

NOME	FUNÇÃO
<b>Introdução</b>	Visão geral do modelo e notas importantes sobre o uso do LandGEM.
<b>Entrada do usuário</b>	Inserção das características do aterro, dos parâmetros do modelo, seleção de até quatro gases/poluentes (gases de aterro total, metano, dióxido de carbono, gases não metânicos e 46 poluentes do ar), e taxas de aceitação de resíduos.
<b>Poluentes</b>	Edição das concentrações de poluentes atmosféricos e dos pesos moleculares existentes, com possibilidade de adicionar até dez novos poluentes.
<b>Entrada para a revisão</b>	Consultas e impressão por usuários dos dados utilizados pelo modelo.
<b>Metano</b>	Cálculo das estimativas de emissões de metano por meio da equação de primeira ordem da taxa de decomposição.
<b>Resultados</b>	Estimativas de emissões em tabela para até quatro gases/poluentes (selecionados em fase de entrada) em Mg/ano, de m <sup>3</sup> /ano e a escolha do usuário de uma terceira unidade de medida (média de ft <sup>3</sup> /min e m <sup>3</sup> /ano ou toneladas curtas por ano).
<b>Gráficos</b>	Estimativas e emissões em forma gráfica para até quatro gases/poluentes (selecionados em fase de entrada) em Mg/ano, de m <sup>3</sup> /ano e escolha pelo usuário de uma terceira unidade de medida (selecionada na planilha de resultados).
<b>Inventário</b>	Visualização, em tabela, das estimativas de emissões para todos os gases/poluentes para um único ano especificado pelo usuário.
<b>Relatório</b>	Permissão ao usuário para consultas e impressão de entradas e saídas do modelo em um relatório de síntese.

Fonte: *United States Environmental Protection Agency* (2015).

Nota: Adaptado pela autora.

Para estimar as emissões dos gases, esse modelo pode usar tanto os dados específicos do aterro como os parâmetros padronizados, no caso de ausência de alguns dados. O modelo reúne dois conjuntos padronizados de parâmetros: padrões *Clean Air Act* (CAA) e padrões de inventário (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2005).

O primeiro conjunto baseia-se em regulamentos federais norte-americanos para RSU de aterros daquele país (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2005). Mustafa, Mustafa e Mutlag (2013) indicam que o segundo modelo, relativo aos padrões de inventário, baseia-se na Compilação de Fatores de Emissão



de Poluentes do Ar (AP-42) da USEPA e pode ser utilizado para gerar as estimativas de emissão para uso em inventários de emissões atmosféricas, de modo a permitir testes específicos no local na ausência de dados. O modelo LandGEM é representado pela Equação 5.

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \cdot \sum_{j=0,1}^1 \cdot k \cdot L_0 \cdot \left(\frac{M_i}{10}\right) \cdot e^{-k \cdot t_{ij}} \quad (5)$$

Onde:

$Q_{CH_4}$  → geração anual de metano no ano de cálculo ( $m^3/ano$ );

$i$  → incremento de tempo de um ano;

$n$  → (ano do cálculo) - (ano inicial de aceitação de resíduos);

$j$  → incremento de tempo de 0,1 ano;

$k$  → taxa de geração de metano ( $ano^{-1}$ );

$L_0$  → potencial de geração de metano ( $m^3/Mg$ );

$M_i$  → massa de resíduos recebida no  $i$  ano ( $Mg$ );

$t_{ij}$  → idade da  $j^a$  seção de massa de resíduos  $M_i$  aceita no  $i$  ano.

Os parâmetros de nomenclatura CAA e AP-42 são empregados para o cálculo da geração de  $CH_4$  em aterros sanitários, conforme descrito no Quadro 7.

Quadro 7 - Parâmetros utilizados para estimar a geração de  $CH_4$  em aterros sanitários

Nome	Descrição	Utilização
AP-42	<i>Compilation of air pollutant emission factors</i> (Compilação de fatores de emissão de poluentes atmosféricos)	Parâmetros de $L_0 = 100 m^3/Mg$ de resíduos e $k = 0,02 ano^{-1}$ (regiões áridas < 635mm/ano) ou $k = 0,04 ano^{-1}$ (regiões áridas > 635mm/ano).
CAA	<i>Clean Air Act</i> (Lei do Ar Limpo)	Parâmetros de $L_0 = 170 m^3/Mg$ de resíduos e $k = 0,02 ano^{-1}$ (regiões áridas 635 mm/ano).

Fonte: *United States Environmental Protection Agency* (2005).

Cabe mencionar que os parâmetros do Quadro 7 foram alcançados a partir de resultados de uma série de dados de monitoramento de aterros, especialmente no início do ano 1990, e de experimentos em laboratório regidos em condições subótimas de biodegradação (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2005).

Segundo Fernandes (2009), o programa LandGEM designa valores preestabelecidos para os parâmetros  $L_0$  e  $k$ , a fim de se obter uma avaliação prévia conservadora do aterro. Reforça, contudo, que esses parâmetros de entrada precisam ser selecionados com conhecimento das condições específicas e da localização geográfica do aterro.

Figueiredo (2012) também infere que os parâmetros  $L_0$  e  $k$  consideram as características do ambiente, tais como clima, tipo de resíduos, por exemplo, e acrescenta que são os dados mais importantes da Equação 5. De forma teórica, o fator  $k$  varia de 0,003 a 0,21 (ano<sup>-1</sup>). O fator  $L_0$  é proporcional à porcentagem de matéria orgânica presente nos resíduos e sofre variações de zero (ausência de material degradável) até 300m<sup>3</sup>/Mg.

Assim, por meio da quantidade de resíduos aterrados anualmente e das constantes de geração, pode-se incrementar o modelo, considerando-se cada incremento no valor de um ano. Dessa forma, obtém-se como resultado a taxa de geração de CH<sub>4</sub> em m<sup>3</sup>/ano. Para Fernandes (2009), a fim de se obter uma simulação mais precisa, é necessário calcular  $L_0$  e  $k$  nas condições locais do aterro.

Ressalte-se que existe uma importante característica observada no LandGEM, a qual compreende que, para uma quantidade de resíduos considerada num determinado ano, a quantidade gerada de gases é contabilizada somente no ano seguinte. Isso significa que os gases gerados no primeiro ano de deposição de resíduos são apurados apenas no segundo ano. Do mesmo modo, os gases gerados no último ano de deposição de resíduos são considerados exclusivamente no ano seguinte ao encerramento do aterro, o que justifica o pico de geração que ocorre nesse ano.

#### 4.5.3.2 Potencial de geração de metano: parâmetro $L_0$

O potencial de geração de CH<sub>4</sub>, representado pelo parâmetro  $L_0$ , depende somente do tipo e da composição dos resíduos dispostos em aterros. Quanto maior o teor de celulose dos resíduos, maior será o valor desse parâmetro (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2005).

Os valores padrões de  $L_0$  utilizados pelo LandGEM são representativos dos RSU. O valor dessa variável  $L_0$  é medido em unidades métricas de metros cúbicos por megagrama ( $m^3/Mg$ ) a fim de ser coerente com a CAA, conforme empregado na equação de taxa de decomposição de primeira ordem (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2005). Na Tabela 13, apresentam-se os cinco valores de  $L_0$  utilizados no LandGEM.

Tabela 13 – Valores de  $L_0$  determinantes do potencial de geração de metano

<b>Tipo de Emissão</b>	<b>Tipo do Aterro</b>	<b>Valor <math>L_0</math> (<math>m^3/Mg</math>)</b>
CAA	Convencional	170 (omissão)
CAA	Zona Árida	170
Inventário	Convencional	100
Inventário	Zona Árida	100
Inventário	Úmido (Biorreator)	96

Fonte: *United States Environmental Protection Agency* (2005).

#### 4.5.3.3 Constante de decaimento: parâmetro k

Conforme contido no manual LandGEM, versão 3.02, o parâmetro k determina a taxa de geração de  $CH_4$  para a massa de resíduos no aterro. Quanto maior o valor de k, mais rapidamente a taxa de geração de  $CH_4$  aumenta, e então decai ao longo do tempo. O valor de k é inicialmente uma função de quatro fatores: (1) teor de umidade da massa de resíduos; (2) disponibilidade de nutrientes para os microorganismos que decompõem os resíduos e geram  $CH_4$  e  $CO_2$ ; (3) pH da massa de resíduos; (4) temperatura da massa de resíduos (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2005).

Ensinas (2003) afirma que a constante de decaimento k está associada ao tempo que a fração de carbono orgânico degradável (COD) do resíduo leva para decair à metade de sua massa inicial, podendo ser obtida por processo iterativo, quando se tem a vazão de gás  $CH_4$  do aterro, o valor de  $L_0$  e a quantidade e o tempo de deposição dos resíduos no local.

Os valores padronizados da constante k usados no modelo LandGEM estão listados na Tabela 14.

Tabela 14 – Valores da constante de decaimento k

<b>Tipo padrão</b>	<b>Tipo de Aterro</b>	<b>Valor k (ano<sup>-1</sup>)</b>
CAA	Convencional	0,05 (omissão)?
CAA	Zona Árida	0,02
Inventário	Convencional	0,04
Inventário	Zona Árida	0,02
Inventário	Molhado (Bioreator)	0,7

Fonte: *United States Environmental Protection Agency* (2005).

#### 4.5.3.4 Resultados do LandGEM em literatura científica

De forma geral, a literatura científica apresenta diversos valores para os parâmetros k e  $L_0$ . Esses valores variam conforme o estudo e a metodologia desenvolvida pelos pesquisadores.

Brito Filho (2005) salienta que a USEPA designa valores estabelecidos previamente para cada um dos parâmetros k e  $L_0$ , com vistas a uma avaliação preliminar conservadora do aterro. Todavia, esses parâmetros de insumo devem ser selecionados com conhecimento das condições específicas do aterro e da sua localização geográfica. Na América Latina e Caribe, por exemplo, o conteúdo orgânico do resíduo, a presença de umidade e o grau de compactação variam e, na maior parte dos casos, aumentam o potencial para a geração de gás em relação ao resíduo tipicamente encontrado na América do Norte e na Europa.

Faour, Reinhart e You (2007) realizaram estudos em aterros nos Estados Unidos da América (EUA) e utilizaram o LandGEM para a regressão de dados e a geração de estimativas de parâmetros k e  $L_0$ . Argumentaram que o LandGEM foi selecionado por ser um modelo simples, com bom ajuste de dados, e por ser indicado pela USEPA como Modelo de Emissões de Gás de Aterro. Assim, os autores utilizaram três formas para determinar os parâmetros do modelo para três diferentes tipos de dados: (1) análise de dados de longo prazo dos aterros, com o acompanhamento da deposição de resíduos em períodos de tempo mais curtos; (2) análise de dados de

longo prazo dos aterros, com a análise da deposição de resíduos por períodos de vários anos; (3) análise de dados de curto período, realizada com aterros úmidos. Todavia, embora sem a disponibilidade dos dados relativos ao teor de umidade específico desses locais, os registros indicam a ocorrência de recirculação de chorume e adição de umidade.

Os aterros identificados como SSWMC, ATERRO A e CSWMC utilizaram a análise de dados dos aterros de longo prazo, a qual inclui deposição de resíduos ao longo de vários anos. Como resultado, foram obtidos, para o aterro SSWMC, um  $k = 0,21$  ( $\text{ano}^{-1}$ ) e  $L_0 = 115$  ( $\text{m}^3/\text{ton}$ ), para o ATERRO A, um  $k = 0,11$  ( $\text{ano}^{-1}$ ) e  $L_0 = 95$  ( $\text{m}^3/\text{ton}$ ), e para o aterro CSWMC, um  $k = 0,12$  ( $\text{ano}^{-1}$ ) e  $L_0 = 87$  ( $\text{m}^3/\text{ton}$ ).

Assim, os parâmetros são utilizados de acordo com as condições da região de estudo e as características dos aterros nessas localidades. No Brasil destacaram-se para esse trabalho as pesquisas de Fernandes (2009), em aterros sanitários de Belo Horizonte (MG), e Gervázio e outros (2010), em aterros localizados no Espírito Santo (ES).

No estudo de Gervázio e outros (2010), o modelo LandGEM foi utilizado para obter a avaliação da produção de  $\text{CH}_4$  em três aterros no Espírito Santo: (1) aterro Brasil Ambiental, em Aracruz, (2) aterro CTRVV, em Vila Velha, e (3) aterro Marca Ambiental, em Cariacica.

No primeiro aterro, a partir de coleta *in loco* e medições realizadas nos drenos e na superfície das células do aterro, Gervázio e outros (2010) calcularam o valor  $L_0 = 79,18$   $\text{m}^3\text{CH}_4/\text{ton}$  RSU, conforme metodologia do IPCC (1996). Em seguida, compararam o valor de  $L_0$  calculado com o valor teórico previsto pelo Banco Mundial ( $L_0 = 140\text{m}^3\text{CH}_4/\text{ton}$ . RSU) em função da degradação dos resíduos. Os resultados obtidos apontaram que o potencial de geração de  $\text{CH}_4$  teve seu valor triplicado com  $L_0 = 140\text{m}^3\text{CH}_4/\text{ton}$ . RSU, elevando conseqüentemente sua produção. A taxa de geração de  $\text{CH}_4$  obteve um valor de  $k = 0,17$ , uma vez que se constatou a atividade de recirculação de chorume no local, precipitação anual em torno de 1.300mm e massa orgânica em cerca de 60% dos resíduos, o que conferiu a classificação como aterro úmido por parte da administração.

Ainda nessa pesquisa, Gervázio e outros (2010) adotaram um teor de 55% de  $\text{CH}_4$  com o objetivo de melhorar a visualização da curva de  $\text{CH}_4$  nos gráficos gerados,

uma vez que, ao considerar uma composição de 50% de CH<sub>4</sub> e 50% de CO<sub>2</sub>, essas curvas ficariam sobrepostas. A comparação dos valores gerados para diferentes L<sub>0</sub> permitiu notar um crescimento significativo da taxa de produção anual de biogás. O ano de 2009 pode ser destacado como exemplo, pois, para 109.200 toneladas de resíduos recebidos calculou-se uma produção anual de CH<sub>4</sub> de 2,594 x 10<sup>3</sup>ton equivalente a 3,889x10<sup>6</sup>m<sup>3</sup>, com o emprego de L<sub>0</sub> = 79,18, ao passo que, para L<sub>0</sub> = 140, a produção anual foi de 6,88x10<sup>6</sup>m<sup>3</sup>. Como o L<sub>0</sub> representa o potencial de geração de CH<sub>4</sub>, verificou-se que seu valor foi quase dobrado, justificando, portanto, o crescimento da produção.

Nos demais aterros, CTRVV e Marca Ambiental, Gervázio e outros (2010) utilizaram valores teóricos de k e L<sub>0</sub>, ou seja, simularam uma aproximação entre os parâmetros encontrados nas medições da geração de gás verificada nos drenos e na superfície do aterro Brasil Ambiental. Dessa forma, em conformidade com *LandfillControl Technologies*, em *LandfillGas System Engineering Design Seminar* (1994, apud GERVÁZIO et. al., 2010), o valor de L<sub>0</sub> tem uma variação de 140 a 180 em climas úmidos. Assim, para o CTRVV, esses autores adotaram um L<sub>0</sub> = 140m<sup>3</sup>/ton de resíduo e k = 0,10 ano<sup>-1</sup> e, para o aterro da Marca Ambiental, um L<sub>0</sub> = 164m<sup>3</sup>/ton de resíduo e k = 0,10 ano<sup>-1</sup>.

Em ambos os aterros, Gervázio e outros (2010) empregaram também, como composição dos gases, o percentual de 50% para o CH<sub>4</sub> e 50% para o CO<sub>2</sub>, cujo resultado gráfico se apresentou com as curvas sobrepostas. Em relação à análise volumétrica da geração de biogás, a curva gerada no gráfico da CTRVV se apresentou mais suave<sup>20</sup>. Essa diferença pode ser explicada pelo potencial de geração de CH<sub>4</sub> (L<sub>0</sub>) adotado pelas empresas e pela quantidade de resíduos depositada anualmente, uma vez que a CTRVV utiliza um L<sub>0</sub> menor que o utilizado pela Marca Ambiental e dispõe de menor quantidade de resíduos depositados anualmente.

Por outro lado, Fernandes (2009) realizou uma pesquisa em aterro sanitário experimental de Belo Horizonte e calculou o L<sub>0</sub> com base na composição gravimétrica do resíduo depositado e nas condições de controle e operação do aterro. Não foi possível calcular o valor de K porque foram constatados valores muito

---

<sup>20</sup> Ver Gervázio e outros (2010), Figura 25 (Análise volumétrica da geração de biogás em m<sup>3</sup>/ano).

baixos relativos aos dados de vazão nos drenos de gás. O autor empregou, então, valores de  $k$  de outros aterros: Bandeirantes, em São Paulo ( $k = 0,0395 \text{ ano}^{-1}$ ) e Delta, em Campinas ( $k = 0,0283 \text{ ano}^{-1}$ ), conforme empregado por Ensinas (2003).

Para Ensinas (2003), a constante de decaimento ( $k$ ) relaciona-se com o tempo necessário para a fração de COD do resíduo decair à metade de sua massa inicial, que pode ser alcançada por meio de processo iterativo, quando se tem conhecimento da vazão de gás  $\text{CH}_4$  do aterro, do valor de  $L_0$  e da quantidade e do tempo de disposição do resíduo no local. Os valores de  $k$  e  $L_0$  estão dispostos tanto na Tabela 15 como na Tabela 16.

Tabela 15 – Valores de  $k$  obtido por Ensinas (2003)

Especificação	Valores de entrada		Produção de gás (t/ano)		
	$k$ ( $\text{ano}^{-1}$ )	$L_0$ ( $\text{m}^3/\text{ton}$ )	$\text{CH}_4$	$\text{CO}_2$	Total
Convencional	0,05	170	45	100	158
Áreas áridas	0,02	170	18	42	66
Inventário convencional	0,04	100	21	48	75
Inventário áreas áridas	0,02	100	11	25	38
Inventário áreas úmidas	0,7	96	142	320	498
$L_0$ calculado/ $k$ (Aterro Delta)	0,0283	84	13	29	45
$L_0$ calculado/ $k$ (Aterro Bandeirantes)	0,0395	84	18	40	63

Fonte: Fernandes (2009).

De acordo com Fernandes (2009), os valores obtidos por meio do LandGEM com o emprego do valor de  $k$  de outros aterros foram significativamente inferiores aos encontrados no aterro experimental com medição direta de vazão, quando deveriam ser maiores, uma vez que os valores obtidos com o LandGEM demonstram a taxa de geração teórica de biogás dentro do aterro. No entanto, esses valores se aproximaram quando empregados valores extremos para os parâmetros  $k$  e  $L_0$  indicados pelo programa, conforme inventário para áreas úmidas, mas, ainda assim, inferiores às medições *in situ*.

Em pesquisa realizada por Chakraborty e outros (2013) sobre o potencial de geração de energia de RSU, foram avaliados três aterros de Nova Deli na Índia, denominados Ghazipur (GL), Bhalswa (BL) e Okhla (OL). A emissão de  $\text{CH}_4$  por ano

foi estimada por meio do modelo LandGEM da *United States Environmental Protection Agency* (2005). Nesse estudo, tanto os RSU totais como os segregados dispostos nos aterros foram submetidos a várias tecnologias, tais como incineração, gaseificação/pirólise, combustível derivado de resíduos e gaseificação de plasma. Com a utilização da composição analisada de RSU, os potenciais de geração de  $\text{CH}_4$  ( $L_0$ ) para os resíduos totais foram calculados, respectivamente, como 79, 77 e  $82 \text{ m}^3/\text{ton}$  de resíduos para GL, BL e OL. O valor de  $k$  empregado foi de  $0,09 \text{ (ano}^{-1}\text{)}$ , tendo como base o clima do tipo tropical, conforme indicado pela metodologia do IPCC de 2006. Os volumes percentuais de  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$  no biogás foram considerados como 50% em cada.

Kumar e Sharma (2014) também realizaram estudos utilizando o modelo LandGEM para estimar a geração de emissões de gases de efeito estufa a partir de RSU depositados em aterros. As estimativas realizadas nessa pesquisa incluíram 23 cidades metropolitanas da Índia, entre elas Bhopal, Patna e Mumbai, para o período de 2001 a 2020.

Os valores de  $L_0$  calculados para essas cidades foram, respectivamente, de  $L_0 = 48,46$ ;  $41,29$  e  $44,30 \text{ m}^3/\text{ton}$ . Obteve-se valor de  $k = 0,08 \text{ (ano}^{-1}\text{)}$  para a cidade de Mumbai, avaliado como elevado em relação aos das demais cidades, e precipitação anual média, considerada a mais alta entre as 23 cidades metropolitanas analisadas. As cidades de Bhopal e Patna apresentaram um  $k$  de  $0,05 \text{ (ano}^{-1}\text{)}$ . Na Tabela 16, Oliveira e Cardoso (2017) sintetizam os parâmetros adotados nos estudos mencionados.



Tabela 16 – Características de aterros sanitários em alguns países

Local (País)	Aterro	Temperatura média externa (°C)	Precipitação anual (mm)	k (ano <sup>-1</sup> )	L <sub>0</sub> (m <sup>3</sup> /ton.)	Referências
DELAWARE (EUA)	SSWMC	10,1 <sup>(1)</sup>	948 <sup>(1)</sup>	0,21	115	(FAOUR; REINHART; YOU, 2007)
(EUA)	ATERRO	-	-	0,11	95	
DELAWARE (EUA)	CSWMC	10,1 <sup>(1)</sup>	948 <sup>(1)</sup>	0,12	87	
VILA VELHA (BRASIL)	CTRVV	24,7 <sup>(2)</sup>	1117 <sup>(2)</sup>	0,1	140	(GERVÁZIO et al., 2010)
CARIACICA (BRASIL)	MARCA AMBIENTAL	26 <sup>(3)</sup>	1200 <sup>(3)</sup>	0,1	164	
ARACRUZ (BRASIL)	BRASIL AMBIENTAL	28 <sup>(4)</sup>	1200 <sup>(4)</sup>	0,17	79,18	
BELO HORIZONTE (BRASIL)	DELTA	21,1 <sup>(5)</sup>	1491,3 <sup>(5)</sup>	0,0283	84	FERNANDES (2009)
	BANDEIRANTES	21,1 <sup>(5)</sup>	1491,3 <sup>(5)</sup>	0,0395	84	
	GHAZIPUR	25,2 <sup>(6)</sup>	755.40 <sup>(7)</sup>	0,09	79	
DELI (ÍNDIA)	BHALSWA	25,2 <sup>(6)</sup>	755.40 <sup>(7)</sup>	0,09	77	(CHAKRABORTY et al., 2013)
	OKHLA	25,2 <sup>(6)</sup>	755.40 <sup>(7)</sup>	0,09	82	
BHOPAL (ÍNDIA)		18,7 - 31,7 <sup>(8)</sup>	1147,50	0,05	48,46	(KUMAR; SHARMA, 2014)
PATNA (ÍNDIA)	-	19,6 - 31-4 <sup>(9)</sup>	1130	0,05	41,29	
MUMBAI (ÍNDIA)		22,4 - 31,8 <sup>(10)</sup>	2334,60	0,08	44,30	

Fonte: Oliveira e Cardoso (2017).

<sup>(1)</sup> <http://pt.climate-data.org/location/18254>; <sup>(2)</sup> <http://pt.climate-data.org/location/3163>;

<sup>(3)</sup> <http://www.incaper.es.gov.br/proater/municipios/Centrocerrano/Cariacica.pdf>; <sup>(4)</sup> <http://www.incaper.es.gov.br/proater/municipios/Nordeste/Aracruz.pdf>;

<sup>(5)</sup> Matias (2012); <sup>(6)</sup> <http://pt.climate-data.org/location/30/>; <sup>(7)</sup> Kumar e Sharma (2014); <sup>(8)</sup> <http://wwis.ipma.pt/pt/city.html?cityId=524>;

<sup>(9)</sup> <http://wwis.ipma.pt/pt/city.html?cityId=534>; <sup>(10)</sup> <http://wwis.ipma.pt/pt/city.html?cityId=226>.

## **5 REGULAÇÃO ECONÔMICA DOS SETORES DE SANEAMENTO, ENERGIA ELÉTRICA E GÁS NATURAL**

O referencial bibliográfico do presente estudo apresentou em capítulos anteriores as possibilidades para se gerar energia com o biogás, com ênfase na fonte proveniente dos RSU. Verificou-se com a literatura apresentada que é possível obter benefícios econômicos, socioambientais e técnico-operacionais por meio dessa atividade, além de se constatar sua contribuição como fonte renovável para complementar a matriz energética brasileira. Assim, faz-se essencial realizar a análise dos instrumentos legais e regulatórios que envolvem a questão, de modo a identificar as barreiras e as oportunidades que indiquem viabilidade no aproveitamento do biogás de RSU para geração tanto de energia elétrica como de combustível veicular. Para tal, cabe discorrer sobre a regulação e os setores envolvidos na cadeia produtiva do biogás: saneamento (RSU), energia elétrica e gás.

### **5.1. ASPECTOS GERAIS DA REGULAÇÃO**

De forma geral, regulação refere-se à variedade de atos normativos por meio dos quais os governos determinam exigências a serem cumpridas pelos agentes econômicos e/ou pelos cidadãos. Esses atos normativos podem ser de várias categorias, tais como leis, regulamentos, decretos, acordos, circulares, portarias e resoluções (ORGANIZAÇÃO PARA A COOPERAÇÃO E DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO, 1997; ALBUQUERQUE, 2006). Nesse aspecto, a literatura regulatória apresenta diversos conceitos, alguns dos quais foram selecionados e apresentados no Quadro 8.

Observando-se o Quadro 8, nota-se que a regulação está mais associada à premissa econômica. Todavia, segundo a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (1997), a regulação pode ser classificada em três tipos: (1) regulação econômica, na qual ocorre a interferência direta do governo nas decisões de mercado, como concorrência, preços, entrada ou saída de agentes no mercado; (2) regulação social, que visa proteger os interesses públicos, como a

saúde, a segurança, o meio ambiente e a coesão social como um todo; (3) regulação administrativa, que se refere a papelada e formalidades administrativas, denominada "burocracia", exigida pelos governos para documentar a aplicação das normas.

Quadro 8 – Conceitos e objetivos da regulação

<b>CONCEITO</b>	<b>PREMISSA</b>	<b>REFERÊNCIA</b>
Define o ato de regular como a ação de organizar determinado setor ligado às agências, bem como de obter controle sobre as entidades atuantes nesse setor.	Jurídica	(DI PIETRO, 2006)
A regulação, em seu amplo sentido, envolve toda forma de organização da atividade econômica por meio do Estado, tanto na forma de intervenção por meio das concessões de serviços públicos como no exercício do seu poder de polícia administrativo.	Econômica	(SALOMÃO FILHO, 2001)
São atos normativos, como leis, decretos, regulamentos, acordos, circulares, portarias e resoluções estabelecidos pelo governo, que devem ser cumpridos.	Econômica	(ORGANIZAÇÃO PARA A COOPERAÇÃO E DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO, 1997)
Padrão de intervenção do governo no mercado. Refere-se a impostos e subsídios de todos os tipos, controles legislativos e administrativos sobre preços, taxas e outras facetas da atividade econômica que sofrem interferência do Estado.	Econômica	(POSNER, 1974)
Refere-se a políticas em que o governo controla preços e/ou decide que empresas participam no mercado.	Econômica	(MATIAS, 2006)
É uma forma contemporânea de ação do Estado. Sem dúvida, é, atualmente, um dos principais instrumentos por meio do qual os governos promovem o bem-estar social e econômico dos seus cidadãos.	Econômica	(ALBUQUERQUE, 2006)
<b>OBJETIVO</b>	<b>PREMISSA</b>	<b>REFERÊNCIA</b>
Solucionar problemas de natureza econômica que o mercado por si não pode resolver, tais como a ocorrência de externalidades, sejam elas positivas ou negativas para a sociedade.	Econômica	(POSNER, 2010)
Controlar a estrutura e o funcionamento de alguns setores específicos, como transporte, energia (principalmente energia elétrica e gás natural), comunicação, água e saneamento básico.	Econômica	(ARAÚJO, 1997)

Fonte: Elaboração própria.

Para este trabalho, adota-se a definição da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (1997), que conceitua regulação como os vários atos normativos por meio dos quais os governos instituem exigências aos agentes econômicos e aos cidadãos, sob a perspectiva econômica. Nesse contexto, os setores que permeiam o presente estudo, saneamento (inclui RSU), energia elétrica e gás natural, por representarem um papel extremamente relevante para o

desenvolvimento e o crescimento econômico, estão vinculados à regulação econômica.

De acordo com Araújo (1997), as tarefas relativas à regulação econômica são tão antigas quanto a existência de sociedades organizadas em Estados. Desde as antigas civilizações da Babilônia, do Egito e da China até os dias atuais, uma parte significativa das normas e leis de cada sociedade tem como objetivo ordenar a atividade econômica de modo a garantir a prosperidade de todos.

Fundamentado nessa concepção, Araújo (1997) explica que, na realidade, não existe mercado operando sem alguma base de leis, normas e convenções sociais, que lhe conferem sua forma específica e até mesmo seu conteúdo. Todavia, no sentido moderno do termo, a literatura se tem baseado em situações nas quais órgãos e regulamentos existem para controlar a estrutura e o funcionamento de alguns setores específicos, como transporte, energia (principalmente energia elétrica e gás), comunicação, água e saneamento básico.

Joskow (2000) entende que esses setores se caracterizam por oferecer serviços básicos de infraestrutura, em relação aos quais os consumidores devem cumprir normas e pagar tarifas estipuladas por autoridades reguladoras e não pelas forças de mercado. Dessa forma, teoricamente, a influência direta do governo sobre tarifação, preços, políticas, normas para investimento e demais existe para garantir a qualidade dos serviços prestados.

Além de estarem subordinados à influência do governo, os setores de saneamento, energia elétrica e gás natural estão sujeitos a “externalidades”, ou seja, afetam a terceiros e geram impactos em outras atividades e setores. Para Varian (1997), a principal característica das externalidades é que existem bens de uso comum, com os quais as pessoas se importam e que não são vendidos nos mercados. Com base nessa ideia, Hall e Lieberman (2003) caracterizam tais bens como “bens públicos”, ou seja, aqueles providos pelo governo, uma vez que o mercado não pode e não deve fornecer, em decorrência de suas características exclusivas. Assim, o governo fica com a responsabilidade de fornecer esses bens, geralmente de forma não excludente.

De modo geral, os setores mencionados têm, no todo ou em parte, algumas características importantes: são considerados básicos para a vida econômica e

social; apresentam externalidades amplas, o que significa inferir que seus produtos ou serviços afetam terceiros ou a sociedade como um todo; possuem economia de escala ou escopo, abrangendo elevada quantidade de pessoas; constituem monopólios; necessitam de grandes investimentos, os quais são inerentes ao setor, ou seja, contam com ativos específicos e irreversíveis, que, uma vez empregados, os tornam reféns da atividade; são obrigados a fornecimento constante, por isso não podem parar de operar.

Assim, por constituírem as características citadas, os setores de energia elétrica e gás natural enquadram-se na categoria de monopólios naturais (transmissão e distribuição de energia elétrica, transporte de gás natural e distribuição de gás canalizado), com exceção do setor de RSU, o qual está incluído somente na categoria de monopólio (coleta, transporte e tratamento).

Assim caracterizados, são setores que necessitam de regulação para operar com mais qualidade e de maneira eficiente, uma vez que as características mencionadas, tais como externalidades, bens públicos e monopólios, inerentes aos setores estudados, se constituem como exemplos de falhas de mercado. “Uma falha de mercado ocorre quando um mercado, deixado por si só, é ineficiente” (HALL; LIEBERMAN, 2003, p. 291), o que justifica a necessidade de regulação.

Para Matias (2006), a justificativa teórica de maior relevância na visão econômica (embora não seja a única) para a atividade de regulação encontra-se no argumento de monopólio natural. Assim, cabe apresentar melhor esse conceito, apresentando também a diferença entre monopólio e monopólio natural.

### **5.1.1. Monopólio x Monopólio Natural**

Segundo Amaral Filho (2007), a ótica econômica considera monopólio a situação em que existe um único fornecedor de um bem ou serviço.

Por outro lado, Hall e Lieberman (2003) complementam o conceito de monopólio, inserindo também a ideia de substitutabilidade como elemento-chave no entendimento de monopólio.

Existe, geralmente, mais de uma maneira de satisfazer um desejo e um único vendedor de um bem ou serviço não é considerado um monopólio se outras firmas venderem produtos – substitutos próximos – que satisfaçam essa mesma preferência (HALL; LIEBERMAN, 2003, p. 292).

Assim, explicam que o monopólio puro existe quando há somente um vendedor de um bem para o qual poucos compradores poderiam encontrar um substituto, o que o difere de monopólio natural.

No caso, o termo “monopólio natural” decorre do fato de que, em determinadas situações, como, por exemplo, na prestação do serviço de energia elétrica (ou, de forma geral, nas chamadas “indústrias de rede”), a existência de um único fornecedor oferece vantagens de maior eficiência econômica, além de permitir menor custo na prestação do serviço (AMARAL FILHO, 2007).

Por outro lado, Hall e Lieberman (2003, p. 293) adicionam a esse conceito o fato de que “[...] um monopólio natural existe quando, devido a economias de escala<sup>21</sup>, uma firma pode produzir com um custo médio por unidade inferior ao que podem produzir duas ou mais firmas”. Em outras palavras, quando o conceito de monopólio está associado a economias de escala na situação de monopólio natural, não haveria diferença no custo do serviço se mais uma pessoa fosse inserida, uma vez que uma única firma já está produzindo para todos no mercado. Além disso, a firma ou o mercado no qual se opera é caracterizado como monopólio natural quando, “[...] a menos que o governo interfira, somente um vendedor sobrevive [...]” (HALL; LIEBERMAN, 2003, p. 293).

Em resumo, a situação de monopólio ocorre quando somente uma entidade opera em um mercado onde praticamente não existe substituto para algum produto ou serviço. Já o monopólio natural ocorre quando uma única entidade pode produzir por um custo menor do que o de duas ou mais firmas existentes.

A visão de “monopólio natural” não é recente. John Stuart Mill, na publicação do seu livro “Princípios de Economia Política”, em 1848, já havia percebido que os serviços de água e gás para iluminação e aquecimento, presentes em Londres, obteriam um

---

<sup>21</sup> Araújo (1997), por sua vez, complementa que, se um determinado bem ou serviço (não substituível facilmente) pode ser fornecido por uma única empresa para um mercado consumidor a menor custo que duas ou mais, com as tecnologias disponíveis, esse setor apresenta características de monopólio natural. Tal fato ocorre se existem economias de escala até volumes de produção suficientes da ordem da dimensão do mercado.

custo menor se fossem prestados sem duplicidade das instalações (AMARAL FILHO, 2007).

Para Kelman (2009), monopólios naturais devem ser exercidos visando ao bem-estar comum. No mundo todo, os sistemas jurídicos atribuem ao Estado tal responsabilidade, conhecida como titularidade. Nesse caso, dependendo do serviço e do sistema jurídico envolvido, o titular pode ser um ente federal (Constituição Federal/1988, artigo 21, inciso XX, alínea b), estadual (Constituição Federal/1988, artigo 25, § 2º) ou municipal. No caso do Brasil, o titular do serviço de energia elétrica é federal, o de distribuição de gás natural canalizado é estadual e o de saneamento é municipal (Lei Federal nº 11.445/2007). Este último ainda esbarra em controvérsias sobre sua titularidade ser estadual, municipal ou compartilhada, mas esse aprofundamento não cabe neste trabalho.

Por fim, neste estudo, o conceito de regulação é compreendido como a intervenção do Estado na economia e no meio social com o objetivo de se alcançarem eficiência e equidade, empregadas como universalização na providência de bens e serviços públicos de caráter essencial por parte de prestadores de serviço estatais e privados (ORGANIZAÇÃO PARA A COOPERAÇÃO E DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO, 1997).

Assim, torna-se imprescindível discorrer de forma mais aprofundada sobre o motivo de regular, bem como apresentar a relevância das atividades inseridas no contexto econômico da regulação, sobretudo para os setores de energia elétrica, gás e saneamento (inclui resíduos), uma vez que são o cerne desta pesquisa.

## 5.2. PRINCIPAIS MOTIVOS DA REGULAÇÃO

Salgado e Motta (2005, p. 4) afirmam que a regulação econômica de um mercado, alterando decisões de oferta e demanda, se justifica, sobretudo, no momento em que os mercados falham na emissão de sinais corretos de preço que iriam garantir as escolhas adequadas e, dessa forma, maximizar o bem-estar social.

Amaral Filho (2007) explica que a regulação estatal dos serviços de utilidade pública, como transporte, saneamento, energia elétrica, gás e outros, cuja atividade seja

indispensável à sociedade atual, está mais propensa a falhas por causa de duas características básicas: monopólio e essencialidade. A primeira é própria de situações em que existe um único fornecedor de um produto ou serviço, conforme já aludido. A segunda ocorre quando a atividade é de extrema relevância e necessidade para a sociedade (*affected with public interest*). Essas características influenciaram a ideia de regulação em vários locais do mundo.

A tradição centralizadora na França permitiu o surgimento da ideia de *service public*, direito de todo cidadão, que deve ser provido pelo Estado em garantia do bem comum. Na Grã-Bretanha e nos EUA, a desconfiança para com o Poder Central favoreceu um conceito mais distinto, o de *public utilities*, quando os serviços podem ser delegados a empresas privadas, mas com regulamentação e fiscalização social, também com interesse de garantir o bem comum. Em ambos os casos, existe o pressuposto de que os mecanismos de mercado não levarão por si sós a resultados aceitáveis econômica, social ou politicamente. Nos demais países, esse processo aproximou-se mais de um ou de outro modelo, com adoção de formas híbridas ou variadas (ARAÚJO, 1997).

Essa ideia de regulação evoluiu e, no sentido moderno do termo, a revisão da literatura concentra-se em situações nas quais a existência de órgãos e regulamentos é necessária para controlar a estrutura e o funcionamento de setores específicos, tais como transporte, energia, gás natural, comunicação, água, saneamento básico, entre outros (ARAÚJO, 1997).

Nesta pesquisa, parte dos setores dos serviços de utilidade pública estudados está inserida no conceito de monopólio natural, já explicado. Cabe reforçar que se trata de uma situação em que o interesse público é mais bem servido num monopólio regulado do que num meio de ampla concorrência. Amaral Filho (2007) salienta que, em certas ocasiões, como no caso da energia elétrica (ou nas chamadas “indústrias de rede”), a existência de um fornecedor único oferece mais vantagens, maior eficiência econômica e menor custo na prestação do serviço.

Nesse contexto, as atividades regulatórias desempenham um papel fundamental dentro do processo monopolista. Assim, Tolmasquim (2015) entende por atividade regulatória a competência para editar normas, tomar decisões discricionárias e



administrar conflitos que possam surgir num determinado setor. Essas decisões atrelam vários setores.

A importância da regulação econômica estatal torna-se clara quando é vista como uma alternativa à falta de competição, quando se entende que a competição não é possível além de não ser economicamente eficiente, sendo inevitável, portanto, o monopólio. A regulação estatal, então, desempenha um papel essencial, pois busca proteger a sociedade de práticas monopolistas, melhora o desempenho das empresas nos setores sob regulação, assegura o atendimento dos consumidores sem discriminação e fiscaliza o cumprimento dos padrões de qualidade estabelecidos por vários indicadores (AMARAL FILHO, 2007).

Posner (1974) resume a necessidade de regulação baseada em dois principais argumentos da teoria econômica: o primeiro é a teoria do “interesse” público, em que a regulação é fornecida em resposta à demanda pública para a correção de falhas ou práticas de mercado injustas; o segundo é a teoria da “captura”, em que a regulação é fornecida em resposta às exigências dos grupos de interesse que lutam entre si para maximizar os rendimentos dos seus membros.

Em resumo, sob a ótica teórica, a regulação existe para combater falhas de mercado, assegurar a competitividade, diminuir custos de transação intrínsecos à provisão de bens públicos, evitar assimetrias de informação entre agentes econômicos, combater externalidades negativas advindas dessas interações, universalizar serviços e promover o interesse dos consumidores (NUNES; RIBEIRO; PEIXOTO, 2007). Para se alcançarem tais objetivos, faz-se necessário o uso de instrumentos regulatórios, apresentados a seguir.

### 5.3. ASPECTOS ECONÔMICOS DA REGULAÇÃO

#### 5.3.1. Formas de regulação econômica

Segundo Salgado (2003), o ato de regular costuma concentrar-se em três pontos principais: preços, qualidade e condições de entrada e saída de agentes. Embora a regulamentação econômica possa adotar restrições sobre uma extensa variedade de

decisões das firmas, quatro decisões-chave estão sempre presentes: preços, quantidade, número de firmas e qualidade<sup>22</sup>.

#### 5.3.1.1. Regulação por preço

A decisão com base no controle de preços especifica um preço ou vetor de preços que as firmas podem cobrar, ou restringem as firmas na fixação de preços dentro de alguma amplitude<sup>23</sup>. De forma geral, as agências reguladoras fixam preços de modo que as firmas reguladas possam obter uma taxa de retorno padrão capaz de permitir a ampliação de acesso ao serviço prestado, investimentos, cobertura de custos operacionais e garantia de lucratividade.

Nesse aspecto, Araújo (1997, p. 6) enfatiza que “[...] a formação de preços é central à tarefa da regulação, pois concentra as questões sobre o excedente e sua distribuição”. Além disso, complementa que, dentre as funções do regulador, a fixação de regras tarifárias que conciliem o interesse dos consumidores e da firma regulada merece destaque.

Possas, Pondé e Fagundes (1997), Madeira (2010), Saiani e Toneto Jr. (2010) ressaltam que as regras de tarifação geralmente são o cerne da regulação nos setores de infraestrutura. Tais regras têm sido aplicadas comumente por meio de dois instrumentos: tarifação pela taxa de retorno e tarifação pelo preço-teto (*price cap*).

A tarifação por taxa de retorno estabelece um valor para cada serviço prestado, de modo a garantir à empresa regulada uma taxa de retorno que lhe assegure continuar atuando no mercado<sup>24</sup>. Na regulação por *price cap* inexistente a garantia de obtenção de uma taxa de retorno, pois se dá pela fixação de uma tarifa a ser utilizada para um

---

<sup>22</sup> CAMPOS, A. F. Regulação do setor petrolífero e de gás natural: parte I. 28 maio 2016, 13 jun. 2016. Notas de Aula.

<sup>23</sup> CAMPOS, A.F. Aula 1 informações adicionais: Economia da regulação. 02 mai.2016, 13 jun. 2016. Notas de Aula.

<sup>24</sup> “O cálculo pode ser feito da seguinte forma:  $R = CV + x(K)$ , em que R são as receitas, CV os custos variáveis (operacionais), K os ativos que serão remunerados e x a taxa de retorno, incluindo a depreciação. O valor da tarifa será igual a R” (MADEIRA, 2010, p. 137).

serviço específico, embasada numa fórmula<sup>25</sup> de reajuste periódico que inclui a inflação e os ganhos de produtividade.

A ideia central da aplicação desta fórmula está resumida na seguinte situação: a partir do preço contratado e das metas de produtividade fixadas para os anos seguintes, qualquer ocorrência relativa à diminuição real de custos, sendo mais elevada que as metas, pode beneficiar a firma. Assim, esta teria incentivos para reduzir custos (ARAÚJO, 1997).

Para Salgado (2003), entre os instrumentos de tarifação, o mais usual e implementado no Brasil é o regime de *price cap*. Esse regime objetiva estimular a eficiência produtiva, uma vez que confere ao regulador o poder de definir um teto para os preços médios ou para cada produto da firma, corrigido de acordo com a evolução de um índice de preços aos consumidores, subtraído de um percentual equivalente ao fator de produtividade, num período de anos prefixado.

Além desses modelos de regulação apresentados, embasados essencialmente em regras tarifárias, existe ainda a regulação pelo desempenho, conhecida como *yardstick competition* ou “regulação por comparação”. Esse modelo de regulação consiste na comparação de desempenho entre a empresa regulada e uma empresa fictícia, idealizada como referência, de modo que possibilite a avaliação dos níveis de produtividade, de qualidade, de investimentos, de custos e preços praticados pela prestadora diante de padrões de referência (ARAÚJO, 1997; SALGADO, 2003).

Esse tipo de regulação por desempenho, embora force a empresa regulada a alcançar determinado nível de eficiência, reduzindo a assimetria de informações entre regulador e regulado (MESQUITA; CAMPOS, 2013), também apresenta riscos que inviabilizam sua eficácia. Possas, Pondé e Fagundes (1997) e Toneto Jr. e Saiani (2012) explicam que, no caso da tarifação por taxa de retorno, podem existir dificuldades para avaliar os parâmetros que servem de base na determinação do preço. Isso pode causar desmotivação na busca por eficiência e redução de custos, uma vez que qualquer custo incorrido pelas prestadoras pode ser recuperado por meio de tarifas mais elevadas. Além disso, pode ocorrer também a superestimação de investimentos.

---

<sup>25</sup> Segundo Araújo (1997, p. 15), esta fórmula é conhecida por “IPC - X + Y”, onde IPC representa o índice de preços, X representa a produtividade e Y corresponde aos eventos não previstos.

#### 5.3.1.2. Regulação por quantidade

As decisões embasadas no controle da quantidade ocorrem por meio de metas quantitativas que devem ser atingidas num período de tempo determinado, visando à universalização dos serviços e ao alcance de certo número de consumidores.

#### 5.3.1.3. Regulação por controle de entrada e saída de firmas do mercado

O controle de entrada e saída é um instrumento regulatório que permite a criação de barreiras à entrada e à saída de agentes no mercado, por meio de concessões<sup>26</sup>. Para Salgado (2003), é um mecanismo essencial em determinadas circunstâncias, pois visa garantir a eficiência produtiva, que consiste na exploração das economias de escala por parte da firma monopolista, produzindo ao menor custo possível. Essa situação ocorre por meio de contratos, que, além de estipular prazos para a concessão, também devem disciplinar a saída de investidores, de forma a evitar prejuízos aos consumidores, no caso de a firma monopolista optar pela desistência da operação.

#### 5.3.1.4. Regulação por qualidade

Para Araújo (1997), outras tarefas regulatórias incluem a garantia de padrões de qualidade do serviço, além de impedir discriminações injustas entre consumidores, e o estímulo à eficiência e progresso técnico, além da exigência de serviço universal como direito de cidadania ou a fiscalização de externalidades. Tais objetivos fazem parte da regulação pela qualidade dos produtos, que pode ser alcançada, por exemplo, por meio de certificação governamental<sup>27</sup>.

---

<sup>26</sup> Conforme dispõe a Lei n.º 8.987/1995, artigo 2º, inciso II, concessão de serviço público é a delegação de sua prestação, feita pelo poder concedente, mediante licitação, na modalidade de concorrência, à pessoa jurídica ou a consórcio de empresas que demonstre capacidade para seu desempenho, por sua conta e risco e por prazo determinado (BRASIL, 1995a).

<sup>27</sup> Ver Nota 22.

Embora esses modelos de regulação apresentados evitem prejuízos para a população, cabe destacar que existem falhas inerentes ao processo que geram problemas regulatórios. Nesse aspecto, cabe inserir brevemente os principais problemas decorrentes da aplicação prática dessa atividade.

### **5.3.2. Problemas da regulação**

As falhas que podem ocorrer no mercado favorecem o surgimento de problemas inerentes à regulação. Para este estudo, procurou-se elencar brevemente os mais recorrentes: captura, assimetrias e subsídios cruzados.

Segundo Araújo (1997, p. 11), cada arranjo institucional apresenta “[...] vantagens e inconvenientes, e tende a refletir o marco político-institucional do país. Em todos os casos, entretanto, é possível identificar alguns elementos comuns. Há três atores sempre representados: firmas reguladas, governo, órgão regulador”. É a partir desses três principais elementos que ocorrem os problemas da regulação. Dessa forma,

[...] nota-se uma tensão e possível ambigüidade no papel do regulador: ele deve responder a interesses da sociedade, expressos diretamente por representantes de grupos de pressão ou através de escalões superiores do governo, e aos interesses das firmas reguladas, de modo a alcançar compromissos satisfatórios. Para tanto, necessita mandato bem definido, conhecimento técnico e meios materiais e humanos. Isto, no entanto, não lhe assegura o funcionamento sem distorções (ARAÚJO, 1997, p. 15).

Assim, Araújo (1997) destaca dois problemas decorrentes dessa interação, embora existam outros: tendências de certos grupos de pressão, representados diretamente ou através do governo, e tendências a favor das firmas reguladas. Em ambas as situações, diz-se que o regulador foi capturado. Na primeira situação, a captura dá-se através de mecanismos políticos ou administrativos. Na segunda, os mecanismos são mais sutis e estão de certo modo vinculados à assimetria de informação entre regulador e regulados, mais individualmente associados à questão do conhecimento técnico.

Pinto Jr. e Pires (2000) esclarecem que o problema da captura é a consequente perda da credibilidade da agência como arbitadora de conflitos, podendo ocasionar a elevação dos custos da regulação e a ineficiência. Em síntese, tal ocorrência faz

com que a regulação beneficie somente um específico grupo de interesse, em prejuízo de outros, resultando na alocação dos recursos de forma deficiente.

Outro problema recorrente é o de assimetria da informação, que ocorre porque existe uma assimetria essencial de informação entre o regulador e as firmas reguladas, que vai além do conhecimento técnico. Nessa situação, não há como o regulador ter conhecimento de todas as atividades de uma firma (ARAÚJO, 1997). Em decorrência disso, configura-se a impossibilidade de os agentes de um determinado setor, seja ofertantes seja demandantes, obterem acesso a importantes informações sobre aquela firma, para assim procederem à tomada de decisão mais adequada (MARINHO, 2006).

Em relação à dinâmica do processo, Proença e Prado (2011) apresentam alguns tipos de assimetria que podem ocorrer no ambiente regulatório, conforme exposto no Quadro 9.

Quadro 9 – Tipos de assimetria no ambiente regulatório

TIPOS DE ASSIMETRIA	DESCRIÇÃO
De informação	Empresas e concessionárias atuantes nos setores regulados detêm todo o conhecimento relativo ao seu negócio (informações técnicas, econômicas, concorrência, tendências mundiais, novas tecnologias e outros) e esse fato é inerente à atividade econômica.
De recursos técnicos e financeiros	Os quadros especializados e recursos disponíveis às prestadoras, tais como consultores, escritórios e técnicos, tendem a ser maiores dos que aqueles disponíveis às organizações de consumidores.
De oportunidades	Facilidade de acesso à agência pelo setor regulado, uma vez que os profissionais envolvidos no processo podem levar demandas ao regulador, tanto em reuniões externas (fóruns técnicos, congressos, simpósios, por exemplo) como no ambiente da agência.
De linguagem	Termos técnicos adotados no ambiente das Agências Reguladoras, o que torna difícil a compreensão por parte dos demais agentes envolvidos no processo.

Fonte: Elaborado pela autora com base em Proença e Prado (2011) e Instituto Brasileiro de Defesa do Consumidor – IDEC (2011).

Soma-se ao cenário de problemas regulatórios a situação que envolve a política regulatória, quando esta procura manter uma distribuição de rendas politicamente ótima. Ao longo de um período de tempo, a política incorre na tendência de compensar mudanças na distribuição ótima, conforme mudanças ocorridas nos processos de custo e demanda. Assim, em algum momento, a estrutura de preços adotada deverá permitir subsídios cruzados aos consumidores de alto custo a partir

das rendas geradas pelos preços cobrados de outros grupos (SALGADO, 2003; POSNER, 1974).

Em outras palavras, a ocorrência de subsídios cruzados dá-se quando os custos mais elevados de uma determinada atividade são providos por atividades nas quais os custos são menores, de modo que a média dos custos dessas atividades possa ser equilibrada para manter mais uniforme o valor da tarifa cobrada. Nesse aspecto, Posner (2000) acrescenta que alguns serviços não lucrativos podem ser ofertados por período indefinido, por meio do lucro de outros serviços.

Nesse contexto, argumenta-se que as agências reguladoras no Brasil desempenham um papel precário e que, dada a precariedade da estrutura regulatória, os contratos de concessões entre companhias estaduais e municipais, por exemplo, se apresentam incompletos, no que tange à definição de aspectos tarifários e à transparência de subsídios cruzados, o que eleva a possibilidade de captura, ineficiências e reduzido controle do serviço prestado (ARAÚJO, 1997; MOTTA; MOREIRA, 2006; TUPPER; RESENDE, 2004).

Como resultado de tal situação, observa-se a existência de sérios conflitos<sup>28</sup> regulatórios, que geralmente terminam de forma litigiosa. Menciona-se como exemplo o processo ocorrido entre agentes da indústria de gás natural, relativo à reclassificação de gasodutos de transporte (ou de transferência)<sup>29</sup>. Nesse conflito, questionou-se até mesmo a competência regulatória para determinar se um gasoduto seria de transporte ou de distribuição. Assim como essa, outras situações semelhantes ocorreram, no entanto, foge ao escopo deste estudo discorrer sobre elas.

Em síntese, os problemas regulatórios são amplos. Assim, na sequência, cabe apresentar algumas possibilidades que reduzem a ocorrência desses problemas.

---

<sup>28</sup> Reclassificação do gasoduto Atalaia-Fábrica de Fertilizantes Nitrogenados (Fafen) e reclassificação do gasoduto Aratu-Camaçari.

<sup>29</sup> Ver Nota 61.

### 5.3.3. Possibilidades de resolução dos problemas da regulação

Para evitar a ocorrência de falhas, Biener, Eling e Schmit (2014) apontam alguns critérios para que a regulação seja eficiente (Quadro 10). Em complementação às ideias referidas no Quadro 10, a OCDE apresenta uma lista de referências, publicada em 1995, a fim de auxiliar as decisões de regulação. Essas ideias foram incorporadas às Diretrizes para a Qualidade e Desempenho Regulador da OCDE em 2005 e abrangem os seguintes questionamentos: A regulação oferece um bom custo-benefício? A distribuição dos efeitos dentro da sociedade como um todo é transparente? A regulação é clara, consistente, compreensível e acessível? Todas as partes interessadas têm a oportunidade de expressar seus pontos de vista? Como se garante a conformidade às regulamentações? Os princípios inclusos nesses questionamentos visam garantir que as instituições reguladoras sejam transparentes e não discriminatórias.

Quadro 10 – Critérios para o bom desempenho da regulação

(Continua)

CRITÉRIOS	SUBCRITÉRIOS
1. A Regulação deve ser <b>adequada</b>	Os governos devem promulgar e aplicar leis que forneçam um quadro eficaz para a competitividade dos mercados.
	Os governos devem promulgar e aplicar leis que estabeleçam normas razoáveis como principal meio de proteger o público.
	Os governos devem estabelecer, tornar público, e fazer cumprir as regras e procedimentos adequados e consistentes para identificar e lidar com problemas financeiros.
	Os governos devem estabelecer uma agência reguladora que opere no interesse nacional e tenha recursos suficientes para atuar de forma independente, eficiente, eficaz e imparcial.
	Os governos devem desenvolver e implementar a regulamentação num ritmo de aplicação razoável.
2. A Regulação deve ser <b>imparcial</b>	Os governos devem garantir que a regulamentação seja aplicada com consistência e imparcialidade entre os agentes envolvidos, independente da sua nacionalidade.
3. A Regulação deve ser <b>minimamente invasiva</b>	Deve ser limitada ao motivo pelo qual é justificada, como uma proteção significativa e minimamente invasiva para realizar o seu propósito.
	Sujeita apenas a supervisão regulamentar essencial para proteger o público. Deve permitir o mercado determinar: (1) os serviços e produtos que devem ser desenvolvidos e vendidos; (2) Os métodos pelos quais serão vendidos; e (3) os preços que serão vendidos.
	Deve garantir que os clientes tenham acesso a informações suficientes para empoderá-los a fazer escolhas informadas e identificar os benefícios e o valor do seu produto.



Quadro 10 – Critérios para o bom desempenho da regulação

(Conclusão)

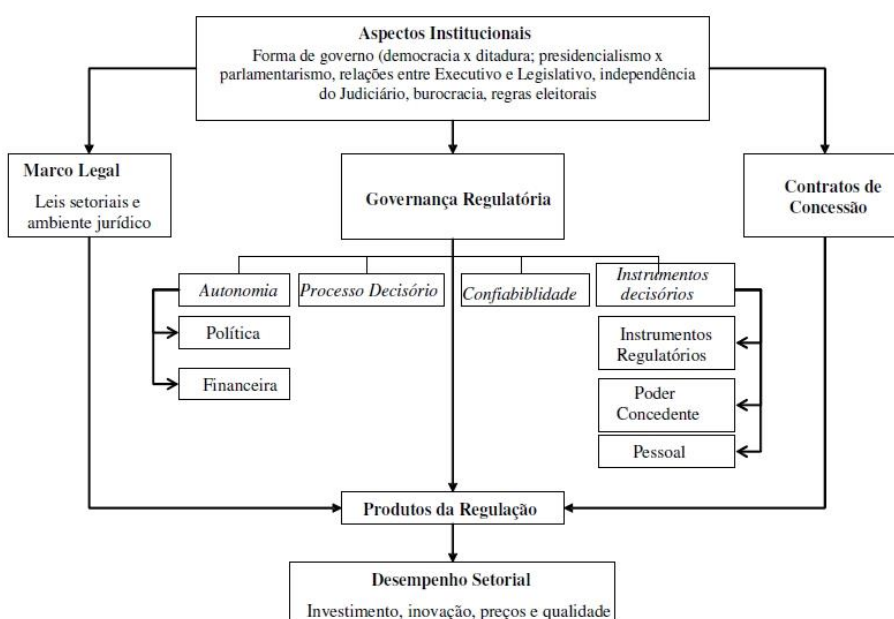
CRITÉRIOS	SUBCRITÉRIOS
4. A Regulação deve ser <b>transparente</b>	Os governos devem criar leis e regulamentos facilmente disponíveis ao público. Na elaboração de leis e regulamentos devem: (1) tornar disponíveis ao público; (2) convidar todos para comentar as propostas; (3) dar tempo suficiente para os envolvidos fornecerem comentários; (4) apresentar uma justificativa para todas as decisões; e (5) estabelecer e comunicar um processo justo pelo qual as decisões consideradas arbitrárias ou injusta possam ser contestadas.

Fonte: Biener, Eling e Schmit (2014).

Nota: Dados adaptados pela autora.

Em consonância com os princípios apresentados no Quadro 10, o Banco Mundial (2007) também apresenta uma estrutura de governança regulatória que deve dispor de (a) autonomia para exercer com eficiência os poderes estabelecidos no seu estatuto; (b) um processo decisório que garanta a consistência e evite arbitrariedades; (c) acesso aos meios e instrumentos regulatórios apropriados para tomar medidas e fazer cumprir as suas determinações; e (d) confiabilidade. Do contrário, "[...] a má governança regulatória leva à implementação incorreta de normas e contratos de concessão, influenciando o coeficiente entre risco e retorno dos projetos de infra-estrutura" (BANCO MUNDIAL, 2007, p. 43). Na Figura 16, exemplifica-se essa estrutura.

Figura 16 – Governança regulatória, eficiência e desempenho setorial



Fonte: Banco Mundial (2007).

Na sequência desse conteúdo, os setores de saneamento, energia elétrica e gás natural serão analisados de forma mais aprofundada, já que são os que estão vinculados ao aproveitamento energético do biogás de aterro.

#### 5.4. A REGULAÇÃO DE SERVIÇOS PÚBLICOS DE INFRAESTRUTURA APLICADOS NO ESTUDO

Os setores de infraestrutura, como os de saneamento, energia e gás, sempre tiveram importância estratégica no processo de crescimento e desenvolvimento do País. Tal como no passado, o ritmo de expansão e a qualidade dos serviços ofertados nesses setores permanecem fundamentais para sustentar a taxa de crescimento econômico de longo prazo (ARAÚJO JR., 2005).

Para Araújo (1997), os setores mencionados têm algumas características relevantes em comum, no todo ou em parte: seus produtos são considerados vitais para a vida econômica e social (são essenciais); apresentam externalidades significativas em sua operação, ou, em outras palavras, as transações do setor afetam terceiros ou a população; podem conter monopólios naturais, assim como complementaridades que favoreçam a coordenação sobre a competição; precisam de investimentos importantes, geralmente com longos prazos para retornos, além de ser específicos do setor, com custos irrecuperáveis.

Araújo Jr. (2005) complementa que os setores de saneamento, energia e gás natural são “indústrias de rede”. São assim denominados em função da estrita complementaridade que existe entre os segmentos de suas cadeias produtivas, cujos elos estabelecem graus de interdependência entre os componentes dessa rede, bem mais elevados do que aqueles existentes em outros tipos de indústria. Logo, a característica fundamental da “indústria de rede” é a fluidez do serviço dentro de uma estrutura física cujo formato são redes interligadas entre si.

Os segmentos estruturados em rede são também conhecidos como empresas “verticalmente integradas”, assim denominadas por realizarem boa parte das atividades da cadeia de suprimento. Quase todas as indústrias de rede não são, de

fato, “indústrias” no sentido tradicional do termo, mas, sim, prestadoras de serviços, como é o caso dos setores de infraestrutura (ARAÚJO, 1997).

Nos setores de infraestrutura, muitos deles associados aos serviços públicos, uma das falhas de mercado mais expressiva associa-se ao conceito de monopólio natural, já apresentado. São setores que necessitam de investimentos intensos em capital e, por isso, envolvem elevadas economias de escala<sup>30</sup> (quanto maior a quantidade de produção, menor o custo unitário) e, por vezes, de escopo<sup>31</sup>. Nesse cenário, para uma dimensão específica da demanda, só existe espaço para uma única empresa produzir de forma eficiente, ou seja, ao menor custo possível. Dessa forma, a regulação econômica define direitos exclusivos a um operador para que este potencialize essas economias. Em alguns casos, embora não ocorra monopólio, o nível da demanda permite apenas a atuação de poucas firmas, uma das quais é dominante e, portanto, se caracteriza como um mercado com baixo nível de concorrência (SALGADO; MOTTA, 2005).

De acordo com Bahiense (2003), a partir da década de 1990, o Brasil passou por uma transição institucional nos setores de serviços públicos, que até então eram caracterizados como monopólios estatais. Essa mudança se deu por três motivos principais: (1) escassez de recursos fiscais para financiar investimentos necessários; (2) baixo ritmo de inovações tecnológicas; (3) mudanças políticas e ideológicas que minimizaram restrições à propriedade privada de indústrias estratégicas, incentivando o aumento da participação dessas empresas nos serviços públicos.

Assim, ocorreu um processo de transição das empresas verticalmente integradas, consideradas como barreiras à introdução da competição, para um ambiente em que cada organização atuava de forma separada. Foi um processo conhecido como desverticalização, que consistiu na segregação entre atividades reguladas e livres com o intuito de extinguir falhas de mercado e definir claramente a atuação de cada agente, tendo como principal instrumento a separação de empresas verticalmente integradas (TOLMASQUIM, 2015).

---

<sup>30</sup> Economia de escala ocorre quando há maximização da produção a ponto de os custos unitários reduzirem à medida que se aumenta a produção, decorrente da diluição dos custos fixos em mais unidades produzidas (SALGADO, 2003).

<sup>31</sup> Economia de escopo ocorre quando “[...] a produção conjunta de uma única firma é maior do que a produção que poderia ser obtida por duas firmas diferentes cada uma produzindo um único produto” (PINDYCK; RUBINFELD, 1992, p. 222).

Nesse aspecto, a modificação do papel do Estado na economia brasileira, a partir da década de 1990, propiciou um novo aparato institucional constituído por órgãos de defesa da concorrência e agências reguladoras de serviços públicos recém-privatizados. Esses entes públicos foram criados por meio de princípios ordenadores da economia inscritos na Constituição Federal de 1988, quais sejam, a livre iniciativa, a livre concorrência e a defesa dos consumidores (BAHIENSE, 2003).

Nesse contexto, as agências reguladoras foram criadas para atuar sobre setores vitais da economia, assumindo diferentes estatutos jurídicos, desde sua subordinação à administração pública direta até sua existência como órgão independente (NOLL, 1984, apud NUNES; RIBEIRO; PEIXOTO, 2007). O modelo de regulação por agências independentes<sup>32</sup> foi o que mais se difundiu no Brasil.

Segundo Albuquerque (2006), as agências reguladoras brasileiras foram criadas no âmbito do Programa de Desestatização, a partir de 1990, e foram os pontos centrais da reforma regulatória. As agências foram criadas por lei e necessitaram de um marco legal geral para disciplinar-lhes a atuação. Nesse período foram criadas várias agências<sup>33</sup>. Destacam-se a Lei nº 9.427/1996, que criou a Aneel, e a Lei nº 9.478/1997, Lei do Petróleo, que criou a Agência Nacional do Petróleo (ANP)<sup>34</sup>. Essas Leis ainda serão mencionadas no decorrer deste capítulo por abarcarem os setores estudados nesta pesquisa.

Nesses cenários de criação das agências reguladoras, percebe-se que o setor de saneamento, que contempla também a administração dos resíduos, não sobressaiu. Embora a regulação de água e esgoto se tenha incorporado ao Plano Nacional de Saneamento Básico (Planasa) nos anos 1970, os resíduos foram negligenciados. Para Galvão Jr. e Paganini (2009), tal fato pode estar associado a fatores relacionados ao *deficit* desse tipo de serviços no País, que envolvia basicamente água e esgoto. Entre esses fatores, podem ser mencionadas a fragmentação de

---

<sup>32</sup> Este modelo de regulação deve atender os princípios de independência decisória, os quais incluem autonomia administrativa, orçamentária e financeira da entidade reguladora, além de transparência, tecnicidade, celeridade e objetividade das decisões (BRASIL, 2007).

<sup>33</sup> Agência Nacional de Telecomunicações - Anatel (Lei nº 9.472/1997); Agência Nacional das Águas - ANA (Lei nº 9.984/2000), entre outras.

<sup>34</sup> Posteriormente, a ANP recebeu novo nome, Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, conforme a Lei nº 11.097/2005.

políticas públicas e a carência de instrumentos de regulamentação e regulação, além da insuficiência e má aplicação de recursos públicos.

De fato, desde o final da década de 1980, o Brasil apresentava dificuldades no estabelecimento de políticas no setor de saneamento. O principal impasse para o estabelecimento dessa política ocorreu devido à interpretação da Constituição Federal de 1988 quanto à titularidade dos serviços nos sistemas integrados e nas regiões metropolitanas (GALVÃO JR.; PAGANINI; 2009).

Somente com a criação da Lei nº 11.445/2007 e do seu decreto regulamentador, o Decreto nº 7.217/2010, é que diretrizes nacionais para o saneamento básico foram estabelecidas, incluindo também a gestão dos resíduos, devido à preocupação ambiental. Mas a Lei nº 12.305/2010, que trata especificamente dos resíduos sólidos, só foi aprovada, e com muito esforço, após três anos da Lei de Saneamento, embora já tramitasse havia mais de vinte anos no Congresso Nacional.

Nesse cenário, percebe-se que as questões ligadas à gestão dos resíduos sólidos ainda são incipientes e, portanto, um caso à parte, uma vez que tal gestão é compartilhada entre Governo Federal, estados, Distrito Federal, municípios e particulares, o que amplia a dificuldade de articulação entre todos os entes envolvidos. Todavia esse assunto será tratado mais adiante, no item que aborda especificamente os marcos regulatórios desse setor.

Retomando o assunto relacionado aos setores de infraestrutura, cada setor apresenta um estágio diferente de desenvolvimento tecnológico e características inerentes ao nível de competição em alguns segmentos da prestação dos serviços. Dessa forma, os papéis da regulação assumem configurações diversas para cada setor (GALVÃO JR.; PAGANINI; 2009).

É importante esclarecer que, no setor dos RSU, embora os serviços públicos de limpeza urbana e manejo dos resíduos sólidos tenham sido incluídos no setor de saneamento básico com a instituição da Lei nº 11.445/2007, não se configuram como “indústria de rede” nem como monopólio natural<sup>35</sup>. Mesmo assim, o setor necessita de regulação, uma vez que esta é essencialmente necessária para garantir a oferta e a qualidade do serviço prestado, de modo a proteger o usuário

---

<sup>35</sup> Essas características são aplicadas somente ao setor de água e esgoto.

dos serviços e a assegurar que as obrigações e direitos das concessionárias sejam mantidos.

Embora não haja informações sistematizadas e detalhadas sobre a regulação do setor, há um consenso quanto à titularidade de os serviços serem de competência dos municípios, aos quais cabe também a responsabilidade de fiscalização (NOZAKI, 2007). Nesse sentido, a prestação dos serviços de limpeza e manejo dos resíduos sólidos pode ser feita de forma direta pelos municípios (por meio de consórcios), ou delegada a um ente privado ou público, conforme disposto nas Leis nº 8.987/1995<sup>36</sup>, nº 11.079/2004<sup>37</sup> ou nº 11.107/2005<sup>38</sup>. Essas questões serão tratadas com mais detalhes na sequência deste item.

No setor de energia, Salgado (2003) afirma que o modelo institucional adotado no Brasil definiu regras de entrada, tarifas e estrutura de mercado, tendo sido amplamente inspirado nas experiências americana<sup>39</sup> e britânica<sup>40</sup>. Segundo Pires (1999), os três pontos básicos do modelo do setor elétrico brasileiro são: 1) a competição nos segmentos de geração e comercialização; 2) a criação de instrumentos regulatórios visando à defesa da concorrência nos segmentos de competição (ações como a desverticalização, a definição de tarifas de uso da rede não discriminatórias e garantia do livre acesso nos sistemas de transmissão e distribuição); e 3) a inserção de mecanismos de incentivos nos segmentos que permaneceram como monopólios naturais (distribuição e transmissão). Além disso, criou-se, como no Reino Unido, o segmento de comercialização, formado por corretores e varejistas que compram de distribuidores e geradores a fim de venderem a grandes consumidores.

Na indústria de gás, a Petrobras exerceu o monopólio legal sobre as atividades de petróleo e gás natural por muitos anos no Brasil. Na lógica econômica de integração dessas indústrias, o modo de organização que prevaleceu foi a integração vertical e horizontal das diferentes atividades da cadeia (AGÊNCIA NACIONAL DO

---

<sup>36</sup> Dispõe sobre o regime de concessão e permissão da prestação de serviços públicos previstos no artigo 175 da Constituição Federal, e dá outras providências.

<sup>37</sup> Institui normas gerais para licitação e contratação de parceria público-privada no âmbito da administração pública.

<sup>38</sup> Dispõe sobre normas gerais de contratação de consórcios públicos e dá outras providências.

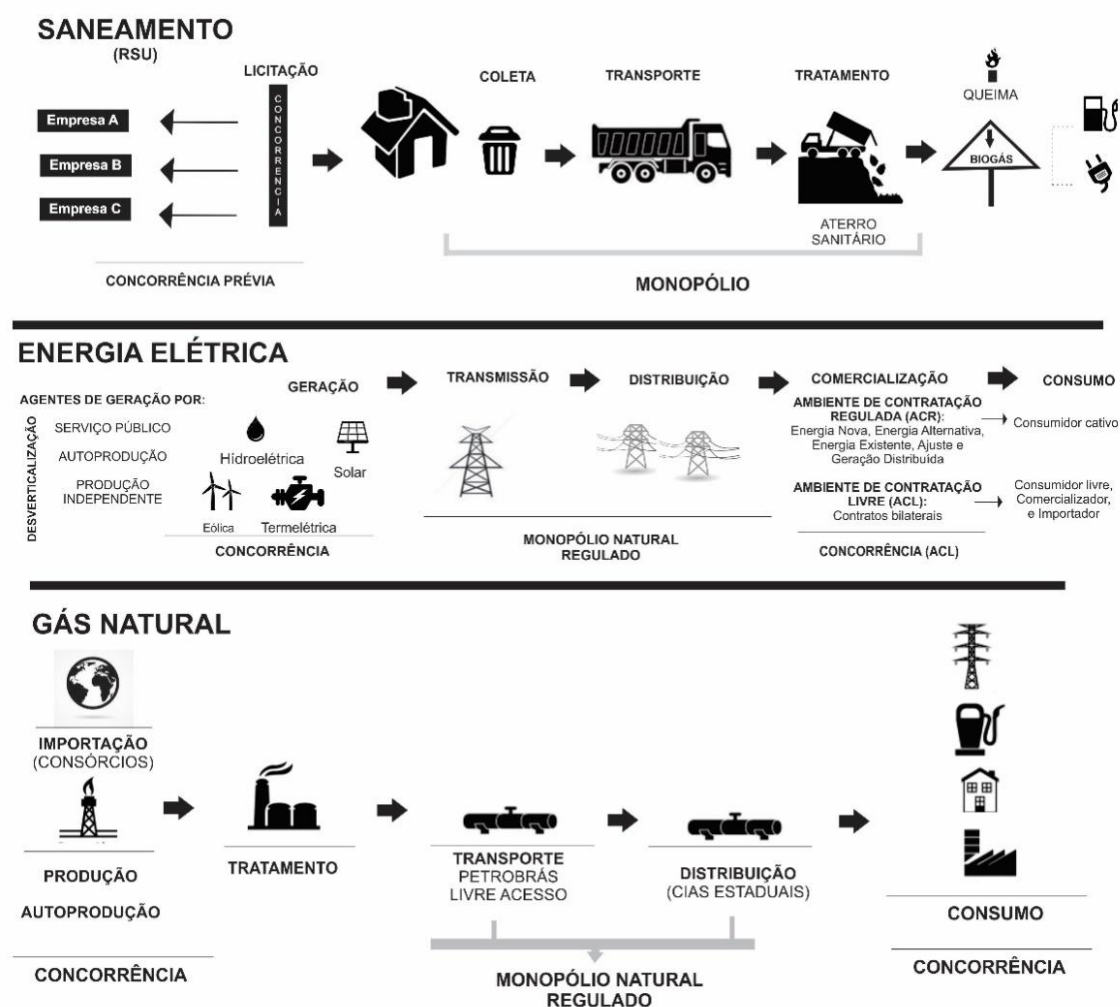
<sup>39</sup> *Energy Policy Act* (1992).

<sup>40</sup> *Energy Act* (1989).

PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS, 2011). No entanto, a Lei nº 9.478/1997 exigiu que a Petrobras realizasse a separação tanto contábil como jurídica da atividade monopólica da cadeia de transporte, ao determinar que constituísse uma empresa subsidiária para construir e operar os dutos de transporte do gás. Mas, na prática, o que se observa é que a exigência de separação das atividades da cadeia produtiva não foi totalmente completada, pois não foram estabelecidos limites à participação dos grupos econômicos nos diversos segmentos da cadeia do gás natural (AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS, 2011). Este assunto será retomado no item que trata especificamente desse setor.

Na Figura 17 apresenta-se um esquema com as configurações dos setores de saneamento, energia elétrica e gás natural.

Figura 17 – Estrutura dos setores de energia, saneamento e gás natural



Fonte: Elaboração própria.

De acordo com Galvão Jr. e Paganini (2009), no âmbito da regulação por agências, podem existir vários arranjos institucionais, como, por exemplo, a formação de consórcios entre estados e municípios, ou entre municípios, para regulação dos serviços, como comumente ocorre no setor de saneamento (RSU). São alternativas que podem viabilizar a regulação em função da economia que a união de várias concessões proporciona à função reguladora. Cabe informar que os formatos apresentados não são rígidos e aceitam combinações entre diferentes formas de regulação, a exemplo de contrato com presença de agência reguladora. "Assim, essas alternativas permitem que, mesmo sem capacidade para regular, titulares dos serviços compartilhem ou deleguem a regulação a outros entes públicos, proporcionando efetividade à atividade" (GALVÃO JR; PAGANINI, 2009, p. 85).

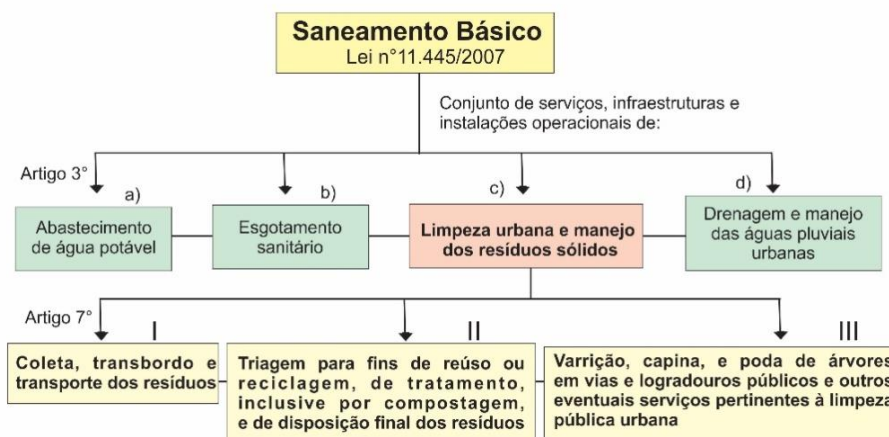


A partir da apresentação da estrutura dos setores de saneamento, energia elétrica e gás natural, cabe apresentar os estudos inerentes a cada um dos setores.

## 5.5. A REGULAÇÃO NO SETOR DE SANEAMENTO E OS RSU

A caracterização dos serviços de saneamento compreende os serviços de abastecimento de água, esgotamento sanitário, drenagem urbana e gestão dos resíduos sólidos. Este último é o foco deste estudo. Na Figura 18 pode-se visualizar a configuração do serviço público de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos como uma componente das atividades do saneamento básico, conforme disposto na Lei Nacional do Saneamento Básico (LNSB).

Figura 18 – Configuração do saneamento básico conforme a LNSB



Fonte: Elaboração própria com base em dados de Brasil (2007).

Para Galvão Jr., Monteiro e Melo (2013), essa divisão estrutural, conforme apresentada na Figura 18, pode gerar uma interpretação no sentido de que, embora exista a necessidade de visão integral do serviço (artigo 2º, inciso II, da LNSB), cada uma dessas atividades (I, II, III) faz parte de uma unidade de gestão para fins de planejamento, regulação e execução.

Assim estruturados, é consenso integrar os serviços de saneamento na conceituação de saneamento ambiental, sobretudo por envolver ações nas áreas de meio ambiente natural urbano e saúde pública. Além disso, são considerados como

serviços públicos de infraestrutura (*utilities*), organizados sob a forma de “indústria de rede” e incluídos, pelo menos em algum segmento da cadeia produtiva, na condição de “monopólio natural” (MARINHO, 2006).

No entanto, cabe salientar que o setor de RSU, apesar de estar inserido no setor de saneamento, não se configura como “indústria de rede”, já que foge à estrutura verticalizada que compõe os serviços de abastecimento de água e coleta e tratamento de esgoto, por exemplo. Isso significa que sua estrutura não tem uma rede física necessária sobre a qual fluem as transações econômicas. O serviço de coleta, tratamento e destinação dos RSU não necessita de tubulações, malhas ou demais mecanismos desse tipo para operar. Usualmente o serviço é prestado por caminhões de coleta, que levam os resíduos até uma central de transbordo ou aterro sanitário.

O que pode ocorrer em relação a esse tipo de prestação de serviço é a situação de monopólio, uma vez que não é eficaz, nem no sentido econômico nem no espacial, que duas empresas atuem no setor de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos realizando o mesmo tipo de coleta na mesma localidade (SOUZA; PAULA, 2015).

Dentro do contexto regulatório de serviços públicos essenciais, Simões, Pires e Marques (2013, p. 149) comentam que diferente de setores como o de energia elétrica e gás natural, por exemplo, “[...] são ainda raras as instâncias de nível internacional em que o serviço de manejo de resíduos sólidos é objeto de regulação explícita em matéria de preços e de qualidade de serviço”.

Entre os fatores que explicam tal situação, podem-se elencar duas questões: (1) o fato de os serviços serem comumente prestados por entidades públicas locais (municípios), cientes da sua autonomia legalmente consagrada (argumento da “autorregulação”); (2) o fato de a adoção do princípio do usuário-pagador<sup>41</sup>, principalmente no que tange à prestação deste serviço à sociedade, ainda ser relativamente incipiente, sendo também muito frequente a ausência de tarifação

---

<sup>41</sup> O princípio do usuário-pagador é fundamentado no artigo 225, *caput*, da Constituição Federal do Brasil (BRASIL, 2002) e no artigo 2º, incisos II e III, e artigo 3º, incisos IV e VII da Lei 6.938 (BRASIL, 1981). De acordo com a legislação mencionada, este princípio atua como instrumento para que a responsabilidade pelos impactos ambientais derivados das atividades econômicas seja partilhada entre todos (CARVALHO, 2014).

explícita deste serviço (os custos são cobertos por outras receitas locais) (SIMÕES; PIRES; MARQUES, 2013).

Galvão Jr., Monteiro e Melo (2013) comentam que, no desenvolvimento da regulação no Brasil, é comum constatar a situação de deficiência generalizada no quesito de agências reguladoras de serviços públicos de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos, resumindo-se a pouquíssimas agências. No Espírito Santo, como na maioria dos estados brasileiros, não existe agência reguladora própria para o setor de resíduos urbanos. Nesse caso específico, a Agência de Regulação de Serviços Públicos do Espírito Santo (ARSP), criada recentemente pela Lei Complementar nº 827/2016, tem somente a finalidade de regular e fiscalizar os serviços de abastecimento e esgotamento sanitário, infraestrutura viária, energia elétrica e gás natural (ESPÍRITO SANTO, 2016), não incluindo os resíduos sólidos<sup>42</sup>.

Quanto a isso, a ausência de agências reguladoras específicas para o setor de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos no Brasil deriva de um longo período no âmbito do saneamento, ou seja, desde a constituição do setor. Nesse contexto, cabe discorrer sucintamente sobre o processo histórico da regulação desse segmento. Na sequência, o texto apresenta também a caracterização atual, facilitando assim a compreensão do processo pelo qual passou o setor.

### **5.5.1 Contexto histórico do setor de saneamento no Brasil**

A regulação do setor de saneamento no Brasil iniciou-se a partir do Código das Águas, na década de 1930. Contudo, aprofundou-se apenas nas décadas de 1960 e 1970, com base no Sistema Financeiro de Saneamento do Planasa e em outras entidades vinculadas ao Poder Público Estadual e Federal, que, na época, exerciam funções regulatórias e de prestação de serviços de saneamento básico. Esse formato estrutural de regulação manteve-se estável até certo período dos anos 1980, ainda desvinculado da regulação de recursos hídricos, cuja responsabilidade era do Código de Águas (BRITTO, 2013).

---

<sup>42</sup> Ver capítulo IV, artigo 8º, incisos de I a IV e parágrafo único, incisos I a III, da Lei Complementar nº 827/2016.

De acordo com Buzanello (2016), o setor de saneamento brasileiro foi intensamente marcado pelo modelo institucional definido pelo Planasa, fundado no predomínio das companhias estaduais de saneamento, no financiamento estatal da infraestrutura e na regulação pelo financiamento. No entanto, esse modelo não conseguiu sustentar-se por muito tempo, sobretudo pela crise fiscal que inviabilizou essa forma de financiamento pelo Estado.

Segundo Britto (2013), o que sucedeu após a extinção do modelo Planasa, a partir dos anos 1990, foi a discussão sobre uma nova forma de regulação, tanto para os recursos hídricos quanto para o setor de saneamento. A ideia dessa nova forma de regulação estava inserida num contexto de mínima participação do Poder Público na prestação dos serviços e maior controle e cobrança pelo uso da água. Nesse ambiente, foi discutida a criação de um novo marco regulatório, de entes reguladores regionais e de um ente nacional, direcionados especificamente para a questão de utilização da água, sem inclusão dos resíduos.

Marinho (2006) discorre que os governos da década de 1990, influenciados pelas tendências observadas nos governos dos países centrais e nas diretrizes do Consenso de Washington, imprimiram uma orientação privatista para a infraestrutura, de forma geral, e para os serviços de saneamento, em particular. Desse modo, a nova orientação, concretizada na Reforma Gerencial do Estado Brasileiro (PR 1995) e na Lei nº 8.987/1995, redefiniu os serviços públicos de infraestrutura como atividades de "produção de bens e serviços para o mercado" e exigiu a regulação para esses serviços somente quando apresentassem a condição de monopólio natural, priorizando a eficiência da indústria e negligenciando a condição de serviço público essencial.

Em conformidade com essa ideia, Buzanello (2016) acrescenta que o que sucedeu nesse período foi uma orientação pró-mercado, consolidada no processo de privatização e em reformas reguladoras que privilegiaram a adoção de controles explícitos por meio de agências reguladoras setoriais. Com a extinção dos programas de financiamento e a desregulamentação dos serviços, deu-se início ao aumento da participação privada no setor por meio de concessões ao setor privado e venda de parte das ações de algumas companhias estaduais. O pensamento que envolvia essa orientação pró-mercado era o de que a privatização diminuiria o *deficit* por não pressionar mais o Estado por aportes de recursos públicos.

O marco regulatório do setor de saneamento só veio a se estabelecer com a aprovação da Lei nº 11.445/2007, que tratou tanto do abastecimento de água e do esgotamento sanitário quanto da limpeza e drenagem urbana, desta vez incluindo os RSU.

### **5.5.2 Regulação dos RSU por meio da Lei nº 11.445/2007 e do Decreto nº 7.217/2010**

A Lei nº 11.445/2007, em seu artigo 3.º, define o saneamento básico como o conjunto de serviços, infraestruturas e instalações operacionais.

[...]

Art. 3. Para os efeitos desta Lei, considera-se:

[...]

c) **limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos**: conjunto de atividades, infra-estruturas e instalações operacionais de coleta, transporte, transbordo, tratamento e destino final do lixo doméstico e do lixo originário da varrição e limpeza de logradouros e vias públicas;

[...] (BRASIL, 2007, grifo nosso).

Nessa mesma Lei, o artigo 8.º dispõe que os titulares desse tipo de serviço poderão delegar a organização, a regulação, a fiscalização e a prestação dos serviços de saneamento básico, conforme os termos do artigo 241 da Constituição Federal, de 5 de outubro de 1988<sup>43</sup> e da Lei nº 11.107/2005. Esta última refere-se à Lei de Concessões, que permite que os serviços possam ser prestados de forma direta, ou delegados por concessão. Nos termos dessa Lei, os particulares (empresas privadas) só poderão exercer o serviço público por meio de contratos de concessão ou permissão. Se os serviços forem prestados por empresas privadas, no

---

<sup>43</sup> Artigo 241. A União, os Estados, o Distrito Federal e os Municípios disciplinarão por meio de lei os consórcios públicos e os convênios de cooperação entre os entes federados, autorizando a gestão associada de serviços públicos, bem como a transferência total ou parcial de encargos, serviços, pessoal e bens essenciais à continuidade dos serviços transferidos (BRASIL, 2002).

entendimento jurídico, pode-se considerá-los como atividades privadas de interesse público<sup>44</sup>.

Assim, para a validade dos contratos de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos, faz-se necessário, entre outros requisitos, que existam normas de regulação que incluam os meios para o cumprimento das diretrizes da Lei, incluindo a designação da entidade de regulação e de fiscalização, conforme disposto no artigo 11, inciso III, da Lei nº 11.445/2007.

Por sua vez, a Lei de Saneamento também dispõe sobre o exercício da regulação, conforme colocado no seu artigo 21, incisos I e II, a qual deverá atender os princípios de independência decisória, incluindo autonomia administrativa, orçamentária e financeira da entidade reguladora, e de transparência, tecnicidade, celeridade e objetividade das decisões (BRASIL, 2007).

Ainda nessa mesma Lei, assim se definem os objetivos da regulação:

[...]

Art. 22. São objetivos da regulação:

- I. Estabelecer padrões e normas para a adequada prestação dos serviços e para a satisfação dos usuários;
- II. Garantir o cumprimento das condições e metas estabelecidas;
- III. Prevenir e reprimir o abuso do poder econômico, ressalvada a competência dos órgãos integrantes do sistema nacional de defesa da concorrência;
- IV. Definir tarifas que assegurem tanto o equilíbrio econômico e financeiro dos contratos como a modicidade tarifária, mediante mecanismos que induzam a eficiência e eficácia dos serviços e que permitam a apropriação social dos ganhos de produtividade (BRASIL, 2007).

Finalmente, fica estabelecido no artigo 23 que a entidade reguladora deve editar as normas referentes às dimensões técnica, econômica e social da prestação dos serviços, de modo a abranger os seguintes elementos:

[...]

Art. 23. A entidade reguladora editará normas relativas às dimensões técnica, econômica e social de prestação dos serviços, que abrangerão, pelo menos, os seguintes aspectos:

- I - padrões e indicadores de qualidade da prestação dos serviços;
- II - requisitos operacionais e de manutenção dos sistemas;

---

<sup>44</sup> As atividades privadas de direito geralmente são atividades relacionadas ao artigo 6º da Constituição Federal de 1988, que trata dos direitos sociais, entre eles a saúde. "São direitos sociais a educação, a saúde, o trabalho, o lazer, a segurança, a previdência social, a proteção à maternidade e à infância, a assistência aos desamparados, na forma desta Constituição" (BRASIL, 2002).

- III - as metas progressivas de expansão e de qualidade dos serviços e os respectivos prazos;
- IV - regime, estrutura e níveis tarifários, bem como os procedimentos e prazos de sua fixação, reajuste e revisão;
- V - medição, faturamento e cobrança de serviços;
- VI - monitoramento dos custos;
- VII - avaliação da eficiência e eficácia dos serviços prestados;
- VIII - plano de contas e mecanismos de informação, auditoria e certificação;
- IX - subsídios tarifários e não tarifários;
- X - padrões de atendimento ao público e mecanismos de participação e informação;
- XI - medidas de contingências e de emergências, inclusive racionamento;
- XII – (Vetado) (BRASIL, 2007).

Cabe ressaltar que o Decreto nº 7.217/2010 regulamenta a Lei nº 11.445/2007 e estabelece as normas para a sua execução. Para os fins desse Decreto, considera-se como regulação:

[...]

Art. 2º.

[...]

II- regulação: todo e qualquer ato que discipline ou organize determinado serviço público, incluindo suas características, padrões de qualidade, impacto socioambiental, direitos e obrigações dos usuários e dos responsáveis por sua oferta ou prestação e fixação e revisão do valor de tarifas e outros preços públicos, para atingir os objetivos do art. 27 (BRASIL, 2010d).

Conforme disposto no artigo 27 do Decreto nº 7.217/2010, os objetivos da regulação são: (1) padronizar e normatizar a prestação dos serviços; (2) garantir o cumprimento das metas estabelecidas; (3) prevenir e reprimir o abuso de poder a fim de favorecer a concorrência; (4) definir tarifas e preços que assegurem o equilíbrio dos contratos, de forma a considerar medidas de eficiência e eficácia dos serviços prestados bem como a produtividade. Somam-se ainda às atividades de regulação dos serviços de saneamento básico a interpretação e a fixação de critérios para a execução dos contratos e serviços bem como para a correta administração de subsídios (BRASIL, 2010d).

Ainda com base no Decreto nº 7.217/2010, no que tange aos RSU, o artigo 12 considera como serviço público de manejo desses resíduos as atividades que envolvem coleta e transbordo, transporte, triagem para fins de reutilização ou reciclagem, tratamento (incluindo a compostagem) e disposição final dos resíduos domésticos, comerciais e de limpeza urbana.

Até aqui, observa-se que a regulação do setor de resíduos está amplamente associada ao setor de saneamento, principalmente pelo viés ambiental, uma vez que

os problemas decorrentes de sua má gestão implicariam diretamente a saúde pública. No entanto, somente com a criação da Lei nº 12.305/2010 a questão dos resíduos sólidos teve notoriedade no Brasil, uma vez que essa Lei trata especificamente da sua gestão e da erradicação dos “lixões”.

Esse assunto será tratado mais especificamente a seguir.

### **5.5.3 Regulação e gestão de resíduos por meio da Lei nº 12.305/2010**

Segundo Cavé (2011), até recentemente o mais importante na gestão dos resíduos sólidos municipais era a limpeza urbana, atividade inserida na lei de saneamento básico, por meio da retirada periódica do material descartado. Nesse aspecto, a destinação final era a prioridade. Atualmente, contudo, a evacuação para longe da cidade ou para uma destinação final incerta não é mais o foco. A atual exigência do aterramento sanitário dos resíduos revela um processo de transição de uma engenharia “sanitária” para uma engenharia “ambiental”. Essa transição significa que a perspectiva sanitária de um serviço público era caracterizada pela gestão da oferta, produto da visão de “um serviço público ‘para todos e anônimo’, que se traduzia por soluções técnicas padronizadas e des-territorializadas [sic] (‘longe dos olhos, longe da mente’)” (CAVÉ, 2011, p. 170).

Em resumo, não se trata somente de explorar os recursos naturais, mas também de impor limites às atividades humanas, uma vez que os recursos à disposição se tornam mais raros, mais caros para serem mobilizados. Trata-se de reciclar, de valorizar os subprodutos ou os resíduos vinculados à vida urbana (CAVÉ, 2011).

Embora a Constituição Federal do Brasil (BRASIL, 2002), no seu artigo 30<sup>45</sup>, tenha possibilitado a prestação dos serviços de saneamento, conferindo competência ao poder público local para executar os serviços de limpeza urbana (incluindo a coleta e

---

<sup>45</sup> Artigo 30. Compete aos Municípios: “[...] I - legislar sobre assuntos de interesse local; [...] V - organizar e prestar, diretamente ou sob regime de concessão ou permissão, os serviços públicos de interesse local, incluído o de transporte coletivo, que tem caráter essencial” (BRASIL, 2002). O artigo 26 da Lei nº 12.305/2010 também diz que “[...] o titular dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos é responsável pela organização e prestação direta ou indireta desses serviços, observados o respectivo plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos, a Lei nº 11.445, de 2007, e as disposições desta Lei e seu regulamento” (BRASIL, 2010a).



a disposição dos RSU), instituindo também, como competência municipal, legislar sobre questões de interesse local (GÓES, 2011; POLETTO et al., 2016), a regulação do setor de resíduos só foi efetivamente tratada com a instituição da Política Nacional de Saneamento Básico (PNSB), por meio da Lei nº 11.445/2007, conforme já discutido.

Antes disso, por muito tempo a gestão dos resíduos foi negligenciada e marcada pela ausência de uma política pública ambiental que determinasse tanto as diretrizes como os instrumentos de ação para uma gestão efetivamente adequada dos resíduos sólidos. Esse espaço foi preenchido com a instituição da PNRS, por meio da Lei nº 12.305/2010.

A PNRS estabeleceu os princípios, objetivos e instrumentos assim como as diretrizes para a gestão integrada e o gerenciamento dos resíduos sólidos. Esse modelo de gestão integrada abrange também a Lei de Saneamento Básico citada, que dispõe sobre as diretrizes nacionais para a limpeza urbana e o manejo dos resíduos sólidos, além de envolver a Lei de Consórcios Públicos, Lei nº 11.107/2005, que apresenta as normas gerais para União, estados, Distrito Federal e municípios promoverem a gestão associada dos serviços por meio de consórcios (BRASIL, 2010a).

Conforme estabelece a Lei nº 12.305/2010, a responsabilidade pela gestão dos resíduos sólidos é dividida entre Governo Federal, estados, Distrito Federal, municípios e cidadãos, por meio da de uma gestão integrada e de um gerenciamento ambientalmente adequado. Assim, dispõe:

[...]

Art. 4. A Política Nacional de Resíduos Sólidos reúne o conjunto de princípios, objetivos, instrumentos, diretrizes, metas e ações adotadas pelo Governo Federal, isoladamente ou em regime de cooperação com Estados, Distrito Federal, Municípios ou particulares, com vistas à gestão integrada e ao gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos sólidos (BRASIL, 2010a).

Dentre os princípios e objetivos da PNRS, destaca-se, nesta ordem hierárquica, a não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, além do fim dos “lixões” a céu aberto no País (BRASIL, 2010a). Na Figura 19, exemplifica-se o fluxo desses objetivos.

Figura 19 – Objetivo da PNRS (2010) e hierarquia na gestão dos resíduos



Fonte: Elaboração própria com base em dados de Brasil (2010a).

Observa-se na Lei nº 12.305/2010, artigo 3º, que o conceito de gestão é compreendido como “gestão integrada de resíduos sólidos” a partir do conjunto de ações orientadas na busca de soluções para esses resíduos, incluindo as dimensões política, econômica, ambiental, cultural e social, sob a ótica do desenvolvimento sustentável. Já o “gerenciamento de resíduos sólidos” é compreendido como todas as operações que envolvem os resíduos, como, por exemplo, atividades de coleta, tratamento, transporte, disposição final. Em resumo, a diferença entre ambos os conceitos é que o primeiro está relacionado às ações que buscam soluções considerando variadas dimensões (política, social, entre outras), enquanto o segundo busca soluções de forma interna, no conjunto de ações exercidas nas diversas etapas interligadas (coleta, tratamento, entre outras).

Com a implementação da PNRS, essas ações assumem a forma de planos de resíduos sólidos e devem ser consideradas como as principais ferramentas de gestão. São de responsabilidade do Poder Público o Plano Nacional de Resíduos Sólidos, os planos estaduais, os planos microrregionais, os planos de regiões metropolitanas e aglomerações urbanas e os planos municipais. Incluem-se aí também os planos de gerenciamento de resíduos sólidos, exigidos de diversos geradores.

Com base na PNRS, prevê-se o fim dos “lixões” a céu aberto por meio da gestão compartilhada entre o Poder Público e todos os envolvidos na cadeia produtiva, pois se entende que todos têm uma parcela de responsabilidade na questão. Uma gestão compartilhada alivia simultaneamente os municípios da sobrecarga de responsabilidade sobre os RSU, mas também exige sincronismo entre todos os poderes envolvidos no processo, caso contrário será certamente difícil o alcance de bons resultados. Por isso a PNRS ainda é um grande desafio no Brasil.

Atualmente, muitos municípios estão em fase de adequação dos seus planos, após o prazo estabelecido para a erradicação dos “lixões”. Em fase anterior, aqueles ainda presentes no Brasil deveriam ter sido extintos até 2 de agosto de 2014, conforme disposto no artigo 54 da PNRS. Todavia, esse prazo foi adiado com a aprovação do Projeto de Lei nº 425/2014, que revisa a redação do artigo 54 da PNRS e sugere o encerramento desses “lixões” por etapas, no período de 2018 a 2021, conforme descrito abaixo:

[...]

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, 2014c, p. 2).

O adiamento da data para encerramento do uso de “lixões” demonstra que o assunto não constitui uma prioridade para a Administração Municipal. No caso do Espírito Santo, Dutra (2016, p. 34) caracteriza o quadro de gestão dos resíduos sólidos como de inércia dos municípios, em relação à aplicação da PNRS e à erradicação dos “lixões”. Tal situação impôs ao Ministério Público do Espírito Santo (MPES) a elaboração de Termos de Compromisso Ambiental (TCAs) direcionados a cada município, cuja aplicação inclui os planos e programas com ênfase na reciclagem, na participação de organizações de catadores e no reconhecimento do resíduo reciclável como bem de valor econômico e social, conforme previsto na PNRS (BRASIL, 2010a). Entre o aproveitamento e a valorização previstos na PNRS (2010a), tem-se o aproveitamento energético dos resíduos.

#### 5.5.4 Aproveitamento energético dos RSU com base na Lei nº 12.305/2010

Dentro da questão energética, a PNRS (2010a) inclui a recuperação e o aproveitamento dos resíduos em várias situações. No inciso VII do artigo 3º, assim define a destinação final ambientalmente adequada:

[...]

Art. 3º Para os efeitos desta Lei, entende-se por:

[...]

VII [...] reutilização, a reciclagem, a compostagem, **a recuperação e o aproveitamento energético** ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes do Sisnama, do SNVS e do Suasa, entre elas a disposição final, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos (BRASIL, 2010a, grifo nosso).

O artigo 6º, inciso XIV, da PNRS (2010a) também considera como princípio o aproveitamento energético dos resíduos sólidos e confere “[...] incentivo ao desenvolvimento de sistemas de gestão ambiental e empresarial voltados para a melhoria dos processos produtivos e ao reaproveitamento dos resíduos sólidos, **incluídos a recuperação e o aproveitamento energético**” (BRASIL, 2010a, p. 11, grifo nosso).

Por sua vez, no Capítulo I, precisamente nas Disposições Preliminares, quando trata das diretrizes aplicáveis aos resíduos sólidos, a PNRS também aborda a questão energética, sugerindo o uso de tecnologias para esse objetivo, desde que se comprove viabilidade técnica e ambiental e haja monitoramento da emissão de gases poluentes:

[...]

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, grifo nosso).

Por fim, a PNRS também estabelece como meta para os planos nacionais e estaduais de resíduos sólidos o aproveitamento energético dos gases gerados nas unidades de disposição final, conforme disposto no artigo 15, inciso IV, e no artigo 17, inciso IV (BRASIL, 2010a).

Nesse aspecto, o Plano Nacional de Energia (PNE) 2030 afirma que o Brasil ainda precisa aprimorar a regulação do setor de RSU para geração de energia, considerando que o País também tem questões institucionais relativas a tecnologia e regulação para resolver, uma vez que o reaproveitamento energético do biogás de aterro envolve problemas demasiadamente complexos. Resolvidas essas questões, é possível que ocorra elevado crescimento do setor.

Após discorrer sobre a regulação no setor de resíduos em nível federal, cabe apresentar brevemente a configuração da regulação no estado do Espírito Santo.

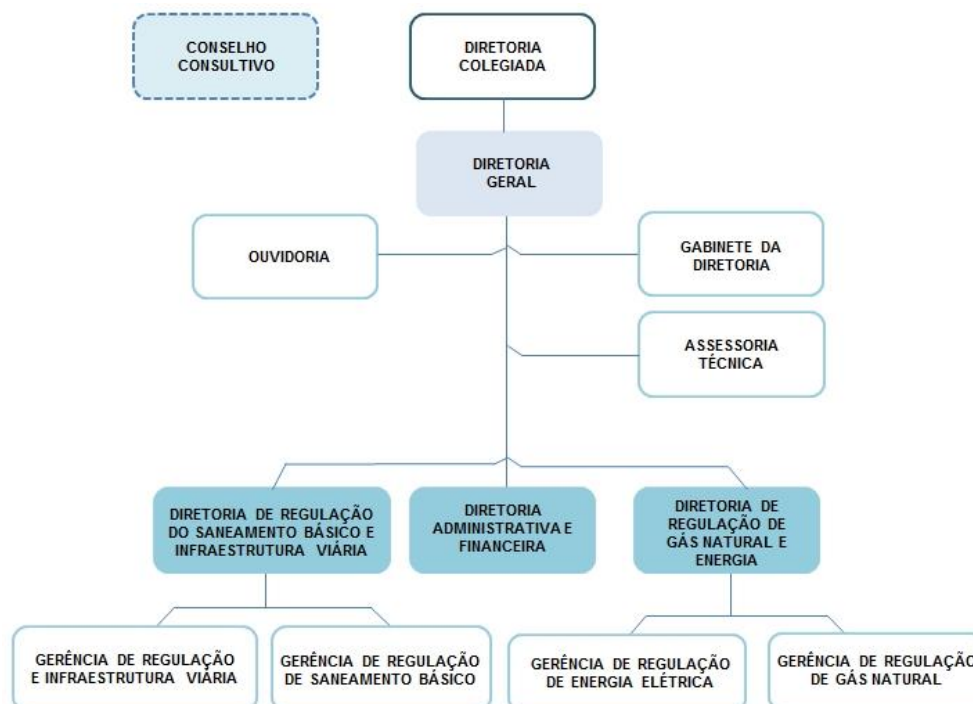
### **5.5.5 Regulação no Estado do Espírito Santo**

No estado do Espírito Santo, a regulação dos serviços públicos dos setores de gás natural e energia elétrica compete atualmente à ARSP. Esta agência foi criada pela Lei Complementar nº 827/2016 a partir da fusão das antigas Agência Reguladora de Saneamento Básico e Infraestrutura Viária (Arsi) e Aspe.

Conforme disposto em seu *site*, a ARSP é uma autarquia de regime especial, dotada de personalidade jurídica de direito público e de autonomia administrativa, patrimonial, técnica e financeira, vinculada à Secretaria de Estado de Desenvolvimento (Sedes). Sua finalidade é regular e fiscalizar os serviços de saneamento básico, abrangendo abastecimento de água e esgotamento sanitário, pedágios das rodovias, energia elétrica e gás natural no Espírito Santo. Na Figura 20, apresenta-se o organograma da instituição.

Observa-se na Figura 20 que, embora trate de saneamento básico, a ARSP não abarca os RSU. Abrange somente os serviços de água e esgoto sanitário, atualmente prestados pela Companhia Espírito Santense de Saneamento (Cesan) mediante convênio firmado com o município.

Figura 20 – Organograma da ARSP



Fonte: Elaborado pela autora com base em dados da Agência de Regulação de Serviços Públicos do Espírito Santo (ESPÍRITO SANTO, 2016).

Há cinco anos, conforme disposto na Lei nº 9.772/2011<sup>46</sup>, a Cesan foi autorizada a incluir o setor de serviços de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos em suas atividades. Contudo, Wilken (2017) pontua que o foco dessa empresa continua sendo o abastecimento de água, apesar de também contemplar o serviço de esgotamento sanitário e, mais recentemente, o de manejo de resíduos sólidos.

Com relação às atividades exercidas pela Cesan, Wilken (2017) explica ainda que a ARSP tem também a responsabilidade de analisar, opinar e decidir sobre as tarifas praticadas. Os reajustes e as revisões tarifárias a serem realizados pela Agência são submetidos previamente a consultas públicas, a fim de garantir uma política tarifária que permita o equilíbrio econômico e financeiro da prestação do serviço. Quanto a isso, por meio do artigo 46 da Lei nº 9.096/2008, foi determinado que o reajuste tarifário obedecesse a um intervalo mínimo de doze meses e seguisse o sistema de taxa de retorno. Tal sistema, comumente utilizado no saneamento básico

<sup>46</sup> Lei n.º 9.772, de 27 de dezembro de 2011. Dispõe sobre a alteração de dispositivos na Lei nº 2.282, de 8 de fevereiro de 1967, e dá outras providências. Disponível em: <<http://www.conslegis.es.gov.br/>>. Acesso em: 10 ago. 2016.

(MADEIRA, 2010; SAIANI; TONETO JR., 2010) e caracterizado pela tarifação por custo de serviço, também é praticado no setor de resíduos sólidos.

Conforme mencionado no texto sobre a regulação no setor de saneamento, tanto a Constituição Federal do Brasil (BRASIL, 2002) como a Lei nº11.445/2007 conferiram competência aos municípios para tratar de questões de interesse local, o que inclui as atividades de limpeza urbana, entre elas o manejo de resíduos sólidos. Pela Lei nº 12.305/2010, sua gestão é compartilhada entre Governo Federal, estados, Distrito Federal, municípios e cidadãos. Assim, no âmbito do serviço público de limpeza urbana e manejo dos resíduos sólidos, tal atividade geralmente se vincula às secretarias municipais.

Em Vitória, por exemplo, desde o ano de 2005, a Secretaria Municipal de Serviços (Semse) organiza e desenvolve novos programas de limpeza pública. Em contato com a Prefeitura Municipal de Vitória (PMV), confirmou-se que a atividade de limpeza urbana é prestada de forma direta, com execução indireta do serviço<sup>47</sup>. Assim, conforme também mencionado por Cavé (2011), todos os serviços são executados por um operador privado, por meio de contrato celebrado no ano de 2006, após processo de licitação. Quanto a isso, a empresa Vital é responsável por atividades como varrição das vias, coleta, transporte e aterramento dos resíduos sólidos. Cabe destacar que, na cidade de Vitória, esta última atividade é realizada em um aterro sanitário privado. A empresa Vital respondeu à licitação com a empresa capixaba Marca Ambiental, dona e operadora do aterro sanitário de Cariacica.

A regulação que conduz ações e promove iniciativas referentes aos resíduos sólidos no Espírito Santo é a Lei nº 9.264/2009, juntamente com o Plano Estadual de Resíduos Sólidos, elaborado a partir de convênio entre o MMA/SRHU e a Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (Seama) (ESPÍRITO SANTO, 2009). No âmbito dessa Lei, embora o Estado ainda não tenha nenhuma usina de

---

<sup>47</sup> A prestação direta com execução indireta ocorre quando a administração, assumindo a responsabilidade do serviço perante o cidadão, promove a licitação da atividade ou parcela e celebra contrato com pessoa jurídica de direito privado, ou seja, “[...] apenas concerta com alguém o encargo de efetuar materialmente dada atividade, sem, todavia, investi-lo em titulação para relacionar-se diretamente com os administrados, pois não lhe transfere a responsabilidade imediata do serviço”, dividindo-se em duas subespécies: mediante contrato comum (Lei nº 8.666/1993) e/ou parceria público-privada (Lei nº 11.079/2004) (GALVÃO JR.; MONTEIRO; MELO, 2013, p.102).

energia com base nessa fonte, é possível identificar elementos na legislação que indicam o reaproveitamento de RSU para a geração de energia por meio do biogás de aterro.

Além da legislação supracitada, cabe mencionar (1) a Lei nº 9.531/2010, que institui a Política Estadual de Mudanças Climáticas (Pemc). Pelo artigo 18, inciso X, dessa Lei, nota-se o interesse em incentivar a recuperação do gás CH<sub>4</sub> gerado pela digestão anaeróbia de sistemas de tratamento de esgotos domésticos, efluentes industriais, resíduos rurais e RSU, especialmente para produção de energia (ESPÍRITO SANTO, 2010), e (2) o Decreto nº 3.453-R/2013, que dispõe sobre a política estadual de incentivo a energias renováveis, como a eólica, a solar e a da biomassa, além de outras fontes. Esta última evidencia o biogás e o bio CH<sub>4</sub>.

Por fim, apontam-se as legislações municipais, que seguem o que determina os artigos 18 e 19 da Lei nº 12.305/2010: a elaboração do Plano de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos Urbanos (PGIRSU). Dessa forma, o PGIRSU de cada região municipal e o arcabouço legal em esferas nacionais e federais já mencionado representam o aparato regulatório geral no que concerne aos RSU no Brasil.

## 5.6 REGULAÇÃO DO SETOR ELÉTRICO

Os primeiros anos da indústria de eletricidade no Brasil, à época de vigência da Constituição de 1891, foram marcados pela descentralização. Nesse momento, existiam duas estruturas diversas: (1) empresas municipais, privadas, ligadas ao setor cafeeiro e ao setor de empreendimentos urbanos (em grande parte, iluminação e tração), e (2) grandes investidores estrangeiros, como a *Light* e a *American & Foreign Power*<sup>48</sup> (*Amforp*) (TOLMASQUIM; GORINI; CAMPOS, 2002). Todavia, para o estudo de regulação do setor elétrico brasileiro, é importante entender as modificações ocorridas nos últimos trinta anos. O Quadro 11 apresenta as principais mudanças desse período.

---

<sup>48</sup> A *Light* atuava no eixo Rio-São Paulo e a *Amforp*, nos principais centros urbanos não atendidos pela *Light* (LEITE, 2007, apud CAMPOS; MORAES, 2012).



Quadro 11 – Mudanças no setor elétrico brasileiro

<b>Modelo Antigo (até 1995)</b>	<b>Modelo de Livre Mercado (1995 a 2003)</b>	<b>Novo Modelo (2004)</b>
Financiamento através de recursos públicos	Financiamento através de recursos públicos e privados	Financiamento através de recursos públicos e privados
Empresas verticalizadas	Empresas divididas por atividade: geração, transmissão, distribuição e comercialização	Empresas divididas por atividade: geração, transmissão, distribuição e comercialização, importação e exportação
Empresas predominantemente estatais	Abertura e ênfase na privatização das empresas	Convivência entre empresas estatais e privadas
Monopólios - Competição inexistente	Competição na geração e comercialização	Competição na geração e comercialização
Consumidores cativos	Consumidores livres e cativos	Consumidores livres e cativos
Tarifas reguladas em todos os segmentos	Preços livremente negociados na geração e comercialização	No ambiente livre: preços livremente negociados na geração e comercialização. No ambiente regulado: leilão e licitação pela menor tarifa
Mercado Regulado	Mercado Livre	Convivência entre Mercados Livre e Regulado
Planejamento Determinativo - Grupo Coordenador do Planejamento dos Sistemas Elétricos	Planejamento Indicativo pelo Conselho Nacional de Política Energética (CNPE)	Planejamento pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE)
Contratação: 100% do Mercado	Contratação: 85% do Mercado (até agosto/2003) e 95% do Mercado (até dezembro/2004)	Contratação: 100% do Mercado + Reserva
Sobras/ <i>deficits</i> do balanço energético rateados entre compradores	Sobras/ <i>deficits</i> do balanço energético liquidados no Mercado Atacadista de Energia Elétrica (MAE)	Sobras/ <i>deficits</i> do balanço energético liquidados na Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE). Mecanismo de Compensação de Sobras e <i>Deficits</i> (MCSO) para as distribuidoras

Fonte: Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (2016).

Até a década de 1990, prevaleceu no Brasil o modelo de monopólio estatal verticalizado (Modelo Antigo), caracterizado pela atuação constante do Estado em todos os segmentos (geração, transmissão e distribuição). Tolmasquim (2015) salienta que o modelo estatal funcionou bem até o fim da década de 1970. A partir de então, na década de 1980, surgiu a primeira crise do setor com a extinção do Imposto Único e a utilização das tarifas como instrumento de política monetária para controle da inflação. Esse período foi marcado pela crise econômica e fiscal, que

resultou na suspensão de investimentos no setor e na incapacidade de expansão do sistema.

Nesse cenário, iniciava-se em várias partes do mundo um movimento pela revisão do papel do Estado. A nova concepção, especialmente nas “indústrias de rede”, abordava a ideia de que o Estado passaria a ter a função única e exclusiva de regulador da atividade econômica, podendo estimular a iniciativa privada para assumir atividades empresariais nessas indústrias, até então administradas pelo Estado. A partir dessa nova concepção, reforçada pela crise da década de 1980, o setor elétrico deu início, nos anos de 1990, a uma ampla reforma (Modelo de Livre Mercado) (TOLMASQUIM, 2015).

No Brasil, em conformidade com a ideia de menor intervenção do Estado na economia, iniciaram-se as privatizações<sup>49</sup> e o processo de desverticalização (geração, transmissão, distribuição e comercialização). Nesse modelo regulatório, permitiu-se a competição nas atividades de geração e comercialização mediante livre contratação e manteve-se a regulação de tarifas e melhor qualidade dos serviços de transmissão e distribuição, caracterizados como monopólios naturais (TOLMASQUIM, 2015).

Além do estabelecido acima, a edição da Lei n° 8.987/1995 (Lei Geral de Concessões) e da Lei n° 9.074/1995 foi fundamental para a nova configuração do setor elétrico brasileiro. A primeira lei permitiu a definição de regras gerais para a prestação do serviço público, incluindo os direitos e obrigações dos concessionários e usuários, a instituição do serviço pelo preço (substituição do serviço pelo custo) para atividades de concessão e permissão, além de reajustes e revisões tarifárias com o intuito de preservação do equilíbrio econômico e financeiro das concessões. Já a segunda criou regras específicas para a prorrogação das concessões e duas figuras importantes para o setor elétrico: PIE e Consumidor Livre (TOLMASQUIM, 2015).

---

<sup>49</sup> Importante ressaltar que, nesse período, mais precisamente em 1995, iniciou-se o processo de privatização do setor elétrico brasileiro com a distribuidora Espírito Santo Centrais Elétricas (Escelsa), no estado do Espírito Santo, pioneiro desse processo (CAMPOS; MORAES, 2012).

Em continuidade a esse período, um marco importante do ano de 1996 foi a criação da Aneel<sup>50</sup>, sob regime de autarquia especial e vinculação ao MME, com o objetivo de regular e fiscalizar todos os segmentos da cadeia produtiva de energia elétrica de acordo com as políticas e diretrizes do Governo Federal (CAMPOS; MOARES, 2012).

De forma paralela, ainda no ano de 1996, alguns marcos principais foram observados, tais como a regulamentação da produção de energia elétrica por produtor independente, conforme mencionado; a definição de que o autoprodutor obteria a outorga de concessão ou de autorização sob a condição regulatória de produção destinada a consumo próprio; a criação do MAE; a definição das regras do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e a criação do Mecanismo de Realocação de Energia (MRE) a fim de compartilhar os riscos hidrológicos de usinas hidrelétricas centralizadas (CAMPOS; MORAES; 2012).

Com o surgimento dessas importantes figuras no setor elétrico, teve início a implantação do Projeto de Reestruturação do Setor Elétrico Brasileiro (RE-SEB). Em 2001, porém, antes de sua conclusão, o setor elétrico passou por uma grave crise de racionamento, quando o nível dos reservatórios se encontrava por volta de 32% de sua capacidade de armazenamento. O risco de *deficit* ultrapassava 15%, quando o nível máximo aceitável seria de 5%. Somados a esse cenário, outros fatores contribuíram para agravar a crise, como a crescente inadimplência do MAE por parte dos agentes e a falha de superestimação das garantias físicas, que assegurava cobertura contratual por parte das distribuidoras sem a contrapartida de um novo contrato de energia, impedindo a entrada de nova capacidade de geração para cobrir a diferença entre oferta e demanda. Além disso, a ausência de um ambiente regulatório apropriado, estável, claro e consistente não proporcionava segurança aos investidores privados, agravando ainda mais a crise energética (TOLMASQUIM, 2015).

---

<sup>50</sup> Para Amaral Filho (2007), a criação da Aneel teve a finalidade de estabelecer, assim como em outros países, um regulador “imune” ao governo, um “órgão de Estado”, teoricamente não influenciado por pressões políticas, podendo exercer suas funções de modo independente, assegurando estabilidade do marco regulatório e criando condições favoráveis para a atração de investidores privados.

A partir desse cenário, o setor elétrico brasileiro ganhou uma nova configuração, que vigora até os dias atuais. A implantação do Novo Modelo do Setor Elétrico marcou a retomada da responsabilidade do planejamento no setor de energia elétrica pelo Estado.

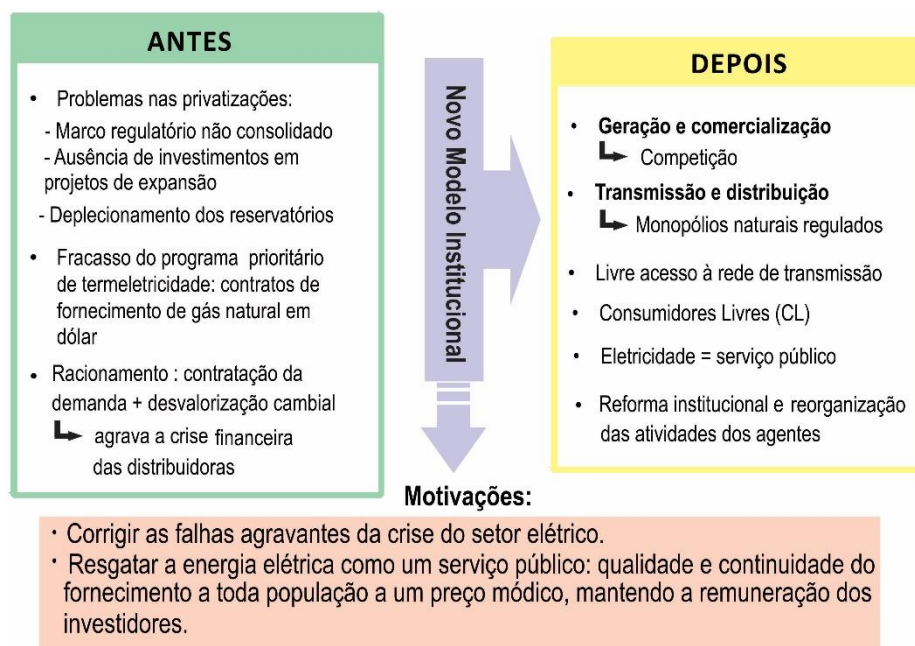
Esse assunto será visto com mais ênfase adiante, no próximo subitem, cuja abordagem inclui a estrutura regulatória desse novo modelo, com foco nos decretos regulamentadores que constituem a base legal do setor elétrico, e a apresentação dos pontos mais importantes para o biogás.

### **5.1.1 Principais mudanças regulatórias do setor elétrico**

Tolmasquim (2015) afirma que o Novo Modelo do setor elétrico se dissocia dos anteriores por priorizar simultaneamente os três alvos principais do serviço público de eletricidade: a segurança no abastecimento, a modicidade tarifária e a universalização dos serviços de energia elétrica. Para isso, foram tomadas quatro medidas principais, quais sejam: a concepção de dois ambientes de contratação (regulado e livre), o retorno ao planejamento, a efetivação de programas de universalização (“Luz para Todos”) e a reorganização institucional. No que tange a esta última medida, conforme apresentado no Quadro 11, algumas mudanças ocorridas no Modelo da década de 1990 foram mantidas, tais como o financiamento através de recursos públicos e privados, a competição na geração e comercialização, os consumidores livres e cativos, o ONS e a Aneel.

A nova reforma setorial, de acordo com Campos e Moraes (2012), está representada na Figura 21.

Figura 21 – Reforma do setor elétrico brasileiro (década de 2000)



Fonte: Campos e Moraes (2012).

Nota: Dados adaptados pela autora.

Leite (2007, apud CAMPOS; MORAES, 2012) apresenta o Novo Modelo dividido em alguns pontos principais que abrangem duas concepções fundamentais contidas em três decretos: (1) retorno ao comando do Estado; e (2) reforma do mercado envolvendo a ideia de um *pool* sob administração da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE).

A primeira concepção desenvolve-se de três formas: (1) inicialmente, com o restabelecimento e adaptações do planejamento governamental de longo prazo, antes realizado pela *holding* Eletrobrás, que passaria agora a ser feito por uma empresa estatal, originando a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), autorizada pela Lei nº 10.847/2004 e pelo Decreto nº 5.184/04; (2) com o Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico (CMSE), instituído pelo Decreto nº 5.175/2004, que teria por objetivo acompanhar o atendimento da demanda no prazo de cinco anos, além de recomendar ações preventivas para evitar deficiências no sistema; e (3) com suspensão parcial da ideia de governança privada do ONS, visto que sua formação se constituiu de diretores indicados pelo MME (LEITE, 2007, apud CAMPOS; MORAES, 2012).

A ideia inicial da segunda concepção era de que a CCEE, instituída pelo Decreto nº 5.177/2004, fosse o comprador único de toda a energia gerada para a revenda, com preço único para todas as distribuidoras. Entretanto, o que vigorou foi um sistema de contratos bilaterais entre geradores e distribuidoras com interferência da CCEE, certificando tarifação única de suprimento em cada segmento de mercado. Nesse caso, os geradores responsabilizam-se pelo atendimento do mercado e os distribuidores têm a obrigação de contratar 100% da demanda prevista para os cinco anos seguintes, além de fornecer garantias contra inadimplência (LEITE, 2007, apud CAMPOS; MORAES, 2012).

Tolmasquim (2015) confirma a ideia de o Novo Modelo representar o aprimoramento do marco regulatório do setor elétrico brasileiro, essencialmente nos aspectos sintetizados a seguir:

- proporcionar profundas alterações no comércio de energia no Sistema Interligado Nacional (SIN) por meio da criação do Ambiente de Contratação Regulada (ACR) e do Ambiente de Contratação Livre (ACL);
- permitir mudanças institucionais a partir da reorganização das competências e da criação da CCEE;
- favorecer o retorno do planejamento setorial a partir da contratação regulada com leilões e criação da EPE;
- admitir a retomada dos programas de universalização;
- consolidar segurança jurídica e estabilidade regulatória, a fim de atrair investimentos, reduzir riscos e expandir o setor.

Nesse contexto, a permanência da Aneel, como entidade reguladora no setor elétrico, foi fundamental para a concretização das mudanças relacionadas aos aspectos mencionados acima. Dentre as suas atribuições, destacam-se: regular a geração (produção), transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica; fiscalizar, de forma direta ou por meio de convênios com órgãos estaduais, as concessões, as permissões e os serviços de energia elétrica; implementar políticas e diretrizes do Governo Federal relativas à exploração da energia elétrica e ao aproveitamento dos potenciais hidráulicos; estabelecer tarifas; dirimir as divergências administrativas tanto entre agentes como entre agentes e

consumidores, além de promover atividades de outorgas de concessão, permissão e autorização de empreendimentos e serviços de energia elétrica por delegação do Governo Federal (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, acesso em 15 jan. 2017).

Como resultado das atribuições da Aneel e das mudanças ocorridas no setor elétrico brasileiro, mencionadas na seção anterior, o comércio de energia elétrica no Brasil passou a ocorrer em dois ambientes de negociação: o ACR e o ACL.

Nesse contexto, cabe enfatizar de forma sucinta esses ambientes comerciais a fim de posteriormente verificar a inserção do biogás no mercado de energias renováveis.

#### 5.2.1.1 Ambientes de comercialização de energia elétrica no Brasil

Após a ocorrência das principais mudanças no setor elétrico brasileiro, as relações comerciais no modelo atual passaram a se estabelecer no ACR e no ACL.

No ACR ocorrem principalmente os leilões de compra de energia elétrica, assim como da energia gerada pela usina binacional de Itaipu e da energia associada ao Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa)<sup>51</sup>. Segundo a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (2017a), é nesse ambiente que se negociam quase 75% do volume total de energia, o que o constitui como principal setor de operações do tipo no País.

Nesse ambiente os compradores e vendedores de energia participam de leilões e formalizam suas relações comerciais por meio de contratos estabelecidos no âmbito do ACR. Tais contratos têm regulação específica para aspectos, como preço da energia, submercado de registro do contrato e vigência de suprimento, e não são passíveis de alterações bilaterais por parte dos agentes.

Os leilões são realizados pela CCEE por delegação da Aneel e constituem a principal forma de contratação de energia no Brasil. Por meio desse processo,

---

<sup>51</sup> Apesar de não ser contratada em leilões, a energia gerada pela usina binacional de Itaipu e a energia associada ao Proinfa são enquadradas no ACR, já que sua contratação é regulada com condições específicas e determinadas pela Aneel (CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, acesso em 24 jan. 2017a).

concessionárias, permissionárias e autorizadas de serviço público de distribuição de energia elétrica do SIN assumem a garantia de atendimento à totalidade de seu mercado no ACR. Os vencedores dos leilões são definidos pelo critério de menor tarifa.

No ACL, os agentes do mercado, geradores (a título de serviço público), autoprodutores, produtores independentes, comercializadores, importadores e exportadores de energia e os consumidores livres e especiais têm a liberdade de negociar a compra de energia e estabelecer volumes, preços e prazos de suprimento de forma bilateral (CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, acesso em 24 jan. 2017b). No Quadro 12, visualizam-se as principais diferenças entre esses ambientes.

Quadro 12 – Diferenças entre ACL e ACR

	<b>Ambiente Livre (ACL)</b>	<b>Ambiente Regulado (ACR)</b>
<b>PARTICIPANTES</b>	Geradoras, comercializadoras, consumidores livres e especiais.	Geradoras, distribuidoras e comercializadoras. As comercializadoras podem negociar energia somente nos leilões de energia existente (Ajuste e A-1).
<b>CONTRATAÇÃO</b>	Livre negociação entre os compradores e vendedores.	Realizada por meio de leilões de energia promovidos pela CCEE, sob delegação da Aneel.
<b>TIPO DE CONTRATO</b>	Acordo livremente estabelecido entre as partes.	Regulado pela Aneel, denominado Contrato de Comercialização de Energia Elétrica no Ambiente Regulado (CCEAR).
<b>PREÇO</b>	Acordado entre comprador e vendedor.	Estabelecido no leilão.

Fonte: Elaborado com base em dados da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (Acesso em 24 jan. 2017b).

Fora desses ambientes, existe ainda o Mercado de Curto Prazo (MCP), onde são contabilizadas e liquidadas as diferenças de energia elétrica ocorridas entre os montantes gerados, contratados e consumidos. Esses três ambientes são de responsabilidade da CCEE, criada em 2004, após a extinção da Administradora de Serviços do Mercado Atacadista de Energia Elétrica (Asmae) e do MAE (CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, acesso em 24 jan. 2017b).

De acordo com a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (2017c), os agentes de mercado são divididos por categorias, em conformidade com a



Convenção de Comercialização. No Quadro 13, descreve-se cada um desses agentes e suas categorias.

Quadro 13 – Agentes do mercado de energia elétrica

CATEGORIA	DESCRIÇÃO	
<p align="center"><b>GERAÇÃO</b></p>	<p>Podem vender energia tanto no ACR como no ACL. São ainda organizados por classes.</p>	<p><b>Concessionário de Serviço Público de Geração:</b> agente titular de concessão, outorgada pelo Poder Concedente, para exploração de ativo de geração a título de serviço público</p>
		<p><b>Produtor Independente de Energia Elétrica:</b> agente individual, ou participante de consórcio, que recebe concessão, permissão ou autorização do Poder Concedente para produzir energia destinada à comercialização por sua conta e risco.</p>
		<p><b>Autoprodutor:</b> portador de concessão, permissão ou autorização para produzir energia destinada a seu uso exclusivo, podendo eventualmente comercializar o excedente desde que autorizado pela Aneel.</p>
<p align="center"><b>COMERCIALIZAÇÃO</b></p>	<p>São os agentes importadores, exportadores e comercializadores de energia elétrica, além dos consumidores livres e dos consumidores especiais.</p>	<p><b>Comercializador:</b> comprador de energia por meio de contratos bilaterais celebrados no ACL, podendo vendê-la a outros comercializadores, a geradores e a consumidores livres e especiais no próprio ACL, ou a distribuidores, por meio dos leilões de ajuste no ACR.</p>
		<p><b>Consumidor Livre:</b> pessoa com direito de escolher seu fornecedor de energia elétrica (gerador e/ou comercializador) por meio de livre negociação, caso sua demanda mínima seja de 3MW.</p>
		<p><b>Consumidor Especial:</b> pessoa com demanda entre 500kW e 3MW e direito de adquirir energia de qualquer fornecedor, desde que seja oriunda de fontes incentivadas especiais (eólica, pequenas centrais hidrelétricas – PCHs, biomassa ou solar).</p>
		<p><b>Importador:</b> agente que detém autorização do Poder Concedente para realizar importação de energia elétrica com vistas ao abastecimento do mercado nacional.</p>
		<p><b>Exportador:</b> agente que detém autorização do Poder Concedente para realizar exportação de energia elétrica com vistas ao abastecimento de países vizinhos.</p>
<p align="center"><b>DISTRIBUIÇÃO</b></p>	<p>São as empresas que realizam o atendimento da demanda de energia aos consumidores com tarifas e condições de fornecimento reguladas pela Aneel. Todos os pertencentes a esta categoria têm participação obrigatória no ACR, por meio de leilões.</p>	

Fonte: Elaborado com base em dados da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (Acesso em 24 jan. 2017c).

Por fim, a atuação da CCEE ocorre desde a medição da energia gerada e efetivamente consumida até a liquidação financeira dos contratos de compra e venda no MCP. À CCEE cabe ainda a importante função de promover os leilões de energia, sob delegação da Aneel.

Nesse aspecto, uma vez que o biogás se enquadra como fonte de energia renovável não convencional, torna-se pertinente verificar de que forma ocorre a comercialização no mercado de energias renováveis. Assim, os itens a seguir buscam enfatizar tal conjuntura.

### **5.1.2 Comercialização de energias renováveis**

Conforme estudos da Empresa de Pesquisa Energética (2016b), as mudanças que ocorreram no cenário energético nacional e mundial nos últimos anos influenciaram as principais condições de contorno dentro do PNE em diversos aspectos, dentre os quais se destacam, para este trabalho, a evolução das energias renováveis e a penetração do biogás como gás não convencional.

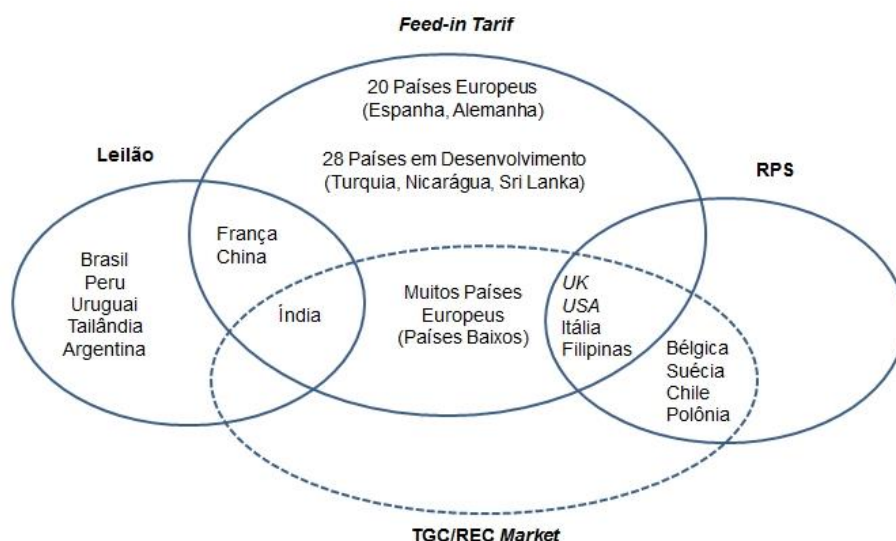
Para analisar a inserção do biogás no mercado de energias renováveis, torna-se indispensável verificar os principais instrumentos existentes sob o ponto de vista de incentivo a esse tipo de fonte. De forma geral, a comercialização de energia está principalmente embasada em decisões de preço e quantidade de produzida, conforme mencionado no início deste capítulo (AMARAL FILHO, 2007). Sobre esse aspecto, Azuela e Barroso (2011) apontam os principais instrumentos de mercado utilizados no mundo:

- FIT (*Feed-in Tariff*): iniciou-se na Alemanha e disseminou-se pela Europa em 1990, influenciando vários países. Para Butler e Neuhoff (2008), o instrumento *Feed-in Tariff* determina um preço mínimo que a concessionária deve pagar ao produtor pela geração de energia elétrica renovável.
- TGC (*Tradable Green Certificates*): são certificações atribuídas às organizações pela produção de determinada quantidade de energia originada de fontes renováveis. Funciona mais como incentivo para estimular esse tipo de atividade.

- RPS (*Renewable Portfolio Standard*): por este instrumento, as concessionárias, embasadas em cotas, têm obrigatoriedade de contratar uma parte do total de energia vendida a partir de fontes renováveis. Azuela e Barroso (2011) acrescentam que é uma espécie de política amplamente utilizada por diversos países. Em 2011, só nos EUA, 31 dos cinquenta estados estavam inseridos nessas condições.
- Leilão: neste caso, o agente regulador é quem define a quantidade de energia disponível para comercialização, a fim de, em seguida, estruturar um leilão para venda, de forma a estimular a competição entre os contratantes. Como ocorre no Brasil, quem apresentar a menor tarifa vence o leilão. Para Ríó e Linares (2014), a ideia desse mecanismo é buscar tanto a eficiência como a redução do custo de tecnologias durante um período de tempo, visando incentivar a competição entre os produtores de energias renováveis. Por outro lado, Azuela e Barroso (2011) não consideram que este mecanismo represente uma política de energias sustentáveis, embora auxilie na promoção e desenvolvimento dessas energias de forma competitiva. Conforme mencionado na seção anterior, o leilão ocorre no Brasil pelo ACR e é a principal modalidade de contratação de energia elétrica no País (CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, acesso em 24 jan. 2017a).
- *Peer-to-peer*: iniciado recentemente por uma empresa alemã (*Sonnenbatterie*), este mecanismo permite que proprietários de pequena geração de energia solar e eólica a comercializem em toda a rede elétrica. É uma espécie de comércio de energia distribuída em que os consumidores pagam uma taxa mensal para contratar uma determinada quantidade diretamente com os fornecedores de energia "limpa". Por este mecanismo, os consumidores podem escolher seu fornecedor e os produtores podem nomear seu preço (MARTIN, 2015). Se bem aceita, tende a disseminar-se para outras fontes.

Assim, a Figura 22 apresenta uma síntese dos instrumentos mencionados e adotados em diversos países.

Figura 22 – Síntese dos principais mecanismos de comercialização de energias renováveis em alguns países



Fonte: Elaborado com base em informações contidas em Azuela e Barroso (2011).

Nota: TGC (*Tradable Green Certificates*/Tratado de Certificado Verde); REC (*Renewable Energy Certificate*/Certificado de Energia Renovável); UK (Reino Unido); USA (*United States of America*); RPS (*Renewable Portfolio Standard*/Padrão de Portfólio Renovável).

Em relação à Figura 22, Azuela e Barroso (2011) complementam que quase todos os países aplicam algum tipo de incentivo fiscal ou financeiro de forma paralela aos mecanismos baseados em preços ou cotas.

Somam-se aos mecanismos já mencionados outros tipos de incentivos fiscais e econômicos comumente utilizados, tendo como base o investimento inicial do empreendimento e/ou sua vida útil. De forma geral, são políticas que favorecem tanto o gerador como os demais agentes do setor. Alguns desses principais incentivos são descritos por Salino (2011).

- **Redução de imposto sobre propriedade:** possibilidade de o proprietário obter redução ou isenção de impostos se sua propriedade for utilizada para produzir energias renováveis.
- **Redução do Imposto sobre o Valor Acrescentado (IVA):** redução ou isenção do imposto sobre o valor acrescentado entre a compra de insumos e a venda de energias renováveis.

- **Redução de impostos de importação:** redução ou eliminação do imposto sobre materiais importados utilizados em usinas de energia renovável.
- **Incentivos fiscais de produção:** fornecimento de créditos ou deduções de impostos a uma taxa proporcional ao kWh produzido em plantas de energia renovável.
- **Depreciação acelerada:** permissão para que os equipamentos utilizados nas plantas de energia renovável se depreciem a uma taxa mais rápida, de forma a reduzir o montante declarado para efeito do Imposto de Renda.
- **Créditos para pesquisa, desenvolvimento e fabricação de equipamentos:** oferta de créditos a instituições de desenvolvimento em energia renovável, inclusive para pesquisas e processos de fabricação.
- **Redução de juros de empréstimo, no âmbito do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES):** financiamento a empreendimentos de energias renováveis pelo programa Fundo Clima, cujo objetivo é apoiar investimentos em geração e distribuição local de energia (BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL, acesso em 10 jul. 2016).

No contexto brasileiro, um programa criado especificamente para incentivar as fontes renováveis de energia foi o Proinfa, criado em 2004 pelo Governo Federal, por meio do Decreto nº 5.025/2004. Seu objetivo foi elevar a participação de fontes de geração de energia elétrica na matriz energética brasileira a partir de pequenas centrais hidrelétricas (PCHs), usinas eólicas e biomassa. Também foram objetivos do Programa a nacionalização de equipamentos e o fortalecimento da indústria de base voltada a esses tipos de empreendimentos.

De forma geral, esses incentivos são iniciativas que visam ao estímulo e ao fomento da produção, comercialização e distribuição da energia renovável como um todo. No caso do biogás, sob o ponto de vista regulatório, diversas resoluções, normas e notas técnicas foram editadas, objetivando a valorização desse energético como fonte de energia elétrica não convencional, inserido, também, num ambiente de oferta descentralizada de energia. Assim, na sequência desta revisão, o biogás é exposto nesse cenário.

### 5.1.3 O biogás como fonte de energia elétrica não convencional

A revisão da literatura anterior referente ao setor elétrico brasileiro permitiu observar que a política energética brasileira, atuando de forma tradicional, procurou suprir as demandas energéticas baseando-se no conceito de energia firme: maior quantidade, melhor qualidade e máxima estabilidade. Com base nessa premissa, as opções de geração costumaram a ser definidas a partir de grandes empreendimentos, que resultaram em organizações centralizadas, dotadas de elevada tecnologia, como a hidroeletricidade e a termoeletricidade (carvão, gás natural e nuclear). Devido a essa característica centralizadora, a geração de energia convencional exigiu um sistema pesado e custoso de distribuição, incluindo grandes torres de transmissão, além de subestações responsáveis pela conversão da energia de alta tensão em energia de baixa ou média tensão. Nesse sistema, somente após o processo de conversão é que a energia está preparada para ser comercializada pelas concessionárias e, em seguida, conduzida pelas linhas de distribuição até o consumidor. É um sistema caracterizado como um modelo concentrador dos processos de geração, transmissão e distribuição da energia extremamente estratégico, visando garantir a segurança e a confiabilidade do sistema nacional.

Também associado ao conceito de energia firme do modelo convencional, desenvolveu-se outra forma de produzir energia: a geração descentralizada, conhecida como geração distribuída (GD). A GD consiste numa forma de gerar energia elétrica por meio de pequenas centrais e depois inseri-la na rede de distribuição, permitindo a descentralização do sistema tradicional. Esse tipo de geração envolve qualquer modalidade de fonte renovável de energia elétrica, tais como eólica, solar, hídrica, geotérmica ou biomassa. Esta última fonte inclui o biogás.

Embora a GD seja mencionada como uma nova forma de energia na literatura do setor, a ideia de gerar energia de forma descentralizada teve início há mais de vinte

anos, com a criação da figura do autoprodutor (APE)<sup>52</sup> e do PIE<sup>53</sup> pela Lei nº 9.074/1995, regulamentada pelo Decreto nº 2.003/1996.

Alguns anos após o surgimento das figuras do autoprodutor e do PIE, a Lei nº 10.848/2004, regulamentada pelo Decreto nº 5.163/2004, dispôs sobre a comercialização de energia elétrica e fez a primeira menção à GD<sup>54</sup>. Essa Lei exigiu que os agentes vendedores apresentassem as informações de lastro e potência para a venda de energia, a fim de garantir a totalidade dos seus contratos. Exigiu ainda que as distribuidoras localizadas na região de abrangência do SIN garantissem atendimento à totalidade de seus consumidores por meio de contratação regulada após processo de licitação. Nesse processo licitatório, as distribuidoras deveriam incluir as fontes alternativas provenientes de GD, entre outras, o que abriu possibilidades para a entrada do biogás.

A GD não objetiva substituir o modelo tradicional, mas, sim, complementá-lo, uma vez que viabiliza empreendimentos de geração em microescalas (abaixo de 5MW) instalados na própria região de carga ou consumo, evitando custos de expansão das linhas de transmissão e subestações, pois a energia produzida por pequenos geradores pode ser comercializada e injetada diretamente nas linhas de distribuição. Assim, a GD permite um modelo descentralizado de geração elétrica, diferente do convencional, mas complementar, aumentando ganhos com a eficiência global do sistema, conforme pode ser visualizado na Figura 23.

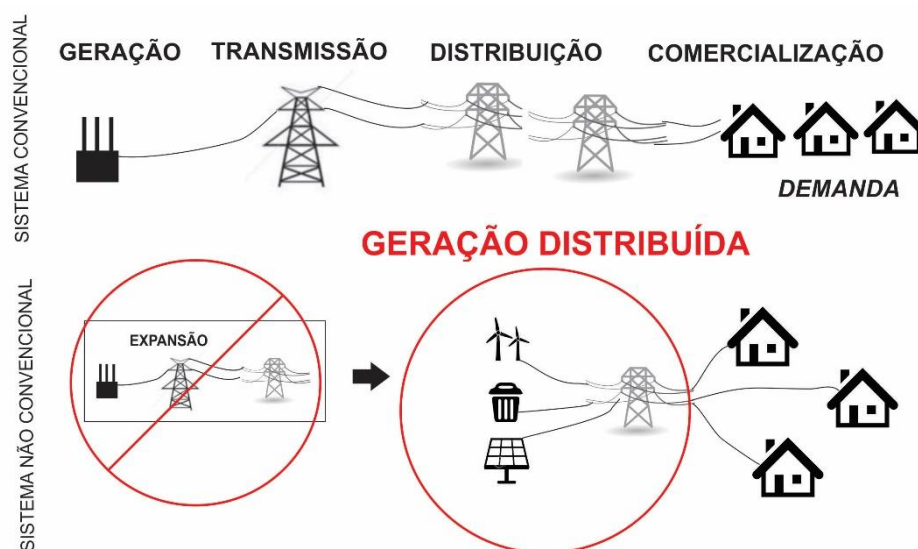
---

<sup>52</sup> Autoprodutor de energia elétrica: pessoa física ou jurídica ou empresas reunidas em consórcio que recebem concessão ou autorização para produzir energia elétrica destinada ao seu uso exclusivo (BRASIL, 1996).

<sup>53</sup> Produtor independente de energia elétrica: pessoa jurídica ou empresas reunidas em consórcio que recebem concessão ou autorização para produzir energia elétrica destinada ao comércio de toda ou parte da energia produzida, por sua conta e risco (BRASIL, 1996).

<sup>54</sup> Ver artigo 2º, § 8º, inciso II, da Lei nº 10.848/2004.

Figura 23 – Geração de energia elétrica convencional x geração distribuída



Fonte: Elaboração própria.

Embora descentralizado, o modelo de GD é capaz de produzir energia de qualidade e contínua. A GD permite um novo olhar sobre o modelo do sistema elétrico, que traz benefícios significativos em relação ao modelo tradicional, tais como eficiência energética na região onde opera, readequação e/ou economia de custos de investimentos em linhas de transmissão; aplicação de fontes renováveis; descentralização e viabilização de pequenas centrais de geração; energia adequada ao tipo de consumo, e amplos efeitos econômicos locais.

A partir do Decreto nº 5.163/2004, a GD deu maior destaque ao biogás no Brasil. Por meio de algumas unidades de demonstração implementadas pelo Programa de GD da Itaipu Binacional em parceria com a Companhia Paranaense de Energia (Copel), a Aneel publicou a Nota Técnica Aneel nº 042/2008, que autorizou a concessionária local a comprar energia por essa modalidade a partir de seis projetos de GD com o biogás e o saneamento ambiental, no oeste do Paraná. Baseada nessa Nota Técnica, nesse mesmo ano a Copel publicou a Chamada Pública nº 005/2008, por meio da qual contratava experimentalmente os protótipos da Itaipu.

Em seguida, por meio de Chamada Pública, a Aneel promoveu uma discussão sobre a GD com biogás, que resultou em modificações nos Procedimentos de Distribuição (Prodist), registradas nas Resoluções Normativas Aneel nº 390/2009 e nº 395/2009. Essas Resoluções estabeleciam os requisitos necessários à outorga de autorização



para exploração e alteração da capacidade instalada de usinas termelétricas e de outras fontes renováveis de energia, além de fixar procedimentos para registro de centrais geradoras com baixa capacidade instalada, excluindo as fontes de energia primária hidráulica, eólica e nuclear.

No ano seguinte (2010), a Copel publicou um manual técnico de GD que incluiu biogás e saneamento ambiental, iniciativa que definiu condições para a conexão e acesso de geração à rede de distribuição. Esse manual significou grande avanço nos conceitos, metodologias e padrões relativos à GD de energia elétrica. Nessa perspectiva, a Aneel publicou, em 2012, a Resolução Normativa nº 482/2012, considerada um marco do setor porque reduziu barreiras à comercialização, ao estabelecer as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica e para o sistema de compensação de energia elétrica. No ano de 2015, a Aneel complementou a Resolução Normativa nº 482/2012 com a Resolução Normativa nº 687/2015.

No item a seguir, trata-se mais especificamente dessa Regulação associada ao comércio e aproveitamento do biogás de RSU para geração de energia elétrica.

#### **5.1.4 Regulação e aproveitamento do biogás de RSU para geração de energia elétrica**

Observa-se que, inserido no modelo de geração de energia elétrica não convencional, o biogás vem merecendo significativo realce no setor elétrico brasileiro. Na regulação que sucedeu a criação da Resolução Normativa Aneel nº 482/2012, mencionada em item anterior, editaram-se outras resoluções normativas e notas técnicas que também conferiram destaque ao biogás. Como exemplo, menciona-se a Nota Técnica EPE nº 13/2014, que insere o biogás nos estudos de planejamento energético do Brasil para o ano de 2050. Esse documento indica que a demanda atual de energia no País tem encontrado limitações devido à perda de capacidade de investimentos de grandes projetos geradores, o que reforça a ideia de crescimento da oferta descentralizada de energia.

Nesse contexto, o biogás apresenta diversas vantagens, em virtude de ser um energético flexível tanto no uso – porque pode ser convertido em eletricidade, injetado na rede de gás após tratamento, ou usado como combustível – como na produção, porque pode ser produzido a partir de resíduos rurais, industriais ou urbanos. Tais características sinalizam um grau de descentralização na produção e uso de combustíveis, que insere um fator de inovação no setor energético como um todo (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2014d). Para a fonte proveniente de RSU, destacaram-se algumas opções regulatórias que deram continuidade ao aproveitamento desse energético no setor elétrico.

A Nota Técnica EPE DEA n° 16/2014, relativa ao aproveitamento energético dos RSU, apresenta as possibilidades de comercialização do biogás para geração de energia elétrica resumidas em três alternativas: (1) venda no mercado livre, (2) autoprodução e (3) sistema de compensação (*Net Metering*), cada qual com sua influência regulatória. No novo modelo do mercado elétrico, as regras do comércio de energia estão claramente definidas no Decreto n° 5.163/2004 bem como na Resolução Normativa Aneel n° 82/2012. Cabe ressaltar que a participação em leilões ainda não encontrou viabilidade na maioria das simulações da EPE (informadas na Nota Técnica EPE DEA n° 16/2014). Por esse motivo essa opção não será tratada neste estudo.

A primeira possibilidade é a venda no mercado livre, feita por meio de contratos bilaterais com consumidores livres. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (2014b, p. 22), "[...] esta opção abre uma janela de oportunidade de competição com valores de tarifas de consumidores finais, que são bem superiores aos valores praticados nos leilões". É uma opção regulatória disposta na Resolução Normativa Aneel n° 271/2007 que também cria oportunidades para a GD.

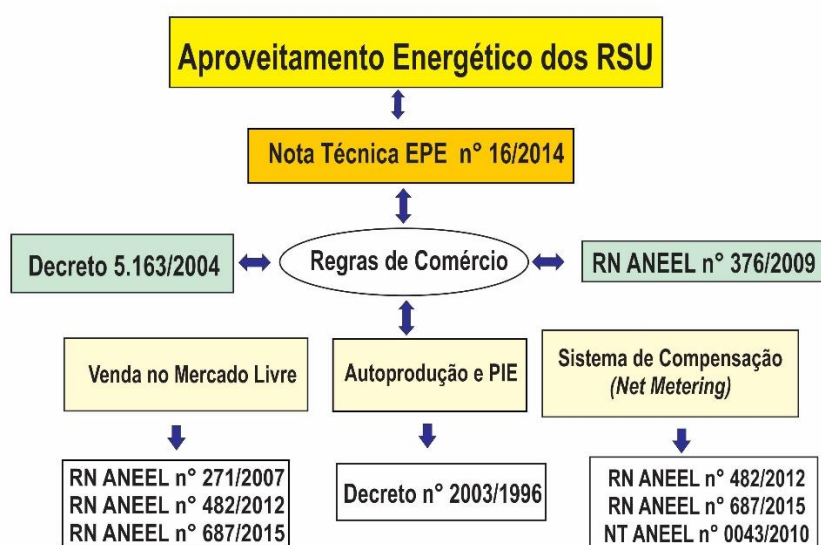
A segunda possibilidade emerge com a figura do autoprodutor ou do PIE, conforme já mencionado em item anterior, com as mesmas características da primeira opção, porém com mais vantagem, devido à exclusão de tributos que afetam os preços finais de energia elétrica. Esta opção é regulamentada pelo Decreto n° 2.003/1996.

A terceira possibilidade aloca-se na contratação via sistema de compensação de energia, ou *Net Metering*, que consiste na adoção do sistema de medição líquida da energia injetada na rede de distribuição, descontado o consumo, e na utilização

desse crédito no abatimento da fatura nos meses posteriores, conforme disposto na Nota Técnica Aneel nº 0043/2010. No caso da biodigestão para unidade de até 1MW, é uma possibilidade estabelecida na Resolução Normativa Aneel nº 482/2012, complementada pela Resolução Normativa Aneel nº 687/2015.

As possibilidades abordadas acima estão resumidas na Figura 24 e serão tratadas detalhadamente nos itens a seguir.

Figura 24 – Possibilidades regulatórias de aproveitamento energético dos RSU



Fonte: Elaboração própria com base em informações da Empresa de Pesquisa Energética (2014b).

### 5.1.5 Comercialização no mercado livre e geração distribuída

De acordo com Tolmasquim (2015), o ACL é o segmento do mercado em que ocorrem as operações de compra e venda de energia por meio de contratos bilaterais negociados livremente entre agentes concessionários, permissionários e autorizados de geração, importadores, comercializadores, exportadores de energia, consumidores livres e especiais.

Essa alternativa regulatória permite o estabelecimento de contratos bilaterais com consumidores cuja demanda esteja entre 0,5 e 3MW (considerados “especiais”) ou acima desse valor (considerados “livres”), sob análise dos custos de segurança, para atendimento em horários de manutenção e falhas ocasionais. Nesta opção, os

valores de tarifa de uso do sistema de transmissão de energia elétrica (Tust) e de tarifa de uso do sistema de distribuição de energia elétrica (Tusd) devem ser acrescentados para eletricidade proveniente de, no mínimo, 50% dos resíduos ou esgoto em plantas de até 30MW, de acordo com a Resolução Normativa Aneel nº 271/2007 (EMPRESA DE ENERGIA ENERGÉTICA, 2014b).

A Resolução Normativa Aneel nº 271, de 3 de julho de 2007, no artigo 1º, estabelece os procedimentos ligados à redução de tarifas pelo uso dos sistemas elétricos de transmissão e distribuição, aplicáveis a empreendimentos hidrelétricos (com potência igual ou inferior a 1MW), para os caracterizados como PCH, e àqueles que têm como base fontes solares, eólicas, biomassas ou cogeração qualificada, cuja potência injetada na rede de transmissão ou distribuição seja menor ou igual a 30MW, a incidir tanto na produção quanto no consumo da energia comercializada pelo aproveitamento.

Na forma da Resolução Normativa Aneel nº 271/2007, destaca-se a fonte de biomassa na qual os RSU estão inseridos. De modo geral, a regra vale-se do desconto de 50% na tarifa de uso para os empreendimentos mencionados (PCHs, fontes solares, fontes eólicas, biomassa ou cogeração). As condições para esse desconto estão dispostas no artigo 3º: “[...] fica assegurado o direito a 100% (cem por cento) de redução, a ser aplicado às tarifas de uso dos sistemas elétricos de transmissão e de distribuição” (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2007). Essa redução incide sobre a produção e o consumo de energia comercializada pelos empreendimentos citados, desde que atendam a uma das seguintes condicionantes:

[...]

Art. 3º - Fica assegurado o direito a 100% (cem por cento) de redução, a ser aplicado às tarifas de uso dos sistemas elétricos de transmissão e de distribuição, incidindo na produção e no consumo da energia comercializada pelos empreendimentos a que se refere o art. 1º desta Resolução, desde que atenda a uma das seguintes condições:

[...]

IV – aqueles que utilizem como insumo energético, no mínimo, 50% (cinquenta por cento) de biomassa composta de resíduos sólidos urbanos e/ou de biogás de aterro sanitário ou biodigestores de resíduos vegetais ou animais, assim como lodos de estações de tratamento de esgoto (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2007).

Além das possibilidades mencionadas na Resolução Normativa Aneel nº 271/2007, existe também a possibilidade de atuação como gerador distribuído, disposta na

Resolução Normativa Aneel nº 482/2012, considerada um marco regulatório para a descentralização da geração de energia no Brasil, conforme já mencionado em itens anteriores. Essa Resolução permite a inserção do potencial de até 1MW<sup>55</sup> na rede de distribuição, incluindo a baixa tensão. Assim, é mais uma alternativa que auxilia algumas opções tecnológicas de tratamento de RSU na aquisição de mais rentabilidade e comprovação de viabilidade técnica e econômica de empreendimentos do tipo.

Para efeitos da Resolução Normativa Aneel nº 482/2012, complementada pela Resolução Normativa Aneel nº 687/2015, que estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, além de outras providências, as seguintes definições foram adotadas:

[...]

Art. 1º Alterar o art. 2º da Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, que passa a vigorar com a seguinte redação:

“Art. 2º

I - **microgeração distribuída**: central geradora de energia elétrica, com potência instalada **menor ou igual a 75kW** e que utilize cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras;

II - **minigeração distribuída**: central geradora de energia elétrica, com potência instalada **superior a 75kW** e menor ou igual a 3MW para fontes hídricas **ou menor ou igual a 5MW** para cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou para as demais fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras;

III - **sistema de compensação de energia elétrica**: sistema no qual a **energia ativa injetada** por unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída **é cedida**, por meio de empréstimo gratuito, à distribuidora local **e posteriormente compensada** com o consumo de energia elétrica ativa (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2015a, grifo nosso).

As concessionárias de distribuição podem atender até 10% dos mercados com geradores distribuídos. Entretanto, existe uma dificuldade que precisa ser superada: o Valor de Referência (VR). O valor remunerado, neste processo de comercialização, engata na barreira do VR, que, no ano de 2013 (ano do cálculo econômico dos empreendimentos analisados no estudo da Nota Técnica EPE DEA nº 16/2014) foi de R\$ 129/MWh, remunerando, portanto, apenas a tarifa de equilíbrio

---

<sup>55</sup> Valor alterado para até 5MW, conforme disposto no art.1º da Resolução Normativa Aneel nº 687/2015.

no caso de redução de investimentos e utilização de subsídios e financiamentos, como o do Fundo Clima, por exemplo (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2014c).

#### **5.1.6 Comercialização por meio de autoprodução e produção independente**

A autoprodução e a produção independente de energia também são opções relevantes a serem consideradas no contexto regulatório de aproveitamento do biogás. Ambas apresentam as mesmas características comentadas no item anterior, porém com o benefício da retirada dos tributos relativos à comercialização de eletricidade.

O autoprodutor é conceituado como pessoa física ou jurídica ou empresas agrupadas em consórcio que recebem concessão ou autorização para produzir energia destinada a uso exclusivo próprio. A diferença em relação ao PIE é que este, por concessão ou autorização do Poder Público, produz energia elétrica para ser comercializada de forma total ou parcial, por sua conta e risco.

Este regime está conceituado no Decreto nº 2.003/1996, já citado em itens anteriores. Assim, para produzir energia em ambos os regimes é preciso obter concessão ou autorização do Poder Público, conforme exigência da legislação. No caso do autoprodutor, a outorga de concessão ou autorização condiciona-se à comprovação de que a energia produzida, tanto atual quanto projetada, se destina a consumo próprio.

Além disso, o poder concedente ainda faculta: (1) cessão e permuta de energia e potência entre autoprodutores consorciados em um mesmo empreendimento, na barra da usina; (2) compra da produção excedente pelo concessionário ou permissionário distribuidor; (3) permuta de energia com concessionário ou permissionário distribuidor, em montantes equivalentes, de forma a possibilitar o consumo em instalações industriais do autoprodutor, em locais diferentes dos da geração (TOLMASQUIM, 2015).

No caso de uma usina termelétrica maior que 5MW, basta uma autorização. Para a implantação de termelétrica menor ou igual a 5MW é preciso apenas que o autoprodutor ou o PIE comunique o registro ao órgão regulador.

Conforme disposto no artigo 14 do Decreto nº 2.003/1996 (BRASIL, 1996), a operação energética das centrais geradoras por produtor independente e autoprodutor pode ocorrer na modalidade tanto integrada como não integrada. No que se refere à integrada, Tolmasquim (2015) afirma que as operações ficam submetidas às regras operativas do ONS. Buneder, Camponogara e Pantaleão (2014) acrescentam que essa modalidade é necessária quando a operação causa elevado impacto na rede elétrica. Já a modalidade não integrada ocorre quando não é causado nenhum impacto significativo na rede elétrica.

Nesse cenário, os autoprodutores também estão sob regime especial. Pagam somente a parcela referente ao Encargo de Energia de Reserva (EER) decorrente da interligação ao SIN, parcela proporcional ao montante da energia do sistema que consomem. Os demais usuários do SIN, inclusive os consumidores livres e potencialmente livres, dividem todos os custos da contratação, inclusive os administrativos, financeiros e tributários (TOLMASQUIM, 2015).

O PIE está submetido às normas de comercialização regulada ou livre, conforme dispositivos legais. Tem livre acesso aos sistemas de transmissão e distribuição, mas deve pagar os custos de transporte. Já os autoprodutores têm acesso aos sistemas de transmissão e distribuição com ressarcimento do custo de transporte.

As disposições relativas ao PIE, referentes à comercialização de potência ou energia, são explicadas no artigo 23 do Decreto nº 2003/1996:

[...]

Art. 23. O produtor independente poderá comercializar a potência e/ou energia com:

I - concessionário ou permissionário de serviço público de energia elétrica;

II - consumidores de energia elétrica nas condições estabelecidas nos artigos 15 e 16 da Lei nº 9.074, de 1995;

III - consumidores de energia elétrica integrantes de complexo industrial ou comercial, aos quais forneça vapor ou outro insumo oriundo de processo de cogeração;

IV - conjunto de consumidores de energia elétrica, independentemente de tensão e carga, nas condições previamente ajustadas com o concessionário local de distribuição;

V - qualquer consumidor que demonstre ao poder concedente não ter o concessionário local lhe assegurado o fornecimento no prazo de até 180 dias, contado da respectiva solicitação.

Parágrafo único. A comercialização de energia elétrica nas hipóteses dos incisos I, IV e V deste artigo deverá ser feita a preços sujeitos aos critérios gerais fixados pelo poder concedente (BRASIL,1996).

Tolmasquim (2015) aponta ainda a possibilidade de o PIE comercializar potência ou energia com os consumidores livres, o que aumenta o leque de abrangência e comercialização nesse regime.

### 5.1.7 O sistema de compensação de energia elétrica

Na sequência das mudanças regulatórias ocorridas no setor elétrico brasileiro, o sistema de compensação de energia elétrica também se caracteriza como uma importante inovação regulatória trazida pela Resolução Normativa Aneel nº 482/2012, complementada pela Resolução Normativa Aneel nº 687/2015.

Conhecido também no setor energético como *Net Metering*, é um sistema de compensação de energia elétrica que permite que a energia excedente gerada pela unidade consumidora com micro ou minigeração seja inserida diretamente na rede da distribuidora. Esta funciona como uma espécie de bateria, ao armazenar o excedente gerado até o momento em que a unidade consumidora necessite de energia. Assim, a energia elétrica gerada nas unidades consumidoras é cedida à distribuidora local por meio de um empréstimo, de forma gratuita, e depois compensada com o consumo de energia elétrica dessa mesma unidade ou de outra unidade consumidora de mesma titularidade.

É disposto na Resolução nº 687/2015:

[...]

Art. 2º Para efeitos desta Resolução, ficam adotadas as seguintes definições:

[...]

III - sistema de compensação de energia elétrica: sistema no qual a energia ativa injetada por unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída é cedida, por meio de empréstimo gratuito, à distribuidora local e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa; (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2015a).

Conforme disposto na Resolução de 2012, aprimorada posteriormente pela Resolução Normativa Aneel nº 687/2015, entende-se por microgeração distribuída a central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75kW, que utilize cogeração qualificada ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada



à rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras. Entende-se por minigeração distribuída a central geradora de energia elétrica com potência instalada superior a 75kW e menor ou igual a 3MW para fontes hídricas, ou menor ou igual a 5MW para cogeração qualificada ou para as demais fontes renováveis de energia elétrica.

Cabe reforçar que essas alternativas só podem ser aplicadas no caso de energia proveniente de fonte hídrica, solar, eólica, biomassa ou de cogeração qualificada. A ideia da regulação é promover e incentivar cada vez mais o uso de uma energia considerada “limpa” e sustentável em todo o País, em ambiente tanto residencial como industrial.

A contabilidade da compensação da energia injetada por pequenos consumidores é resumida no artigo 6º, § 1º, da Resolução Normativa Aneel nº 482/2012:

[...]

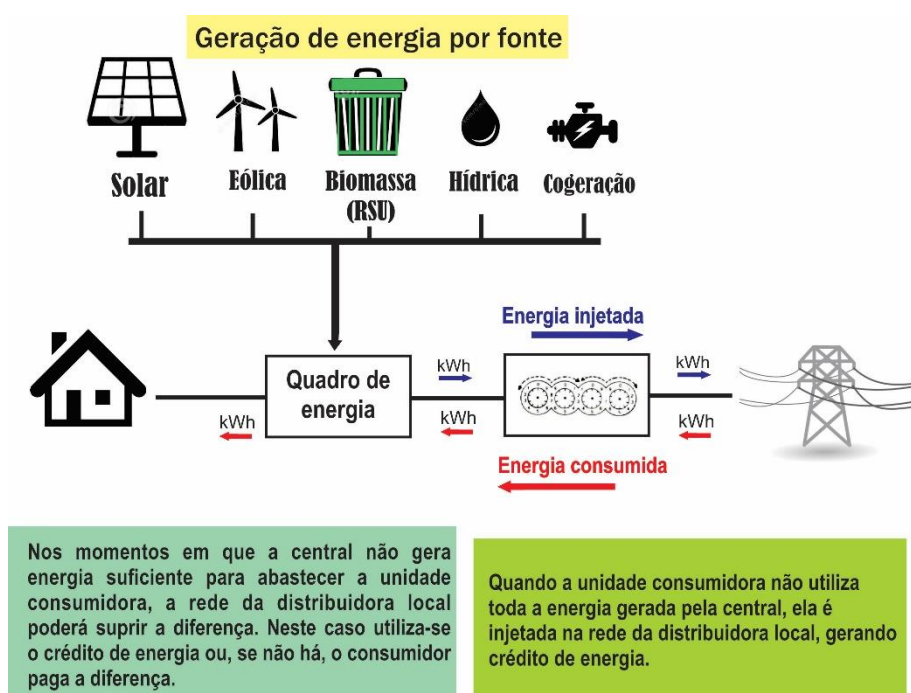
Art 6º Podem aderir ao sistema de compensação de energia elétrica os consumidores responsáveis por unidade consumidora:

[...]

§1º Para fins de compensação, a energia ativa injetada no sistema de distribuição pela unidade consumidora será cedida a título de empréstimo gratuito para a distribuidora, passando a unidade consumidora a ter um crédito em quantidade de energia ativa a ser consumida por um prazo de 60 (sessenta) meses (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2012b).

Para Rauschmayer e Galdino (2014), o artigo 6º mencionado descreve o princípio do *net metering* de forma simplificada, ou seja, o consumidor entrega energia à concessionária para que esta seja devolvida em outro horário, num procedimento semelhante ao de uma conta corrente bancária. Em síntese, na compreensão da Aneel, não existe venda de mercadoria, tampouco um valor financeiro atribuído à energia injetada, mas, sim, um balanço de energia em kWh. Na Figura 25 ilustra-se esse processo.

Figura 25 – Sistema de Compensação de Energia Elétrica



Fonte: Elaboração própria com base em dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (2016a).

Na Figura 25, destaca-se a fonte de energia a partir da biomassa de RSU. O interessado em investir nesse sistema de compensação tem como benefício a possibilidade de abatimento do próprio consumo de energia, pois, no momento em que devolve a energia elétrica que não utiliza, obtém um “saldo positivo” que pode ser deduzido da próxima fatura ou nos sessenta meses subsequentes, conforme complementado pela Resolução Normativa Aneel nº 687/2015.

Nesse sistema, o consumidor ainda pode utilizar o saldo positivo em outras unidades cadastradas, dentro da mesma área de concessão. De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (2016a), essas unidades podem ser caracterizadas como de autoconsumo remoto, de geração compartilhada, ou como integrantes de empreendimentos de múltiplas unidades consumidoras (condomínios), localizadas em região diferente do ponto de consumo. São assim definidas:

- autoconsumo remoto: caracterizado por unidades consumidoras, de pessoa jurídica com mesma titularidade, incluídas a matriz e a filial, ou de pessoa física que possua unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída

em local diferente das unidades consumidoras, dentro da mesma área de concessão ou permissão, nas quais a energia excedente é compensada;

- geração compartilhada: unidades resultantes da reunião de consumidores dentro da mesma área de concessão ou permissão, por meio de consórcio ou cooperativa, compostas por pessoas físicas ou jurídicas que possuam unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída em local diferente das unidades consumidoras, nas quais a energia excedente é compensada;
- Condomínios: caracterizados pelo uso da energia elétrica de forma independente, nos quais cada fração, com uso individualizado, constitui uma unidade consumidora, e as instalações para atendimento das áreas de uso comum constituem uma unidade consumidora distinta. Nesse caso, a responsabilidade deve ser do condomínio, da administração ou do proprietário do empreendimento com microgeração ou minigeração distribuída, desde que as unidades consumidoras estejam localizadas em uma mesma propriedade ou em propriedades vizinhas. Nesse processo, é vedada a utilização de vias públicas, de passagem aérea ou subterrânea e de propriedades de terceiros não integrantes do empreendimento (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2016a).

Trata-se de um benefício comumente utilizado por indústrias de grande porte que tenham várias unidades consumidoras. Além de beneficiar o consumidor final, também contribui para o meio ambiente, pois o processo permite reduzir custos com investimentos em transmissão de energia, incentiva o uso de fontes renováveis e favorece o melhor aproveitamento dos recursos.

Apesar dos benefícios citados, cabe mencionar que, em alguns locais, pode haver incidência de Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Prestação de Serviços (ICMS) sobre a energia compensada. Nesse caso, a compensação de energia é interessante caso não exista a incidência de imposto e tributos na região. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (2014b), a incidência desse tributo pode inviabilizar esse tipo de aproveitamento.

### 5.1.8 O ICMS no sistema de compensação de energia elétrica

Segundo Rauschmayer e Galdino (2014), a ideia do *net metering* é fugir das questões tributárias. Conforme explicado, o cliente deposita a energia excedente na rede da concessionária, que a devolve em outro horário. A conta mensal resume-se simplesmente no cálculo sobre a diferença entre consumo e geração. Esse foi o conceito adotado no Brasil pela Aneel. Todavia, os autores acrescentam que o Conselho Nacional de Política Fazendária (Confaz) tem um entendimento diferente, conforme publicado no Convênio ICMS nº 6/2013, tributando a energia gerada pelo consumidor no momento em que é devolvida pela concessionária.

Logo, existe uma discussão relativa ao Convênio ICMS nº16/2015 do Confaz, que autoriza a isenção de ICMS em operações internas relativas à circulação de energia elétrica sujeitas a faturamento sob o sistema de compensação de energia elétrica, tratado na Resolução Normativa Aneel nº 482/2012<sup>56</sup>. Porém, a discussão permeia aspectos relativos à adesão ao Convênio mencionado, uma vez que nem todos os estados do Brasil aderiram, e o Espírito Santo é um deles<sup>57</sup>.

## 5.2 REGULAÇÃO DO SETOR DE GÁS NATURAL

A exploração do gás natural no Brasil começou a partir de 1940, antes mesmo da criação da Petrobrás, no estado da Bahia, com a descoberta de petróleo e do gás natural no Recôncavo Baiano. O direito de exploração desses produtos foi concedido a empresas privadas nacionais com acionistas brasileiros autorizados pelo Conselho Nacional do Petróleo (CNP). O CNP foi a primeira iniciativa do Estado para regular a indústria do petróleo. A partir de 1950, iniciou-se a modificação desse quadro institucional (AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS, 2009).

---

<sup>56</sup> Não houve adequação desse acordo para a escala da Resolução Normativa Aneel nº687/2015.

<sup>57</sup> Nesse aspecto, o fato de o estado do Espírito Santo não aderir ao convênio dificulta investimentos no setor e pode gerar desinteresse por parte de empreendedores quanto ao aproveitamento dos recursos energéticos provenientes de fontes renováveis, inclusive do biogás.

A constatação da vulnerabilidade do Brasil relativa ao suprimento petrolífero abriu uma discussão sobre a possibilidade de se desenvolver uma indústria nacional do petróleo no País. Tal fato gerou uma campanha popular conhecida como "O Petróleo é Nosso", que resultou na criação da Petrobras pela Lei nº 2.004/1953. Essa Lei determinou o monopólio da União sobre as atividades de pesquisa e lavra de jazidas, assim como de refino (exceto para as refinarias já existentes) e transporte marítimo de petróleo. Além disso, também estabeleceu que o monopólio seria exercido tanto pela Petrobras (órgão executor do monopólio da União) quanto pelo CNP (na fiscalização das atividades decorrentes do monopólio) (AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCMBUSTÍVEIS, 2009).

O resultado, na prática, representou o monopólio da Petrobras sobre todas as atividades da indústria do petróleo e do gás natural por mais de quarenta anos. Assim, o gás natural foi produzido e vendido pela Petrobras associado à mesma logística de produção do petróleo (AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCMBUSTÍVEIS, 2009). Em decorrência, sempre houve uma grande dependência dessa indústria à indústria de petróleo, já que o preço do petróleo e de seus derivados estava amplamente vinculado à formação do preço do gás natural. Soma-se a isso, também, a viabilidade da construção da infraestrutura de transporte e distribuição de gás natural (CAMPOS, 2016b).

Nesse contexto, o desenvolvimento da indústria de gás natural no Brasil ocorreu por intermédio de empresas verticalmente integradas (o setor de comercialização estava unido ao de transporte e distribuição), não sujeitas a concorrência, com contratos de longo prazo e formação de preços com base em combustíveis substitutos (*netback value*) (CAMPOS, 2016b). Todavia, segundo a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (2009), nas últimas duas décadas essa realidade vem-se modificando.

As principais mudanças ocorridas no setor de gás natural no Brasil acompanharam uma tendência de reestruturação ocorrida também em indústrias de infraestrutura, em diversos países do mundo. Nos USA e na Europa, por exemplo, iniciou-se, a partir de 1980, o processo de reforma das indústrias de telecomunicação, energia elétrica, fornecimento de água e de gás natural. Algumas indústrias foram desverticalizadas, e outras, privatizadas, o que também exerceu influências sobre o

Brasil (JOSCOW, 2000; ARENTSEN, 2003; STERN, 1998, apud ALMEIDA; FERARRO, 2013).

De modo geral, o principal objetivo das mudanças ocorridas no Brasil foi inserir a competição nas atividades potencialmente concorrenciais e a regulação nas atividades naturalmente monopólicas. Para tal, houve a necessidade de separação dos diferentes segmentos das indústrias. No Quadro 14, apresentam-se as principais mudanças que ocorreram no setor de gás natural no Brasil.

Quadro 14 – Mudanças ocorridas no setor de gás natural no Brasil

(Continua)

Características	MUDANÇAS DO NOVO MODELO	
	LEI DO PETRÓLEO (n° 9.478/1997)	LEI DO GÁS (n° 11.909/2009)
Empresas verticalizadas. Monopólio estatal da Petrobrás.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Quebra do monopólio da Petrobrás com a entrada de novos agentes nas atividades de exploração e produção.</li> <li>▶ Exigência de separação contábil e jurídica.</li> <li>▶ Formação de parcerias, consórcios e alianças estratégicas entre a Petrobrás e companhias internacionais de petróleo.</li> <li>▶ Atuação de novos concessionários (de forma isolada ou por consórcios).</li> </ul>	Entrada de novos agentes: <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ autoprodutores</li> <li>▶ autoimportadores</li> <li>▶ consumidores livres.</li> </ul>
Transporte marítimo e duto viário exclusivos da Petrobrás.	Regime legal do gasoduto: <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Autorização para todos os gasodutos de transporte.</li> </ul>	Regime legal do gasoduto: <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Autorização do gasoduto sob acordo internacional e para fins específicos.</li> <li>▶ Concessão: demais situações.</li> <li>▶ Regime dos novos gasodutos ditados pelo MME.</li> <li>▶ Autorização mantida para gasodutos existentes.</li> </ul>
Contratos rígidos e de longo prazo.	Contratos mais flexíveis. <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Prazos de até seis anos para a suspensão de livre acesso no caso de novos gasodutos.</li> </ul>	Contratos mais flexíveis. <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Prazos de até dez anos para a suspensão do livre acesso no caso de gasodutos existentes e sob licenciamento.</li> <li>▶ Determinação de novos gasodutos por ANP e MME.</li> </ul>
Acesso aos gasodutos apenas pela Petrobrás.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Livre acesso negociado para todos os gasodutos existentes.</li> <li>▶ Atuação da ANP somente em caso de conflito.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Livre acesso negociado para gasodutos existentes e novos gasodutos autorizados.</li> <li>▶ Regulação somente para gasodutos sob concessão.</li> </ul>

Quadro 14 - Mudanças ocorridas no setor de gás natural no Brasil

(Conclusão)

Modelo Antigo (até 1997)	LEI DO PETRÓLEO (n° 9.478/1997)	LEI DO GÁS (n° 11.909/2009)
Empresas verticalizadas, com a mesma configuração contábil.	<i>Unbulling</i> : sem restrições à verticalização. ▶ Obrigatoriedade de manter empresa separada para construção e operação.	<i>Unbulling</i> : sem restrições à verticalização. ▶ Obrigatoriedade de manter empresa separada para construção e operação. ▶ Contabilidades separadas para transporte e armazenamento no caso de gasodutos sob concessão.
	Concurso público ( <i>open season</i> ): ▶ Concurso público iniciado pelo transportador quando carregador requisitar nova capacidade firme e após um ano do último concurso realizado.	Concurso público ( <i>open season</i> ): ▶ Apenas para expandir a capacidade de gasodutos novos e existentes. ▶ Concurso regulado pelo MME e implementado pela ANP.

Fonte: Elaboração própria com base em dados da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (2001c) e de Campos (2016b).

Até o ano de 1997, prevaleceu no Brasil o modelo de monopólio estatal verticalizado (Modelo Antigo), caracterizado pela atuação constante do Estado em todos os segmentos (produção, importação, exportação, processamento, transporte, estocagem, comercialização e distribuição), por meio da atuação da Petrobras.

No modelo tradicional, a regulação se resumia ao controle do poder de mercado dos segmentos caracterizados por monopólios naturais (transporte e distribuição) e à regulação dos contratos de exploração (ALMEIDA; FERRARO, 2013).

Segundo Almeida e Ferraro (2013), após o processo de abertura da desverticalização da indústria de gás natural, surgiram alguns problemas de ampla complexidade para os órgãos reguladores associados à busca pela eficiência econômica, ao livre acesso às infraestruturas de rede, às regras de separação da cadeia e à regulação de mercados secundários. Todo esse aparato foi incluído na dinâmica do setor de gás natural. Assim, “[...] o novo modelo de concorrência da indústria de gás redefiniu os regimes regulatórios historicamente usados na indústria” (ALMEIDA; FERRARO, 2013, p. 166).

Esses novos regimes serão apresentados na sequência, dando-se ênfase às principais mudanças ocorridas no setor de gás natural do Brasil.

### 5.2.1 Principais mudanças regulatórias do setor de gás natural

Embasados na premissa de separação das atividades, a fim de promover a entrada de outros agentes no setor de gás natural, os dois principais marcos regulatórios da reforma da indústria gasífera no País foram: (1) a Lei nº 9.478/1997, conhecida como “Lei do Petróleo” e (2) a Lei nº 11.909/2009, conhecida como “Lei do Gás”, regulamentada pelo Decreto nº 7.382/2010. Campos (2016b) pontua que, antes disso, a Constituição Federal de 1988 (§ 2º, artigo 25, reeditado pela Emenda Constitucional nº 5/1995<sup>58</sup>) ditava as regras do setor no caso da distribuição de gás canalizado.

O primeiro marco estabeleceu que o monopólio do petróleo não mais deveria ser exercido pela Petrobras<sup>59</sup>. Nesse caso, houve a necessidade de a Petrobrás criar uma subsidiária, com atribuições específicas associadas às atividades de transporte, denominada Transpetro. Dessa forma, ocorreu a separação tanto contábil como jurídica da atividade monopólica da cadeia de transporte. Contudo, a exigência de separação das atividades da cadeia não se completou totalmente, uma vez que não foram estabelecidos limites à participação de grupos econômicos nos diferentes segmentos da cadeia do gás natural (AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS, 2011).

O segundo marco, instituído pela Lei do Gás, ocorreu no Brasil após muita discussão relativa à necessidade de desenvolvimento da indústria de gás natural e ao aproveitamento dos benefícios dele provenientes. A partir da implementação dessa Lei, estabeleceu-se uma nova configuração legal e estrutural do setor, conforme observado na Figura 26.

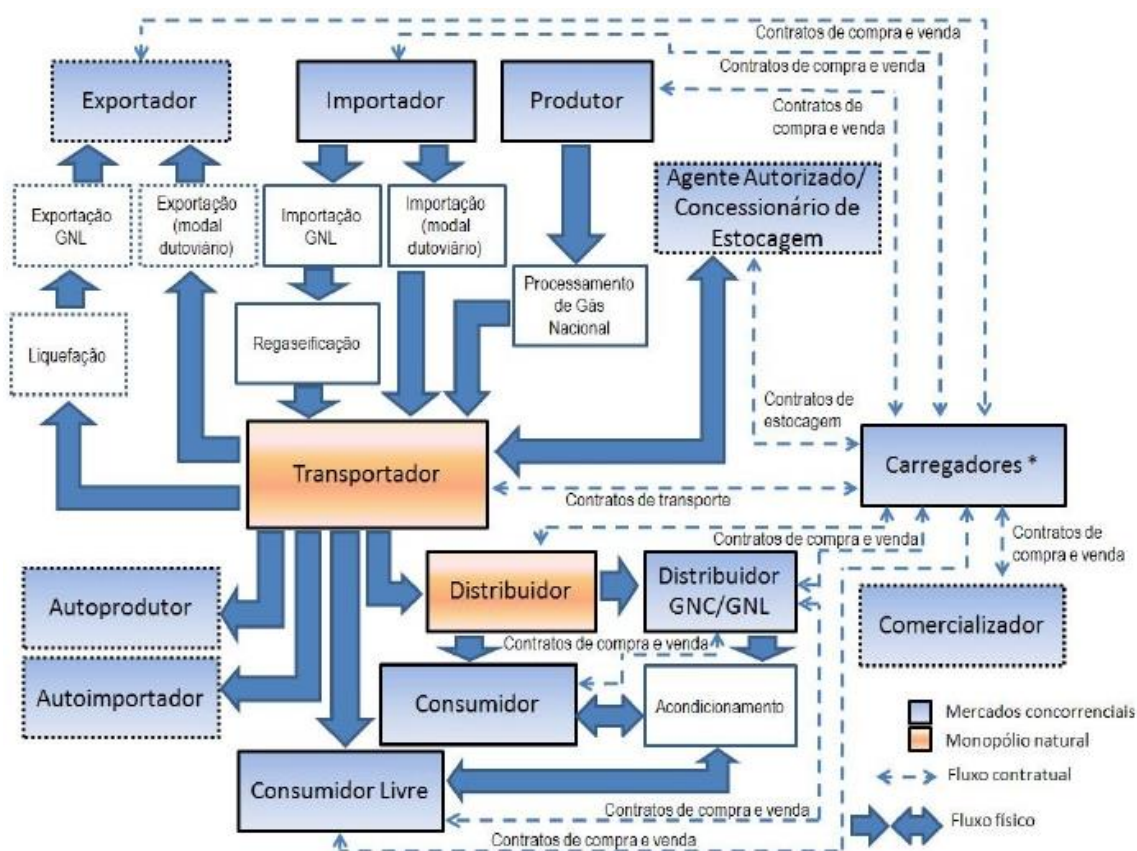
---

<sup>58</sup> Estabeleceu que a exploração dos serviços locais de gás canalizado seria de responsabilidade dos estados da Federação, e que tal atividade poderia ocorrer por meio de empresa estatal. Assim, o texto contido na Emenda Constitucional nº 5/1995 foi modificado, a fim de permitir a competição. Logo, os serviços locais de gás canalizado também poderiam ser explorados por empresas privadas, sob concessão (CAMPOS, 2016b).

<sup>59</sup> Esse fato não representou o fim do monopólio da União, uma vez que as seguintes atividades permaneceram como monopólio da entidade, podendo ser concedidas ou autorizadas a empresas pela ANP: (1) pesquisa e lavra das jazidas; (2) refino do petróleo nacional ou importado; (3) importação e exportação de petróleo e gás natural; (4) transporte de petróleo e seus derivados e gás natural (AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS, 2011).



Figura 26 – Nova configuração estrutural da indústria brasileira de gás natural



Fonte: Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (2009, p. 33).

(\*) O carregador pode ser importador, exportador, produtor, distribuidor, consumidor livre ou comercializador.

Campos (2014) salienta que a Lei nº 11.909/2009 não modificou o segmento de Exploração e Produção (E&P). Essa atividade foi alterada com as leis do pré-sal<sup>60</sup>. Assim, a nova configuração estrutural estabelecida na Figura 26 tinha como objetivo a ampliação da infraestrutura de transporte de gás natural no Brasil mediante novos investimentos oriundos da ampliação da concorrência setorial. Apesar de promover as mudanças necessárias para a expansão do setor gasífero, estas as leis também geraram alguns conflitos regulatórios, tais como

[...] a adequação entre o livre acesso aos dutos e a livre iniciativa entre os agentes (Lei nº 9.478/1997) com a concentração e verticalização na atividade de transporte (situação atual); a diferença entre o sistema de tarifação da atividade de transporte (não tem tarifa regulada) e a atividade de distribuição (serviço público explorado sob o regime de concessão); e a

<sup>60</sup> Lei nº 12.276/2010 (cessão onerosa) e Lei nº 12.304/2010 (criação da Empresa Brasileira de Administração de Petróleo e Gás Natural – PPSA).

inserção da concorrência, especialmente no caso dos grandes consumidores (setor industrial e setor energético) (CAMPOS, 2016b).

Em síntese, as principais mudanças promovidas pela Lei do Gás estão baseadas nesse novo modelo de comercialização, que se dá pela entrada de novos agentes no processo: os autoprodutores, os autoimportadores e os consumidores livres. O primeiro é considerado o agente explorador e produtor de gás natural, que utiliza o total ou parte da sua produção como matéria-prima ou combustível nas suas próprias instalações industriais; o segundo é o agente autorizado a importar gás natural, que utiliza parte ou a totalidade do produto importado como matéria-prima ou combustível em suas instalações industriais; o terceiro é o consumidor livre, que, conforme lei estadual aplicada, detém a alternativa de aquisição do gás natural de qualquer agente, produtor, importador ou comercializador (BRASIL, 2009a).

Este último, na figura do consumidor livre, pode ainda estabelecer uma relação comercial diretamente com o produtor e/ou importador no caso da compra de gás natural. Com a concessionária estadual, torna-se possível fazer a reserva tanto da capacidade quanto do uso da rede de distribuição. Soma-se a isso a possibilidade de construção e implantação da estrutura de dutos sem envolvimento da distribuidora estadual, permitindo assim que esses novos agentes ampliem o seu mercado de gás natural<sup>61</sup>.

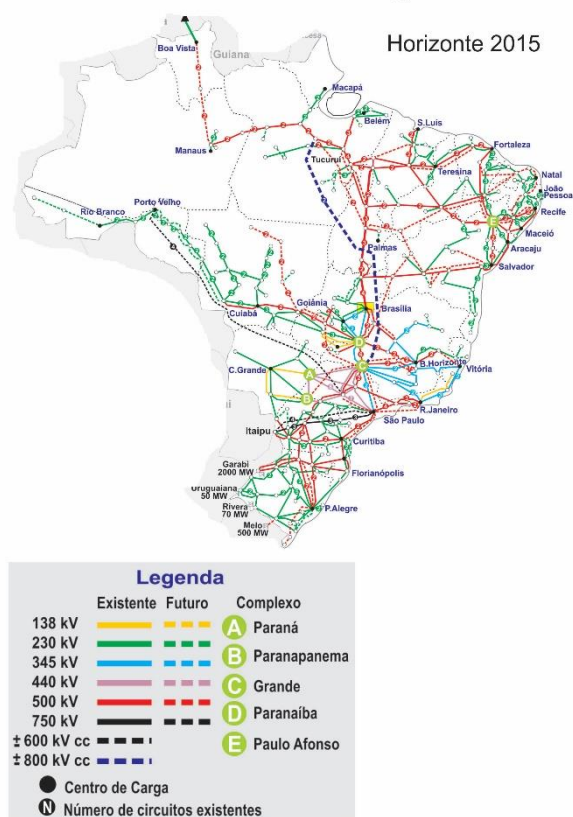
Apesar dessas importantes modificações advindas da Lei do Gás, Campos (2016b) pontua que, na prática, a expansão da malha atual ainda é bem inferior à que se esperava, e os investimentos são muito superiores aos que já foram realizados. Ao se estabelecer uma comparação entre a infraestrutura física de energia elétrica com a de gás natural (Figura 27), é possível perceber tal discrepância. Enquanto o setor elétrico apresenta cerca de 116.000km de redes de transmissão (OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, 2015), o setor de gás natural dispõe de uma malha de gasodutos de transporte de 9.244km (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2016c).

---

<sup>61</sup> CAMPOS, A.F. Aula: Regulação do Setor Petrolífero e de Gás Natural Parte II. 28 mai.2016, 13 jun. 2016. Notas de Aula.

Figura 27 – Comparação da estrutura física de energia elétrica com a de gás no Brasil

### Sistema de transmissão de energia elétrica



### Gasodutos de transporte



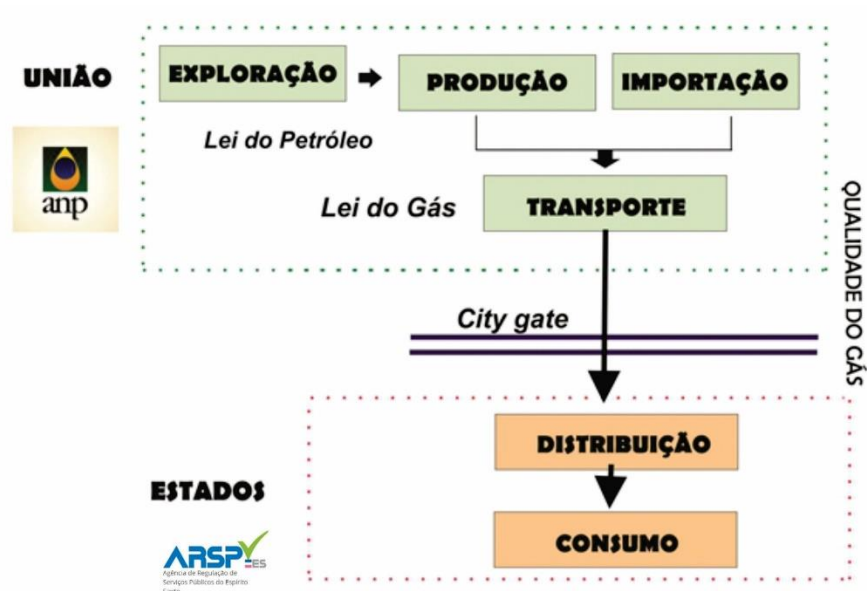
Fonte: Elaboração própria com base em dados do Operador Nacional do Sistema Elétrico (2015) e da Empresa de Pesquisa Energética (2016c).

A diferença de expansão física entre o setor de gás natural e o setor de energia elétrica, conforme apresentada na Figura 27, deu-se especialmente por insegurança regulatória e ausência de adequada resolução de temas polêmicos, tais como (1) classificação de gasodutos (gasoduto de transferência, gasoduto de transporte, gasoduto de escoamento de produção e gasoduto de distribuição, atentando-se para o fato de que a distribuição não é tratada em esfera federal, mas, sim, na estadual); (2) definições de consumidor livre, uma vez que cada estado da Federação, por meio de legislação própria, é que define parâmetros para decidir quais agentes são considerados consumidores livres; (3) acesso aos gasodutos por terceiros; (4) período de exclusividade; (5) expansão da malha e Plano Decenal de Expansão da Malha de Transporte Dutoviária (PEMAT), entre outros fatores (CAMPOS, 2016b).

Cabe enfatizar aqui o primeiro ponto, relativo aos gasodutos de distribuição e ao fato de a indústria de gás natural estar inserida em duas esferas administrativas. Nos

segmentos de pesquisa, exploração, produção, importação e transporte, a competência regulatória é de domínio federal. No segmento de distribuição, a esfera de competência regulatória é a estadual, conforme apresentado na Figura 28.

Figura 28 – Competências regulatórias do setor de gás natural



Fonte: Elaboração própria com base em informações da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (2002).

Assim dividida, a indústria de gás natural apresenta dupla regulação. Por isso costuma apresentar algumas dificuldades entre as esferas mencionadas, relativas, principalmente, à articulação entre as fronteiras de competência. Quanto a esse aspecto, cabe mencionar o posicionamento da ANP:

O poder concedente e as missões de regulação no segmento de distribuição de gás natural são de competência dos Estados da Federação, os quais começam a criar suas agências reguladoras. A atuação da ANP deverá, portanto, ser coordenada com a ação das agências estaduais, reconhecendo, no entanto, os limites de sua atuação (KRAUSE; PINTO JR., 1998, p. 85).

Quanto a isso, uma situação problemática presente no setor está relacionada aos tipos de gasodutos e seus usos e classificações, pois, no caso de gasodutos de distribuição, por exemplo, a regulação é estadual. Assim, não é rara a ocorrência de

litígios<sup>62</sup> entre agentes da indústria do gás natural, referentes a classificação e reclassificação de gasodutos de transporte, ou gasodutos de transferência e distribuição, e à competência regulatória para definir se um determinado gasoduto se encaixa nesta ou naquela classificação.

Em alguns estados, como Rio de Janeiro (CEG Rio), São Paulo (COMGÁS, Gás Natural Fenosa e GBD) e Mato Grosso (MTGÁS), as concessionárias celebram contratos diferentes<sup>63</sup>, cada qual com sua especificação, que podem tanto limitar quanto promover o uso do gás nos canais de distribuição. Nos demais estados, embora se utilizem modelos de contrato-padrão, estes também apresentam diferenças importantes, uma vez que cada reguladora tem autonomia para formular, por exemplo, conceitos do que considera consumidor livre. Na Tabela 17, apresenta-se um exemplo das diferenças conceituais entre algumas agências estaduais com relação ao consumidor livre, diferenças selecionadas tendo em vista o volume de consumo.

Tabela 17 – Conceito de consumidor livre em determinadas agências estaduais

(Continua)

REGULADORA	ESTADO	REFERÊNCIA LEGAL	DEFINIÇÃO DE CONSUMIDOR LIVRE
ARSP <sup>(1)</sup>	ES	Resolução Aspe nº 004/2011	Capítulo II, artigo 2º. Para os efeitos desta Resolução são adotadas as seguintes definições, considerando o Contrato de Concessão em vigor: [...] XVII. Consumidor de gás natural, com volume de <b>consumo igual ou superior a 35.000m³/dia</b> em um único ponto de entrega, que exerceu a opção de adquirir o gás natural de qualquer agente produtor, importador ou comercializador;

<sup>62</sup> Exemplos de litígio: (I) reclassificação do Gasoduto Atalaia-Fábrica de Fertilizantes Nitrogenados (Fafen); (II) reclassificação do Gasoduto Aratu-Camaçari; (III) reclamação perante o Supremo Tribunal Federal proposta pelo estado de São Paulo, em face da União Federal, pelo reconhecimento da competência estadual para dispor sobre o fornecimento de gás a plantas de liquefação; e (IV) dívida perdoada pelo governo de MT, mediante Decreto nº 1.007/2012 (Ver Nota 61).

<sup>63</sup> Os contratos de concessão têm diferenças importantes, em especial no que se refere aos seguintes aspectos: prazos de concessão e prorrogação; possibilidade de *by-pass* comercial (consumidores livres); separação contábil, jurídica e societária das atividades de distribuição e comercialização; investimentos; taxas de retorno; metas de qualidade dos serviços prestados; metodologia de cálculo tarifário; revisão tarifária e penalidades (Ver Nota 61).

Tabela 17 - Conceito de consumidor livre em determinadas agências estaduais

			(Conclusão)
REGULADORA	ESTADO	REFERÊNCIA LEGAL	DEFINIÇÃO DE CONSUMIDOR LIVRE
Agenera <sup>(2)</sup>	RJ	Deliberação Agenera nº 257/2008	1 - DEFINIÇÕES E INTERPRETAÇÃO DE TERMOS. Consumidor Livre: Consumidor que contrata junto à CEG RIO uma <b>capacidade diária contratada superior a 100.000m<sup>3</sup>/dia</b> , nas condições de referência, para um único ponto de entrega, situado junto à instalação receptora do Consumidor Livre [...]
Sede <sup>(3)</sup>	MG	Resolução Sede nº 17/2013	Art. 3º. Ficam estabelecidas as seguintes condições, na área de concessão, para um consumidor potencialmente livre tornar-se consumidor livre, como segue: [...] § 1º. O consumidor livre deverá ter <b>consumo diário médio, computado em período de doze meses, igual ou superior a 10.000m<sup>3</sup></b> , para permanecer na condição de consumidor livre.
Agepan <sup>(4)</sup>	MS	Portaria Agepan nº 103/2013	CAPÍTULO V, artigo 11. O Usuário novo, que ainda não for cliente da Concessionária, deverá firmar compromisso junto à Concessionária, demonstrando potencial de consumo de gás natural superior a 150.000m <sup>3</sup> /dia, para o Usuário do segmento industrial, superior a 500.000m <sup>3</sup> /dia, para o Usuário do segmento termoeletrico, e <b>superior a 1.000.000m<sup>3</sup>/dia para o Usuário de gás natural para matéria-prima ou petroquímico para ser enquadrado como Consumidor Livre.</b>

Fonte: Elaboração própria com base em dados de Espírito Santo (2011a), Rio de Janeiro (2008), Minas Gerais (2013) e Agência Estadual de Regulação de Serviços Públicos de Mato Grosso do Sul (2013).

<sup>(1)</sup> ARSP: Agência de Regulação de Serviços Públicos do Espírito Santo; <sup>(2)</sup> Agenera: Agência Reguladora de Energia e Saneamento Básico do Rio de Janeiro; <sup>(3)</sup> Sede: Secretaria de Estado de Desenvolvimento Econômico; <sup>(4)</sup> Agepan: Agência Estadual de Regulação de Serviços Públicos de Mato Grosso do Sul.

Nesse contexto, também é conflituoso o fato de algumas agências estaduais não serem independentes, nem estarem, em alguns casos, configuradas como agências reguladoras estaduais, e sim como secretarias de governo. Nesse formato, não têm independência regulatória, por isso estão mais sujeitas a influências políticas. Quando existem agências, observa-se que algumas não têm foco no segmento específico, tal como a ARSP, criada como resultado da fusão da Arsi com a Aspe. Dessa forma, nota-se que acumulam funções diferentes (saneamento, infraestrutura viária, gás natural e energia elétrica), cada qual com sua complexidade, sujeitas a maior dificuldade de administração, articulação e enfoque dos objetivos da instituição, além de maior vulnerabilidade à captura. Tal situação é comumente

observada na prática em todo o Brasil e também afeta o segmento de distribuição de gás natural, gerando insegurança para investimentos no setor.

Embora esses temas estejam inseridos em resoluções e portarias recentes da ANP, o desenvolvimento do setor ainda está aquém do esperado. Paralelo a isso, o consumo de gás natural no Brasil está num patamar acima da produção. Tal fato resultou num aumento substancial da importação de gás natural pelo Brasil, principalmente do oriundo da Bolívia. Pode-se mencionar também a importação e exportação de gás natural liquefeito (GNL) pelo País com a finalidade de ampliar a flexibilidade e reduzir a vulnerabilidade do gás natural canalizado, oriundo de gasodutos da Bolívia e da Argentina (CAMPOS, 2016b). Nesse cenário, nota-se a importância do gás natural para suprir essa demanda, com destaque para o biometano.

### **5.2.2 Regulação do biogás e do biometano no Brasil**

Em janeiro de 2015, a ANP promulgou a Resolução ANP nº 8/2015, que estabelece especificações para o biometano de origem nacional, conforme Regulamento Técnico nº 1/2015 anexado ao mesmo documento, também aprovado como parte integrante dessa Resolução. Em seu artigo 3º, inciso II, o biometano foi definido como biocombustível gasoso, constituído basicamente de CH<sub>4</sub>, derivado da purificação do biogás (BRASIL, 2015). Dentre as disposições contidas nessa Resolução, destacam-se:

- determinação de regras de uso e de controle de qualidade do biometano;
- proibição da comercialização do biometano que não atenda às especificações providas no Regulamento Técnico;
- permissão para que o biometano seja misturado ao gás natural, desde que atenda às especificações contidas no referido Regulamento Técnico;

- exigência quanto ao teor mínimo de gás CH<sub>4</sub> contido no biometano (96,5% mol) para todas as regiões nacionais, exceto para a Região Norte (Urucu)<sup>64</sup>.

Essa Resolução exige que esses cuidados sejam também dispensados ao gás natural, atendendo os mesmos requisitos na compressão, distribuição e revenda. Assim, esse combustível pode ser comercializado com garantias de qualidade equivalentes às do gás natural, o que significa dizer que é possível injetar o biometano nas redes de gás, ou ofertá-lo em postos de abastecimento como GNV.

Com relação à injeção na rede de gás, ao contrário da rede elétrica que é bem desenvolvida no País, as redes de transporte de gás natural no Brasil concentram-se mais nas regiões costeiras e nos grandes centros urbanos, conforme já apresentado na Figura 26. Essa dificuldade de acesso limitou a entrada de gás natural nas regiões interioranas, possível somente por meio de transporte rodoviário, altamente custoso, de gás natural comprimido (GNC) ou de GNL.

A realidade observada na Figura 26 limita o uso dessa fonte de combustível no Brasil, pois a distribuição dos gasodutos não é acessível a grande parte do território nacional, principalmente ao interior do País. Por outro lado, segundo o Projeto Brasil-Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil (Probiogás) (2016), esse combustível também pode ser gerado de forma descentralizada, obtendo melhores usos<sup>65</sup>. Nesse cenário, o biometano apresenta-se como “[...] excelente oportunidade de interiorização do gás natural para estados onde a pecuária, a suinocultura e a avicultura estejam bem desenvolvidas, caso dos Estados da Região Sul” (AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS, 2013, p. 3). Entretanto, o biogás oriundo dessas atividades não constitui objeto de estudo desta pesquisa.

Enquanto ainda se observa dificuldade de acesso às redes de gás natural no Brasil, pode-se aproveitar o biometano para outros fins, como secagem e moagem de grãos, aquecimento de granjas, abastecimento de veículos leves e pesados para

---

<sup>64</sup> 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 (BRASIL, 2015).

<sup>65</sup> Segundo Germany Trade and Invest (2012), a Suécia também dispunha de uma baixa cobertura de gasodutos, mas conseguiu produzir uma elevada quantidade de biometano de forma descentralizada, gerando 1.473GWh no ano de 2011, metade da qual (50%) foi utilizada como combustível veicular, disponibilizado em 155 postos de abastecimento.



produção, bem como operações produtivas que não necessariamente precisam envolver a rede de gasodutos ou energia elétrica gerada nas grandes centrais, por meio de linhas convencionais. Pelo contrário, essas operações podem valer-se de energias e combustíveis gerados no local com os próprios resíduos orgânicos resultantes dessas atividades.

Relativo à questão regulatória, embora tenha representado um importante passo para o setor, a Resolução nº 8/2015, logo em seu artigo 1º, parágrafo único, restringiu o uso de biometano oriundo de RSU, liberando apenas o derivado dos resíduos orgânicos agrossilvopastoris e comerciais. De acordo com a Resolução nº 21/2016, permite-se somente a utilização do biometano de RSU em caráter experimental. Isso significa que o biometano de RSU é um combustível ainda não especificado pela ANP.

Obviamente, tal medida favoreceu ainda mais a aplicação do biometano oriundo de produtos e resíduos de atividades agrícolas, conforme mencionado, o que promoveu os setores do agronegócio e sucroenergético brasileiros e os demais negócios associados a essas cadeias de produção, deixando limitada a aplicação da fração orgânica de RSU para esse fim, restrita à utilização de resíduos orgânicos agrossilvopastoris como matéria-prima.

De acordo com a Nota Técnica ANP nº 157/2014, definiu-se dessa forma por que o biometano originado em aterros sanitários e esgotos é fonte que admite compostos voláteis denominados siloxanos em sua composição. Conforme explicado no Capítulo 4, siloxanos são contaminantes que podem causar incrustações nas tubulações e outros prejuízos. Essa Nota Técnica também destaca a inexistência de consenso sobre o teor máximo admissível para tais contaminantes no biometano.

No entanto, em maio de 2016, considerando a necessidade de estabelecer regras para os agentes envolvidos no uso de combustível experimental e suas misturas, o órgão regulador federal promulgou a Resolução ANP nº 21/2016, que, em seu artigo 1º, sujeita a autorização prévia o uso de combustíveis experimentais em todo o território nacional.

Embasado no artigo 4º da Resolução ANP nº 21/2016, o biometano oriundo de RSU pode ser utilizado na condição de se comprovar sua viabilidade técnica e ambiental, além de se monitorar a emissão de gases nocivos por meio de um projeto a ser

aprovado por órgão ambiental competente. Na sequência, no artigo 5º da Resolução, dispensa-se a autorização para o uso de biometano de RSU e de estação de tratamento de esgoto em equipamentos industriais. Assim dispõem esses artigos:

[...]

Art. 4º. A autorização de que trata o artigo 1º desta Resolução, para o biometano oriundo de resíduos sólidos urbanos, fica condicionada à comprovação de 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, de 2 de agosto de 2010.

Art. 5º. Fica dispensada a autorização de que trata o art. 1º para utilização de biometano oriundo de resíduos sólidos urbanos e de estação de tratamento de esgoto em Equipamentos de Uso Industrial, sem prejuízo do disposto nos artigos 3º e 4º desta Resolução (AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS, 2016).

O artigo 5º da Resolução esclarece que, embora ainda não liberado para injeção na rede de gás, o biometano de RSU não necessita de autorização da ANP nos casos de utilização em equipamento de uso industrial<sup>66</sup>, o que abre mais um leque para seu aproveitamento em face da restrição relativa aos RSU.

A Nota Técnica ANP nº 157/2014 também esclarece que, no caso de uso em equipamentos industriais, como na geração de energia elétrica, térmica ou outra, não há necessidade de “uso experimental” e “específico”, porque as partes envolvidas são capazes de avaliar os riscos inerentes ao processo, não havendo, portanto, assimetria de informação que justifique a intervenção regulatória, até mesmo por já existirem instalações operando sem que as partes envolvidas tenham solicitado a ação da ANP e sem prejuízo para os consumidores finais, que são objetos da ação da ANP. Assim, foi proposto o uso experimental e específico, veicular e residencial, “[...] por se tratar de uma aplicação mais sensível aos diferentes contaminantes presentes no biometano obtido dessas fontes e para proteger o consumidor final” (AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS, 2014, p. 9).

Em resumo, apesar de o biometano de RSU ainda estar restrito ao uso experimental, havendo esclarecimento das possibilidades técnicas de remoção dos contaminantes

---

<sup>66</sup> De acordo com o artigo 11 da Resolução ANP nº 8/2015 e do artigo 1º da Resolução ANP nº 21/2016, fica sujeito a autorização apenas se o consumo mensal for superior a 10.000 litros para combustíveis líquidos e a 10.000Nm<sup>3</sup> (a 20°C e 1atm) para combustíveis gasosos.

mencionados, além da constatação de parâmetros utilizados nas unidades que mensuram essas características no exterior, é possível que a ANP aprimore a regulação para esse produto (AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS, 2014, p. 9).

Enquanto isso, o uso do biometano agrossilvopastoril pode ser incentivado até o ponto em que essa prática já não seja mais tão incipiente no Brasil e, uma vez liberado o uso por meio da fonte de RSU, seja possível comercializar esse produto em grande escala. Soma-se a isso, a obtenção de ganhos de eficiência nos setores associados.

Nesse sentido, cabe reforçar que o biometano pode resultar em ganhos de escala se unido ao gás natural. No caso do Espírito Santo, por exemplo, para incentivar esse tipo de uso, o Decreto nº 3.453-R/2013 permite à Distribuidora a compra de biometano para ser misturado ao gás natural canalizado. Este assunto será tratado de forma mais aprofundada no item a seguir, uma vez que representa o objeto de estudo desta pesquisa.

### **5.2.3 Regulação do biogás e do biometano no Espírito Santo**

No estado do Espírito Santo, o Decreto nº 3.453-R/2013, artigo 3º, dispõe sobre a política de incentivo ao uso das energias renováveis, tais como a eólica, a solar e a biomassa. A legislação determina que a concessionária de distribuição de gás natural canalizado estabeleça mecanismos e ações, com vistas a viabilizar a aquisição do biometano produzido no Estado, mediante regulamentação da agência reguladora estadual, bem como manter o equilíbrio econômico e financeiro do contrato de concessão, com a obrigação de a entrega do gás pelos produtores estar em conformidade com as exigências técnicas da concessionária (ESPÍRITO SANTO, 2013).

Nota-se, logo no início do Decreto nº 3.453-R/2013, que o biogás e o biometano são considerados elementos de desenvolvimento regional e indutores de ações sustentáveis:

[...]

Considerando que **a produção e consumo de biogás produzido através de biomassa é uma opção energética sustentável**, renovável e de baixa emissão de carbono;

Considerando que **a produção de biogás a partir da biomassa efetiva um novo vetor de desenvolvimento regional**;

Considerando que **o aproveitamento de resíduos orgânicos** e esgotos domésticos, agrícolas, **aterros sanitários** e efluentes industriais diversos podem ser fontes de geração de energia, **como o biometano** (gás oriundo de biodigestão anaeróbica de resíduos orgânicos, tornado utilizável para queima por meio de processo de purificação), e seu uso diminui os impactos sobre as mudanças climáticas;

[...]

(ESPÍRITO SANTO, 2013, p. 1, grifo nosso).

No artigo 1º do referido Decreto, está disposto que os gases de aterros sanitários, determinados como biometano, são considerados como uma das fontes renováveis de energia que devem ser incentivadas no Estado:

Art. 1º. Fica criada a Política Estadual de incentivo às energias renováveis, tais como: eólica, solar, biomassa (madeiras, oleaginosas, algas marinhas, resíduos da agropecuária, esgotos domésticos e efluentes industriais, e **gases provenientes de aterros sanitários - biometano**), e outras fontes renováveis, visando incentivar a produção e o consumo desses energéticos no Estado do Espírito Santo (ESPÍRITO SANTO, 2013, p. 2, grifo nosso).

Na sequência dessa legislação, no § 1º, o biogás e o biometano também são mencionados na fundamentação. Fica evidente que o estado do Espírito Santo permite a inserção do biometano na rede local de distribuição de gás canalizado:

[...]

Art. 1º.

[...]

§ 1º. A Política Estadual de Energias Renováveis apoia-se nos seguintes fundamentos:

I - incentivar e ampliar a participação do biocombustível **biogás** e de outras energias renováveis na matriz energética estadual;

II - dispor de forma adequada os resíduos orgânicos, bem como formas de seu uso como energético, por meio do **aproveitamento econômico do biometano produzido em aterros sanitários**;

[...]

IV - **promover a inserção de biometano ao gás natural canalizado** utilizado na prestação do serviço público de distribuição deste energético no Estado do Espírito Santo (ESPÍRITO SANTO, 2013, p. 2, grifo nosso).

Em seguida, no § 2º, classifica o gás proveniente da biomassa como biometano apenas se atender às exigências da ANP:

[...]

§ 2º. O gás proveniente de biomassa será denominado Biometano, para os efeitos deste instrumento legal, quando sua composição atender às regulamentações da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - ANP, e outras que se fizerem necessárias (ESPÍRITO SANTO, 2013, p. 3).

No § 3º, permite a mistura do biometano ao gás natural:

[...]

§ 3º. O gás Biometano poderá ser misturado com o gás natural utilizado na concessão para prestação do serviço público de distribuição deste energético no Estado do Espírito Santo, atendidas as disposições do § 2º deste artigo, e regulamentações estabelecidas pela ASPE (ESPÍRITO SANTO, 2013, p. 3).

O artigo 2º do Decreto é de grande relevância, pois evidencia que o biogás gerado em aterros sanitários tem prioridade no Estado:

[...]

Art. 2º. **A Política Estadual de Energias Renováveis tem como um de seus objetivos prioritários fomentar a utilização do biogás gerado em aterros sanitários**, de resíduos oriundos da agropecuária e de outras fontes que tecnicamente venham a ser possíveis, como as resultantes de produção agrícola e efluentes de esgoto, inclusive os industriais (ESPÍRITO SANTO, 2013, p. 3, grifo nosso).

No artigo 4º, menciona-se que o biometano deve ter equivalência físico-química ao gás natural e reforça-se a exigência de obediência à regulamentação vigente da ANP:

[...]

Art. 4º. **O biometano** a que se refere o art. 3º desta Lei **deverá ter equivalência físico-química ao gás natural**, e a mistura de ambos na rede, para fins de atender as características técnicas de intercambiabilidade com o gás natural distribuído pela concessionária de distribuição de gás canalizado do Estado do Espírito Santo, **deve obedecer a regulamentação vigente da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - ANP**, e ter seu suprimento realizado através de pontos de entrega e medição, nas condições indicadas pela Concessionária (ESPÍRITO SANTO, 2013, p. 3, grifo nosso).

Por fim, no artigo 6º, o Decreto refere-se aos contratos de aquisição e preço do gás: “[...] Art. 6º. Os contratos de aquisição do Biometano serão previamente aprovados pela ASPE, permitindo que o custo de aquisição seja repassado ao preço de aquisição de gás natural canalizado” (ESPÍRITO SANTO, 2013, p. 3).

De uma forma geral, nota-se que esse Decreto tem um enfoque mais abrangente quanto ao planejamento energético capixaba. Em síntese, as fontes renováveis de energia precisam buscar uma integração, a fim de alcançarem complementação e promoverem a viabilização de usinas de energia na região.

## 6 METODOLOGIA

### 6.1 APRESENTAÇÃO GERAL

Os setores de RSU e de energia são áreas complexas no que tange aos aspectos socioeconômicos, técnicos e regulatórios. Por conseguinte, envolvem uma ampla variedade de assuntos passíveis de estudo por diferentes abordagens metodológicas. Entre as áreas mencionadas, buscou-se foco nos aspectos técnicos e regulatórios dessa questão, uma vez que são determinantes de qualquer ação direcionada ao aproveitamento de resíduos para geração de energia. Cabe esclarecer que, embora importante, a dimensão socioeconômica foi considerada uma limitação nesta pesquisa e requer que seja complementada em futuros estudos.

É necessário fazer uma importante ressalva relativa ao objeto de estudo, dada a flexibilidade de obtenção do biogás, discutida na revisão bibliográfica. Cabe esclarecer que o biogás, resultante de processos de degradação de matéria orgânica em ambientes anaeróbios, pode ser obtido em processos de digestão anaeróbia que ocorram tanto em biodigestores como em aterros sanitários. Logo, este estudo é restrito à geração de biogás a partir de aterros sanitários, que, embora demonstre similaridade com os processos ocorridos em biodigestores, apresenta diferenças importantes, como a presença de contaminantes nos RSU, conforme verificado na revisão de literatura. Assim, a Figura 29 descreve o recorte metodológico do objeto de estudo.

Com base na delimitação do objeto de estudo, esta pesquisa seguiu a metodologia sequencial de uma pesquisa convergente, de métodos mistos, que compreendeu duas fases distintas: a quantitativa e a qualitativa, conforme sugerido por Creswell e Clark (2013).

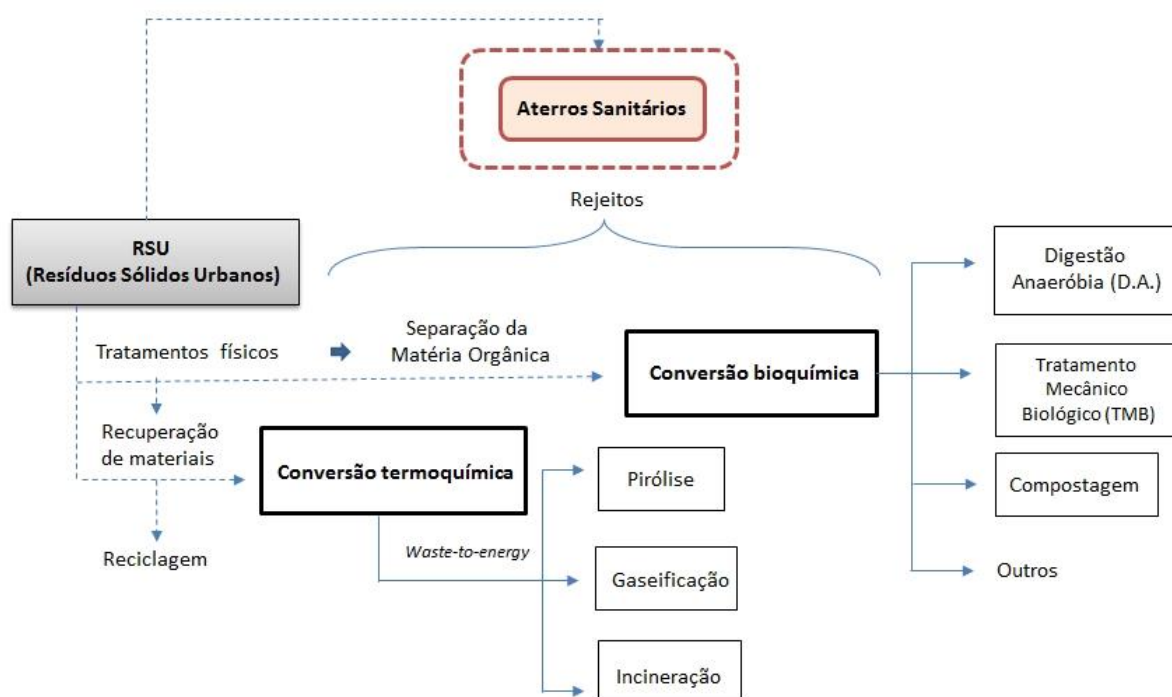
Na fase técnica, o trabalho foi desenvolvido no Lagesa/UFES, contando com sua equipe de engenheiros e graduandos em Engenharia Ambiental. Destaque-se que, para o desenvolvimento do projeto de pesquisa em questão, foram formados dois alunos de graduação, com seus Trabalhos de Conclusão de Curso (TCCs) sobre o tema “Previsão de geração de biogás proveniente de aterros sanitários no Espírito

Santo”. Para esse projeto, foi aplicado o modelo LandGEM, que será apropriadamente descrito a seguir.

Na fase regulatória, foram empregadas pesquisa documental (leitura e análise de leis, portarias, normas, resoluções e decretos da Aneel, da ANP, da EPE, da ARSP, entre outras), pesquisa bibliográfica (leitura de livros, artigos, teses, dissertações) bem como entrevistas aplicadas a representantes do setor energético, em âmbito nacional e estadual. Também foram aplicados questionários, utilizando-se a ferramenta *on-line Google Forms*, aos representantes das UTEs de RSU em operação no Brasil. A estratégia metodológica para esta fase da pesquisa será detalhada a seguir.

Todo o aparato regulatório analisado serviu de base para indicar a viabilidade regulatória voltada à inserção do biogás de RSU no mercado energético regional do Espírito Santo.

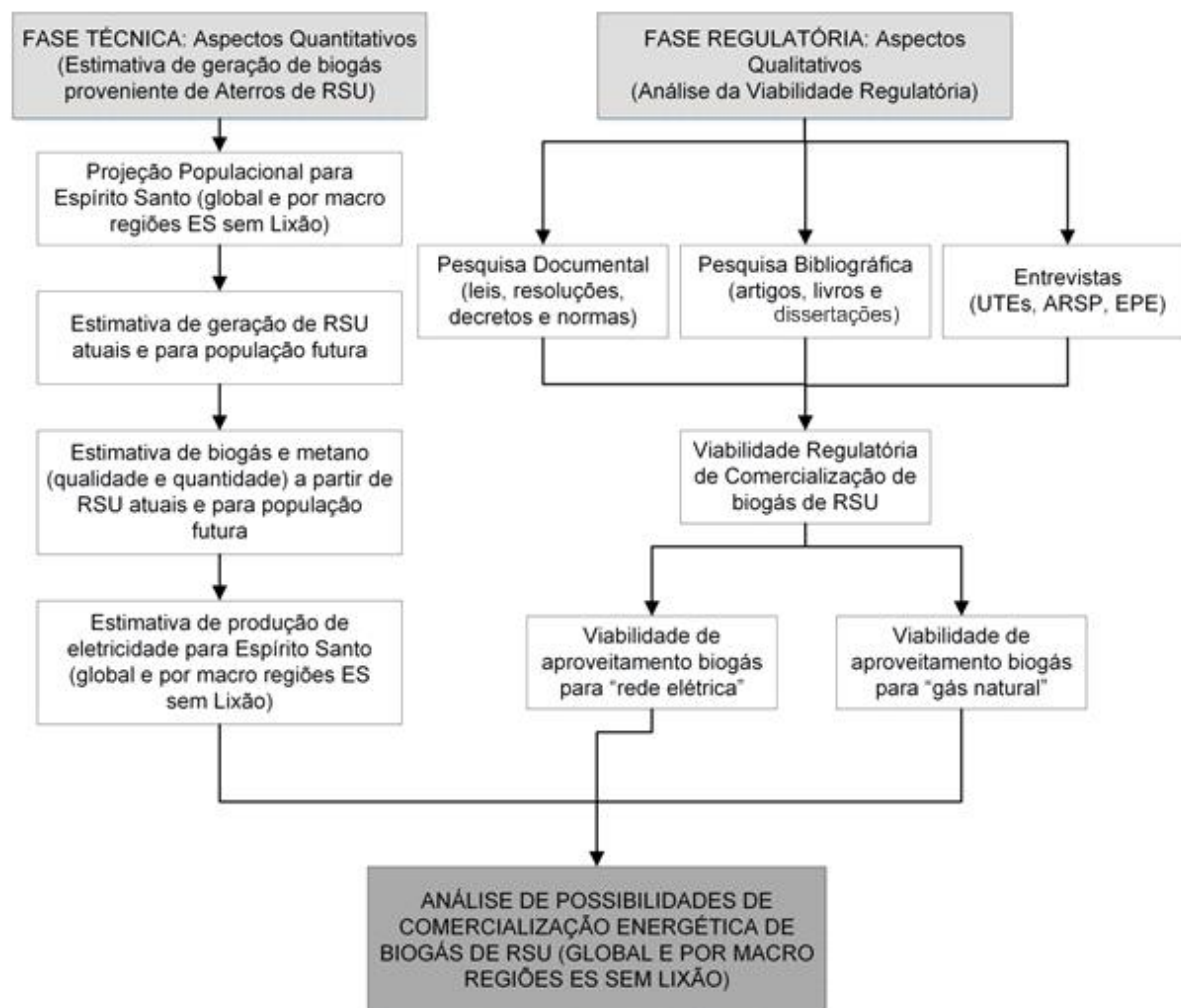
Figura 29 – Recorte metodológico do objeto de estudo



Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 30, são apontadas as fases propostas para o estudo bem como as principais atividades envolvidas.

Figura 30 – Fluxograma esquemático das fases e atividades propostas para a dissertação



Fonte: Elaboração própria.

Notas: RSU (Resíduos Sólidos Urbanos); UTEs (Usinas Termelétricas); ARSP (Agência de Regulação de Serviços Públicos do Espírito Santo); EPE (Empresa de Pesquisa Energética).

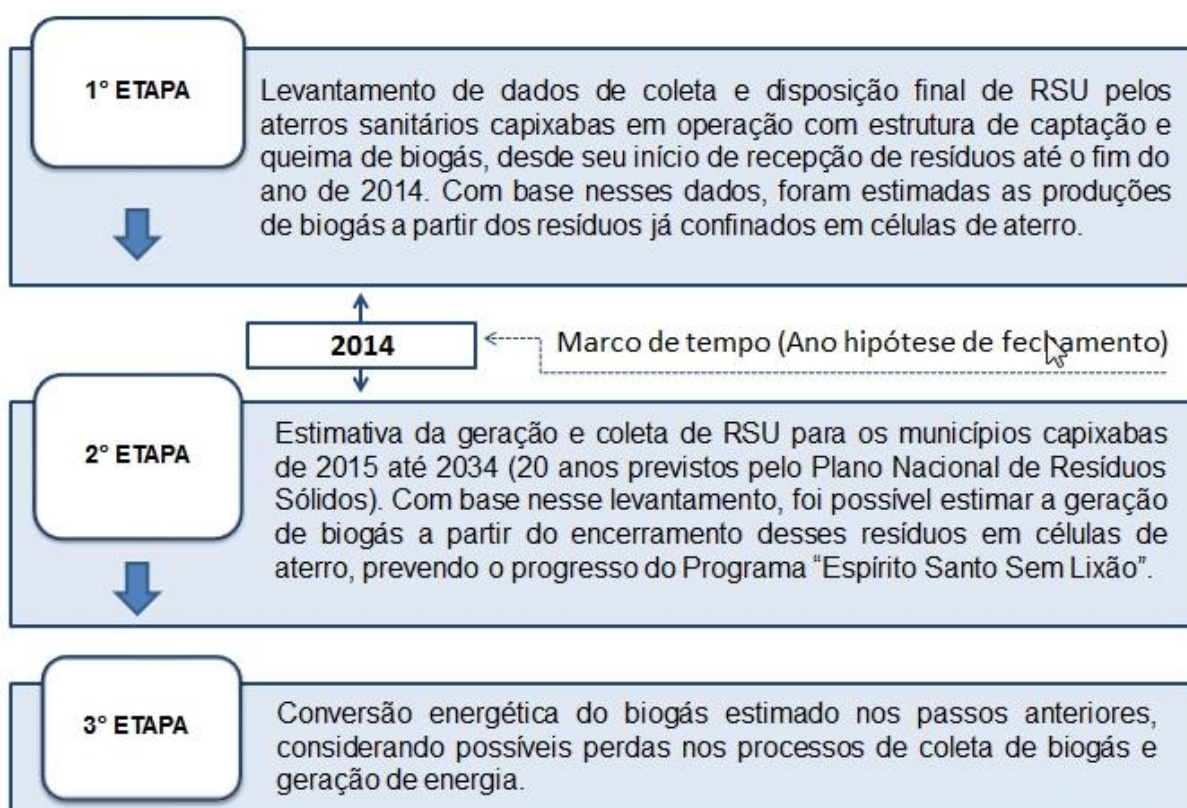
## 6.2 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO DA FASE TÉCNICA

A metodologia empregada na parte técnica deste trabalho tratou especificamente da estimativa do potencial energético procedente do biogás gerado a partir da destinação final ambientalmente adequada dos RSU dispostos em aterros sanitários no Espírito Santo. Para atingir esse objetivo, fez-se necessária a divisão desta fase em três etapas seguintes, conforme apresentado na Figura 31. Inicialmente,



consideraram-se apenas os principais aterros sanitários capixabas em operação, com estrutura de captação e queima de biogás, até o ano de 2014. São eles: Brasil Ambiental (Aracruz/ES), CTRVV (Vila Velha/ES) e Marca Ambiental (Cariacica/ES). Para as etapas seguintes, a expectativa de geração de biogás/energia considerou o cenário em que os municípios, em totalidade, eram atendidos por mais aterros sanitários licenciados no âmbito do programa capixaba de erradicação dos lixões, denominado *Espírito Santo sem Lixão*. Em síntese, o presente trabalho traçou uma estimativa de geração de biogás e energia elétrica a partir de três etapas principais, descritas sucintamente a seguir.

Figura 31 – Descrição das etapas iniciais da parte técnica



Fonte: Elaboração própria.

É necessário informar que o ano de 2014 foi indicado como marco temporal entre a primeira e a segunda etapa. Ressalte-se que, até esse momento, consideraram-se somente os aterros sanitários existentes com estrutura de coleta e queima de biogás no Estado, conforme mencionado. Tal fato justifica a inserção de apenas três aterros nesse período (Marca Ambiental, CTRVV e Brasil Ambiental), com exclusão



Quadro 15 – Municípios integrantes da divisão regional do Programa Espírito Santo sem Lixão

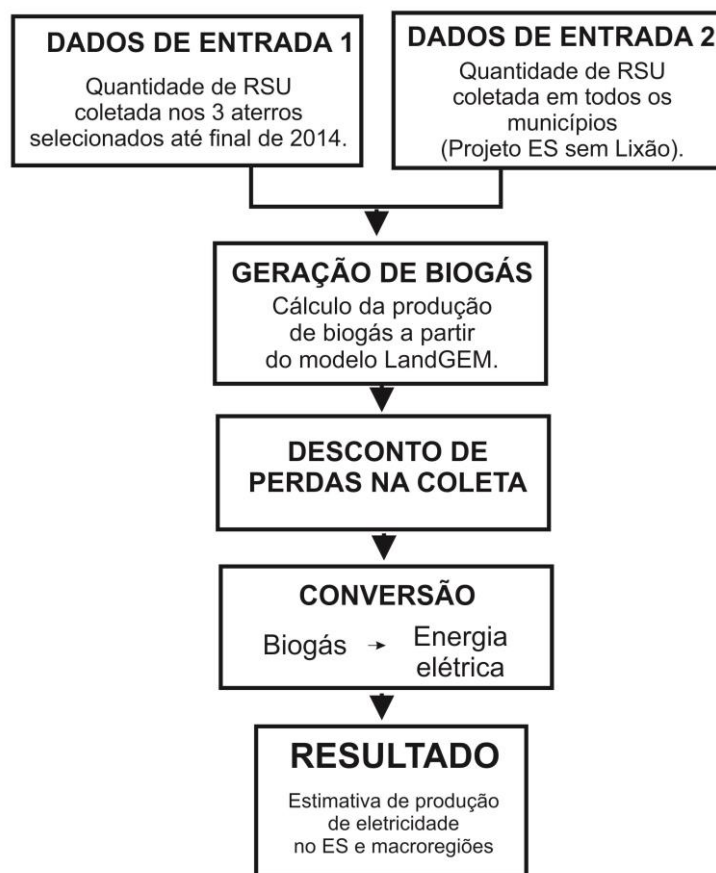
REGIÕES		MUNICÍPIOS
1	REGIÃO NORTE (Conorte)	Ecoporanga, Mucurici, Montanha, Ponto Belo, Pedro Canário, Pinheiros, Água Doce do Norte, Boa Esperança, Conceição da Barra, Vila Pavão, Barra de São Francisco, Nova Venécia, São Mateus e Jaguaré.
2	REGIÃO DOCE OESTE (Condoeste)	Mantenópolis, Águia Branca, São Gabriel da Palha, Vila Valério, Alto Rio Novo, Pancas, São Domingos do Norte, Governador Lindenberg, Colatina, Marilândia, Baixo Guandu, Itaguaçu, São Roque do Canaã, Laranja da Terra, Itarana e Afonso Cláudio.
3	REGIÃO DOCE LESTE	Aracruz, Fundão, Ibiracu, João Neiva, Linhares, Rio Bananal, Santa Teresa e Sooretama.
4	REGIÃO METROPOLITANA	Cariacica, Domingos Martins, Marechal Floriano, Santa Leopoldina, Santa Maria de Jetibá, Serra, Viana, Vila Velha e Vitória.
5	REGIÃO LITORAL SUL (Conlisul)	Vargem Alta, Alfredo Chaves, Guarapari, Anchieta, Iconha, Rio Novo do Sul, Piúma, Itapemirim, Marataízes, Presidente Kennedy, Mimoso do Sul, Muqui, São José do Calçado, Bom Jesus do Norte e Apiacá.
6	REGIÃO SUL SERRANA (Consul)	Brejetuba, Ibatiba, Irupi, Iúna, Conceição do Castelo, Venda Nova do Imigrante, Muniz Freire, Ibitirama, Divino de São Lourenço, Castelo, Dorés do Rio Preto, Guaçuí, Alegre, Jerônimo Monteiro, Cachoeiro de Itapemirim e Atílio Vivacqua.

Fonte: Elaborado com base em informações do Instituto Estadual de Meio Ambiente (Acesso em 20 abr. 2016).

A partir da divisão regional apresentada tanto na Figura 32 como no Quadro 15, foi possível avaliar o potencial energético na totalidade dos municípios capixabas.

Por sua vez, a Figura 33 apresenta o fluxograma que reúne os dados de entrada do modelo matemático, denominados Dados de Entrada 1 e 2, originados respectivamente nas Etapas 1 e 2, utilizados para a geração dos resultados.

Figura 33 – Metodologia da pesquisa quantitativa



Fonte: Elaboração própria.

## 6.2.1 Dados de entrada do modelo matemático

### 6.2.1.1 Dados de Entrada 1

Os Dados de Entrada 1 são relativos à massa de resíduos recebida por três aterros sanitários: CTRVV, Brasil Ambiental e Marca Ambiental. Os dados referentes aos dois primeiros aterros foram coletados em obras literárias que tratam do assunto, mais especificamente a partir do trabalho de Gervázio e outros (2010). Os dados relativos ao terceiro aterro foram disponibilizados por Coelho (2015) em um documento denominado Relatório de Avaliação, desenvolvido por uma empresa de consultoria contratada pela Marca Ambiental (SCS ENERGY, 2013). Entretanto, embora o aterro sanitário dessa Empresa tenha entrado em funcionamento em 1995,

os dados disponíveis consideravam apenas registros de resíduos a partir do ano 2004. Na Tabela 18, apresentam-se os valores de deposição de resíduos em células dos aterros sanitários.

Tabela 18 – RSU dispostos nos aterros sanitários existentes no Espírito Santo até 2014 em Mg/ano.

Ano	Brasil Ambiental (Aracruz) <sup>1</sup>	Marca Ambiental (Cariacica) <sup>2</sup>	CTRVV (Vila Velha) <sup>1</sup>	TOTAL (até 2014)
2001	21.500	-	-	<b>21.500</b>
2002	22.300	-	12.750	<b>35.050</b>
2003	22.950	-	128.522	<b>151.472</b>
2004	30.800	247.204	128.729	<b>406.733</b>
2005	58.000	302.564	180.000	<b>540.564</b>
2006	73.740	305.885	180.000	<b>559.625</b>
2007	93.600	331.165	180.000	<b>604.765</b>
2008	99.840	409.862	180.000	<b>689.702</b>
2009	109.200	416.192	180.000	<b>705.392</b>
2010	112.476	495.242	180.000	<b>787.718</b>
2011	115.850	508.873	180.000	<b>804.723</b>
2012	119.325	533.401	180.000	<b>832.726</b>
2013	122.906	569.794	180.000	<b>872.700</b>
2014	126.593	578.340	180.000	<b>884.933</b>
<b>TOTAL</b>				<b>7.897.603</b>

Fonte: Oliveira e Cardoso (2017).

<sup>(1)</sup> Gervázio e outros (2010)

<sup>(2)</sup> SCS Energy (2013).

Os dados de coleta dos aterros foram inseridos em planilha do LandGEM a fim de se obterem, como resultado, estimativas de geração de CH<sub>4</sub> para cada aterro, considerando-se o ano de abertura, parâmetros k e L<sub>0</sub>, e, hipoteticamente, o ano de encerramento (2014). Os resultados obtidos na Etapa 1 referem-se à geração anual de biogás. Tais resultados são, então, somados aos da etapa seguinte, para compor a contribuição anual dos aterros em operação no Estado a partir de 2015, totalizando a geração estadual anual de biogás e CH<sub>4</sub> a partir de RSU.

A Etapa 2 é detalhada a seguir.

### 6.2.1.2 Estimativa de coleta municipal de RSU a partir de 2015

Os dados municipais de produção *per capita* de resíduos, cobertura de coleta e recuperação de recicláveis, que correspondem aos Dados de Entrada 2, foram obtidos com base no Diagnóstico de Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) do Ministério das Cidades (BRASIL, 2014b). A população prevista para o período de 2015 a 2034 foi calculada com base nos censos do IBGE referentes aos anos de 2000 e 2010, conforme metodologia de Garcia (2016).

#### 6.2.1.2.1 *Projeção populacional*

Garcia (2016) realizou testes de projeção populacional para os habitantes dos municípios capixabas por meio das metodologias de projeção aritmética, projeção geométrica, regressão multiplicativa, taxa decrescente de crescimento e crescimento logístico. Entre estas, a metodologia que se mostrou mais indicada para este trabalho foi a projeção aritmética por apresentar melhor desempenho diante dos números projetados pelo IBGE para a população do Estado.

Na projeção populacional calculada, o número de habitantes da população estadual, obtido por meio da soma das populações municipais estimadas pelo método da projeção aritmética, apresentou erro máximo de 5,24%, quando comparado ano a ano com o da projeção disponibilizada pelo IBGE para o período de 2015 a 2030, conforme apresentado na Tabela 19. Esse erro decresce com o incremento dos anos e é inferior a 3% em 2030, ano máximo de projeção disponibilizado pelo IBGE (2010).

Tabela 19 – Projeção populacional do Espírito Santo calculada com progressão aritmética

REGIÕES ES s/ LIXÃO	POPULAÇÃO (IBGE)		PROJEÇÃO POPULACIONAL															
	2000	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030 <sup>1</sup>
REGIÃO NORTE (Conorte)	348.551	384.861	403.019	406.648	410.278	413.909	417.541	421.171	424.804	428.433	432.067	435.694	439.329	442.958	446.588	450.219	453.851	457.481
REGIÃO DOCE OESTE (Condoeste)	327.111	346.736	356.553	358.512	360.473	362.435	364.400	366.361	368.323	370.287	372.250	374.210	376.178	378.137	380.098	382.060	384.025	385.986
REGIÃO LITORAL SUL (Conlisul)	311.777	347.380	365.185	368.741	372.291	375.864	379.421	382.983	386.545	390.102	393.665	397.225	400.788	404.344	407.904	411.467	415.024	418.586
REGIÃO SUL SERRANA (Consul)	417.700	447.711	462.720	465.718	468.718	471.719	474.720	477.722	480.724	483.725	486.726	489.726	492.731	495.729	498.729	501.730	504.731	507.733
REGIÃO DOCE LESTE	270.922	330.346	360.060	366.001	371.944	377.885	383.828	389.770	395.714	401.655	407.598	413.539	419.484	425.425	431.368	437.309	443.252	449.194
REGIÃO METROPOLITANA	1.421.171	1.657.918	1.776.294	1.799.966	1.823.641	1.847.316	1.870.990	1.894.665	1.918.340	1.942.014	1.965.689	1.989.364	2.013.041	2.036.713	2.060.388	2.084.063	2.107.737	2.131.412
	Total ES Projetado:		3.723.812	3.765.584	3.807.356	3.849.128	3.890.900	3.932.672	3.974.444	4.016.216	4.057.988	4.099.760	4.141.532	4.183.304	4.225.076	4.266.848	4.308.620	4.350.392
	Total ES IBGE:		3.929.911	3.973.697	4.016.356	4.058.079	4.098.852	4.138.657	4.177.644	4.215.796	4.252.873	4.288.849	4.323.701	4.357.586	4.390.464	4.422.131	4.452.546	4.481.671
	Margem de Erro:		5,24%	5,24%	5,20%	5,15%	5,07%	4,98%	4,86%	4,73%	4,58%	4,41%	4,21%	4,00%	3,77%	3,51%	3,23%	2,93%

Fonte: Elaboração própria com base em informações de Oliveira e Cardoso (2017).

<sup>(1)</sup> Ano máximo disponibilizado pelo IBGE.

Ainda com base na Tabela 19, devido ao pequeno erro relativo, optou-se por estender a projeção até o ano de 2034, admitindo-se que tal diferença populacional é pouco expressiva em termos de produção de biogás, diante dos altos percentuais de perdas que ocorrem durante a coleta do gás e sua conversão em energia elétrica.

Os municípios foram agrupados conforme a proposta de destinação de RSU do Programa *Espírito Santo sem Lixão*, apresentada na Figura 31. Os dados de coleta de resíduos referentes a cada aterro foram inseridos no *software* de modelagem, originando estimativas anuais de geração de biogás e CH<sub>4</sub> individuais por aterro, as quais, em seguida, foram somadas às da geração calculada na Etapa 1, a fim de integrar o total estadual anual.

Os valores estimados de geração anual de resíduos baseados na população projetada, na geração *per capita* de resíduos e no agrupamento de municípios previstos pelo *Espírito Santo sem Lixão* estão dispostos na Tabela 20. Para tais estimativas considerou-se, além de uma projeção aritmética populacional, que a geração *per capita* de resíduos se manteria constante ao longo dos vinte anos da projeção.

Tabela 20 – Estimativa de geração anual de resíduos em Mg/ano a serem coletados pelos aterros previstos no *Espírito Santo sem Lixão*

(Continua)

Ano	Região 1 CONORTE	Região 2 CONDOESTE	Região 3 DOCE LESTE	Região 4 RM	Região 5 CONLISUL	Região 6 CONSUL	TOTAL
2015	99357,853	83347,244	84504,476	558694,449	77773,744	91747,917	<b>995425,6824</b>
2016	100222,954	83807,051	85913,076	565843,657	78567,883	92319,528	<b>1006674,149</b>
2017	101088,055	84266,859	87321,677	572992,864	79362,021	92891,139	<b>1017922,615</b>
2018	101953,156	84726,667	88730,277	580142,071	80156,159	93462,751	<b>1029171,082</b>
2019	102818,257	85186,475	90138,878	587291,279	80950,297	94034,362	<b>1040419,548</b>
2020	103683,359	85646,283	91547,478	594440,486	81744,436	94605,973	<b>1051668,015</b>
2021	104548,460	86106,090	92956,079	601589,694	82538,574	95177,585	<b>1062916,481</b>
2022	105413,561	86565,898	94364,679	608738,901	83332,712	95749,196	<b>1074164,947</b>
2023	106278,662	87025,706	95773,280	615888,109	84126,850	96320,807	<b>1085413,414</b>
2024	107143,763	87485,514	97181,880	623037,316	84920,989	96892,418	<b>1096661,88</b>
2025	108008,865	87945,322	98590,481	630186,523	85715,127	97464,030	<b>1107910,347</b>
2026	108873,966	88405,129	99999,081	637335,731	86509,265	98035,641	<b>1119158,813</b>
2027	109739,067	88864,937	101407,682	644484,938	87303,403	98607,252	<b>1130407,28</b>
2028	110604,168	89324,745	102816,282	651634,146	88097,542	99178,864	<b>1141655,746</b>
2029	111469,269	89784,553	104224,883	658783,353	88891,680	99750,475	<b>1152904,212</b>



Tabela 20 – Estimativa de geração anual de resíduos em Mg/ano a serem coletados pelos aterros previstos no *Espírito Santo sem Lixão*

Ano	(Conclusão)						TOTAL
	Região 1 CONORTE	Região 2 CONDOESTE	Região 3 DOCE LESTE	Região 4 RM	Região 5 CONLISUL	Região 6 CONSUL	
2030	112334,371	90244,361	105633,483	665932,6	89685,818	100322,086	<b>1164152,68</b>
2031	113199,472	90244,361	107042,083	673081,8	90479,956	100893,697	<b>1.174.941,34</b>
2032	114064,573	91163,976	108450,684	680231	91274,094	101465,309	<b>1.186.649,61</b>
2033	114929,674	91623,784	109859,284	687380,2	92068,233	102036,92	<b>1.197.898,08</b>
2034	115794,775	92083,592	111267,885	694529,4	92862,371	102608,531	<b>1.209.146,55</b>
TOTAL	2.151.526,281	1.753.848,545	1.957.723,607	12.532.238,394	1.706.361,154	1.943.564,481	<b>22.045.262,462</b>

Fonte: Gervázio e outros (2010) e SCS Energy (2013), citados por Oliveira e Cardoso (2017).

### 6.2.2 Geração teórica de biogás

Tendo em vista que os aterros previstos ainda estão em fase de construção ou projeto, o que permite a definição prévia das características futuras de degradação dos resíduos nesses aterros, optou-se por adotar uma diferenciação no cálculo em relação ao da Etapa 1, considerando-se três valores diferentes de  $k$  e  $L_0$  para cada aterro. Cada par ( $k$ ,  $L_0$ ) constituiu um cenário diferente para os Dados de Entrada 2, visando à análise de algumas possibilidades de geração de biogás e aproveitamento energético.

Os dados de geração estimada anual de RSU foram inseridos na planilha de cálculo do *software* LandGEM, versão 3.02. Esses dados geram a produção de biogás e  $CH_4$  para cada ano, considerando as massas anuais de resíduos recebidos pelos aterros desde o início da aceitação desses resíduos até o ano considerado para seu fechamento.

Conforme mencionado, o LandGEM leva em conta a geração do biogás a começar do ano seguinte ao de deposição da massa de resíduos. A partir de então, considera sempre decrescente a geração por aquela massa, ano a ano. No entanto, havendo nova deposição de resíduos no ano seguinte, o gás gerado por essa nova massa soma-se ao gerado naquele ano pela anterior, de forma que o volume total de biogás é sempre crescente, até que haja o encerramento das deposições. Por esse

motivo, a geração de biogás tem seu pico no ano seguinte ao do fechamento do aterro ou célula, passando a decrescer em seguida.

Para os três aterros sanitários atuais, considerou-se o ano de 2014 como de encerramento hipotético, embora, na realidade, eles continuem em funcionamento. Essa opção foi escolhida apenas para que se pudesse realizar a modelagem, considerando-se a coleta e destinação final por todos os municípios do Estado a partir de 2015. Os parâmetros  $k$  e  $L_0$  utilizados foram 0,17 e 79,18 para a Brasil Ambiental (Aracruz), 0,1 e 164 para a Marca Ambiental (Cariacica) e 0,1 e 140 para a CTRVV (Vila Velha), conforme descrito por Gervázio e outros (2010).

Já para os novos aterros previstos no Programa *Espírito Santo sem Lixão* (Etapa 2), foram estabelecidos três cenários comparativos, adotando-se valores diferentes de  $k$  e  $L_0$  para cada um, conforme apresentado na Tabela 21.

No Cenário 1, foram utilizados valores de  $k$  e  $L_0$  sugeridos pela United States Environmental Protection Agency (2005) para aterros sanitários convencionais, nos casos em que não existiam informações de campo suficientes. No Cenário 2, foram considerados os valores de  $k$  e  $L_0$  descritos por Kumar e Sharma (2014) para aterros em Bophal, Índia, devido à baixa estimativa de geração calculada para o local. Por último, no Cenário 3, estabeleceu-se para  $k$  e  $L_0$  a média ponderada entre os valores descritos na revisão bibliográfica, considerando-se a proximidade das características e dos valores de precipitação daqueles locais com a dos aterros do Espírito Santo. Na Tabela 21, resume-se a adoção de tais valores.

Tabela 21 – Valores de  $k$  e  $L_0$  utilizados no LandGEM para a estimativa de geração estadual de biogás e metano.

CENÁRIOS	Parâmetro	Fonte
Cenário 1	$k = 0,05$ $L_0 = 170$	Usepa (2005)
Cenário 2	$k = 0,05$ $L_0 = 48,46$	Kumar e Sharma (2014)
Cenário 3	$k = 0,0778$ $L_0 = 81,0447$	Média das Referências

Fonte: Oliveira e Cardoso (2017).

Cabe informar que os valores adotados do Cenário 3 tendem a originar resultados mais conservadores para a geração de biogás, se comparados aos valores já adotados para os aterros existentes sem recirculação de chorume. Ao se prever a geração de energia com base no Cenário 3, espera-se uma subestimativa dessa geração, o que pode ser mais interessante em termos de estudo de viabilidade, pois, uma vez verificada a viabilidade para um valor subestimado, é coerente pensar que os valores reais podem gerar uma situação economicamente positiva. Sendo assim, o Cenário 3 foi selecionado para apresentar os resultados obtidos neste trabalho.

### 6.2.3 Conversão de biogás em energia elétrica

Conforme já mencionado, parte do biogás coletado nas células de deposição de resíduos se perde para a atmosfera a partir da superfície do aterro ou no próprio sistema de drenos e no processo de conversão energética. O percentual restante situa-se em torno de 75%, valor sugerido pela *United States Environmental Protection Agency* (2015) e adotado nos cálculos de conversão energética deste trabalho.

Uma vez coletado o biogás, apenas a parte indicativa do CH<sub>4</sub> é considerada para o objetivo de geração de energia elétrica. Na literatura, alguns valores foram encontrados para o poder calorífico do CH<sub>4</sub>, com poucas variações quando considerado o mesmo percentual de CH<sub>4</sub> no biogás, conforme observado na Tabela 22.

Tabela 22 – Valores de poder calorífico de metano

Parâmetro	Valor	Fonte
Poder calorífico inferior do CH <sub>4</sub>	5.800kcal/m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> com 40 a 55% de [CH <sub>4</sub> ] no biogás	(MUYLAERT, 2000. apud ABREU, 2009)
Poder calorífico inferior do CH <sub>4</sub>	5.500kcal/m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> com 50% de [CH <sub>4</sub> ] no biogás	(FELCA et al., 2015)

Fonte: Oliveira e Cardoso (2017).

Nota: Dados adaptados pela autora.

O rendimento do grupo motogerador, utilizado por Valente (2015), sugere valores de rendimento elétrico e custo associados à potência instalada, conforme descritos na Tabela 23. Nesse caso, considerou-se apenas o rendimento elétrico e o custo como sistema completo motogerador.

Tabela 23 – Valores de eficiências (%) e custo (R\$/kW) dos motores, conforme sua potência.

Potência do motor	< = 30kW	34 - 50kW	51 - 100kW	101 - 250kW	251 - 400kW	401 - 800kW	801 - 1.200kW
Rendimento elétrico	28%	32%	36%	38%	40%	42%	42%
Custo (R\$/kW)	10.000	9.000	7.300	5.400	4.400	3.200	2.600

Fonte: Valente (2015) e Oliveira e Cardoso (2017).

Logo, para este trabalho, adotou-se um percentual de CH<sub>4</sub> de 55% em volume no biogás bem como um poder calorífico inferior de 5.800kcal/m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>, ou 6,740889kWh/m<sup>3</sup>. Tendo em vista o custo e os valores de potência instalada provável para cada aterro, verificados nos resultados, considerou-se um rendimento elétrico do grupo motogerador de 42%.

As equações utilizadas para obtenção da eletricidade gerada e consumida com base na capacidade instalada da planta de geração de energia elétrica e na disponibilidade de operação da planta, adaptadas de Valente (2015), são descritas a seguir:

- Energia disponível no metano produzido diariamente (Equação 6)

$$E_{metano} = V_{metano} \times PCI_{metano} \quad (6)$$

Onde:

$E_{metano}$  = Energia contida no metano (kWh/dia)

$V_{metano}$  = Volume diário de metano gerado no aterro sanitário (Nm<sup>3</sup>/dia)

$PCI_{metano}$  = Poder calorífico inferior do metano (kWh/m<sup>3</sup>) – com 55% de CH<sub>4</sub> no biogás.

- Geração diária de energia elétrica (Equação 7)

$$E_{elétrica} = E_{metano} \times \eta_{motor} \quad (7)$$

Onde:

$E_{elétrica}$  = Eletricidade gerada por dia (kWh/dia)

$\eta_{motor}$  = Eficiência elétrica do motogerador

- Potência instalada (Equação 8)

$$P = E_{elétrica} / H \quad (8)$$

Onde:

$P$  = Eletricidade gerada por dia (kWh/dia)

$H$  = Regime de geração (h)

Os valores obtidos da geração estimada de energia elétrica foram utilizados para a simulação do número de residências atendidas, considerando-se, para as brasileiras, o valor de consumo residencial médio apontado pela Empresa de Pesquisa Energética (2014c) como de 150kWh/mês. Na Tabela 24, apresentam-se os valores adotados nos cálculos.

Tabela 24 – Resumo dos parâmetros adotados para o cálculo de geração de energia elétrica.

Parâmetro	Valor	Unidade
Poder calorífico inferior do CH <sub>4</sub>	5800	kWh/m <sup>3</sup>
Poder calorífico inferior do CH <sub>4</sub>	6,74	kWh/m <sup>3</sup>
Eficiência de coleta do sistema	75	%
Rendimento elétrico do motogerador	42	%
Tempo de operação dos motores	95	%

Fonte: Adaptado de Oliveira e Cardoso (2017).

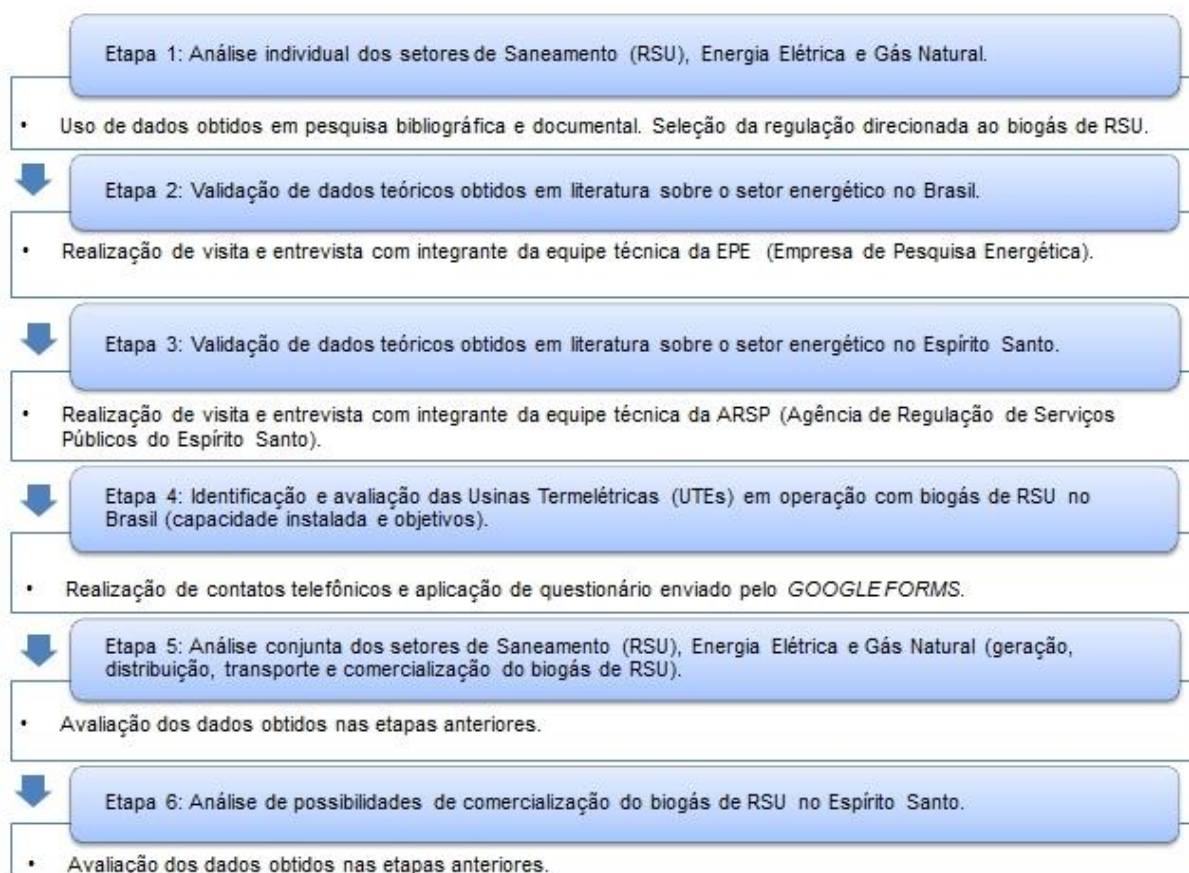
### 6.3 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO DA FASE REGULATÓRIA

O método qualitativo foi empregado na análise documental e bibliográfica da regulação que envolve os setores de resíduos, gás natural e energia elétrica no Brasil e no Espírito Santo. Para isso, utilizou-se pesquisa documental, envolvendo

leis, portarias, normas, resoluções e manuais da EPE, da Aneel, da ANP, entre outras, além de pesquisa bibliográfica em livros, artigos, teses e dissertações na área. Os artigos foram publicados em periódicos nacionais e internacionais conceituados, classificados segundo critérios do sistema *Qualis*. Procedeu-se, em seguida, à realização de entrevistas diretas com representantes do setor energético e de RSU, em âmbito federal e regional, da EPE e da ARSP respectivamente, com o intuito de validar as informações teóricas levantadas na literatura. Aliado a esse procedimento, também foram aplicados questionários aos representantes das quinze UTEs de RSU em operação no Brasil, por meio da ferramenta *on-line* denominada *Google Forms*. Tais procedimentos foram empregados com a finalidade de ampliar o conhecimento relacionado ao objeto de estudo, complementar os dados teóricos levantados e averiguar as mudanças ocorridas nos setores estudados.

Na Figura 34, estão descritas as etapas de trabalho desta pesquisa e as principais metodologias empregadas.

Figura 34 – Sequência de execução metodológica da fase regulatória



Fonte: Elaboração própria.

A abordagem qualitativa, desenvolvida conforme sequência apresentada na Figura 34, consistiu na realização de um levantamento dos aspectos regulatórios que delimitaram a parte teórica da fase regulatória. Assim, seguindo Okoli e Schabram (2010), algumas das técnicas empregadas em revisões sistemáticas de literatura foram adotadas nesta fase com o objetivo de apropriação inicial dos dados utilizados nesta pesquisa. Justifica-se o uso de tais técnicas para garantir a captura de estudos recentes e relevantes relacionados ao tema pesquisado. Desse modo, o material referente a pesquisa documental, pesquisa bibliográfica e entrevistas foi selecionado para compor a análise regulatória do aproveitamento energético do biogás de RSU.

Inicialmente, na Etapa 1, a análise dos setores de saneamento, elétrico e de gás natural foi realizada separadamente, embasada no estudo do contexto histórico relativo às mudanças ocorridas nesses segmentos. Em seguida, identificou-se o arcabouço legal direcionado à produção e comercialização do biogás de RSU em cada setor.

No setor de saneamento, buscou-se verificar, em âmbito federal e estadual, a regulação dos RSU que abordasse os aspectos relativos a gestão e tratamento desses resíduos, com foco no aproveitamento energético.

No setor de energia elétrica, pretendeu-se analisar aspectos relacionados à regulação econômica, com incidência de tributação, tarifas, incentivos, especificidades técnicas e escalas, para abastecimento e comercialização de eletricidade proveniente do biogás de RSU.

No setor de gás natural, semelhante ao de energia elétrica, também se buscou verificar tarifações, especificações técnicas e escalas para suprimento e comercialização de gás natural, além de aspectos associados a distribuição, transporte e limitações quanto ao uso do biogás de aterro.

Na sequência, especificamente nas Etapas 2 e 3, a realização de entrevistas informais e não estruturadas (GIL, 2002) com representantes do setor energético, em âmbito federal e estadual, serviu para complementar o estudo teórico já realizado em etapa anterior. Em seguida, a aplicação dos questionários a representantes das UTEs, realizada na Etapa 4, foi importante por permitir a comparação entre os aspectos teóricos e práticos verificados, além da constatação da capacidade

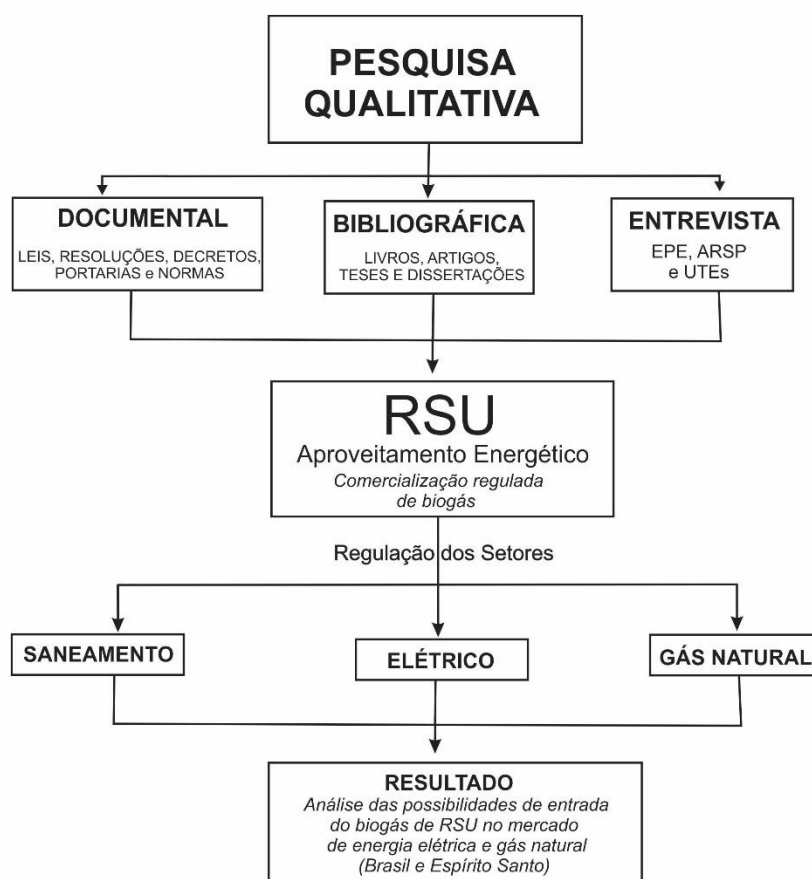
instalada e dos objetivos da produção de biogás por essas usinas. A descrição detalhada desses procedimentos encontra-se no item 6.3.1.

Na Etapa 5, foi possível, então, realizar uma análise conjunta dos setores estudados, considerando aspectos relativos a geração, transporte, distribuição e comercialização do gás para uso elétrico e como gás natural.

Por fim, na Etapa 6, foi possível direcionar a análise para o estado do Espírito Santo, o que permitiu que se apontassem as possibilidades de comercialização energética do biogás de RSU nessa região. Cabe ressaltar que os dados obtidos na fase quantitativa foram utilizados nesta última etapa para embasar a análise regulatória a fim de indicar o aproveitamento desse energético nas escalas encontradas para o Espírito Santo.

Na Figura 35, expõe-se o fluxograma metodológico da pesquisa qualitativa correspondente à parte regulatória.

Figura 35 – Metodologia da pesquisa qualitativa



Fonte: Elaboração própria.



### 6.3.1 Questionários e entrevistas

A coleta de dados referente às UTEs foi realizada utilizando-se a ferramenta *on-line Google Forms*, aplicada aos representantes das UTEs de RSU em operação no Brasil. Dessa forma, realizou-se um levantamento do tipo *Survey*<sup>67</sup>, composto por um questionário que continha, na primeira parte, questões abertas, e, na segunda, questões fechadas.

A pesquisa *Survey* foi elaborada para atender aos objetivos desta pesquisa. Pretendeu-se com ela obter um diagnóstico sobre as usinas que produzem energia elétrica a partir da fonte de biogás de RSU no Brasil. O questionário foi enviado por correio eletrônico, e as respostas foram organizadas automaticamente pela ferramenta *Google Forms*. Essa ferramenta apresenta os resultados em gráficos e planilhas para facilitar as análises estatísticas e a tabulação dos dados. Também foi enviado por correio eletrônico um ofício apresentando a pesquisa, solicitando a participação dos responsáveis, assegurando o uso das informações apenas para fins acadêmicos e garantindo o sigilo dos nomes e das empresas envolvidas.

No Quadro 16, apresenta-se um resumo das informações coletadas por meio do questionário.

Quadro 16 – Resumo das informações coletadas na pesquisa *Survey*

	Item	Descrição
<b>Questionário Técnico</b>	Informações gerais	Nome, endereço, telefone, <i>e-mail</i> e data de operação
	Estimativas	Quantidade prevista de geração e captação de biogás
	Processo produtivo	Quantidade de biogás produzido e tecnologia utilizada
<b>Questionário Geral</b>	Mercado	Objetivo da produção e incentivos

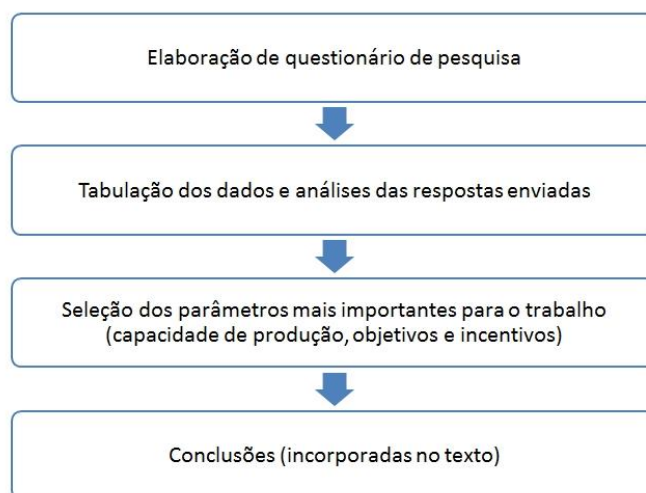
Fonte: Elaboração própria.

<sup>67</sup> De acordo com Freitas e outros (2000), a pesquisa do tipo *Survey* compreende a obtenção de dados sobre características, ações ou opiniões de determinado grupo de pessoas, indicado como representante de uma população-alvo, por meio de um instrumento de pesquisa, geralmente um questionário.

A *Survey* realizada com as UTEs apresentou dados reais sobre captação, geração e aproveitamento do biogás de RSU para geração de energia elétrica. A conversa inicial com os representantes ocorreu no mês de setembro de 2016 por contatos telefônicos e *e-mails*. Em seguida, após confirmação dos responsáveis pelas informações solicitadas, foram aplicados os questionários.

A pesquisa ocorreu nos meses de outubro, novembro e dezembro de 2016. No mês de janeiro de 2017, houve novo contato e reaplicação dos questionários para as usinas que ainda não haviam enviado respostas. Os questionários foram respondidos pelos responsáveis pela área de produção do biogás nas organizações, entre eles engenheiros, técnicos, gerentes e diretores. Na Figura 36, mostra-se a sequência utilizada para a execução da pesquisa com os questionários. O instrumento completo e o ofício podem ser visualizados nos Apêndices A e B.

Figura 36 – Sequência de execução da pesquisa realizada com as UTEs



Fonte: Elaboração própria.

As quinze UTEs contatadas para integrar a pesquisa somavam uma potência total de 117.760kW, o que significa uma representatividade de 100% das usinas registradas na Aneel que, até o ano de 2016, operavam com RSU no Brasil. Desse total, cinco usinas responderam ao questionário, o que corresponde a 33% das UTEs contatadas e a uma potência total de 15.325kW. Notou-se elevada dificuldade por parte dos pesquisados em responder às perguntas devido a diversos fatores, a saber: ausência de funcionário responsável pela área técnica, falta de tempo, sigilo

de informações, dificuldade para abrir o questionário no *link* enviado e desconhecimento de algumas informações solicitadas. Embora a quantidade das UTEs respondentes represente apenas 33% do banco de dados, as informações obtidas sobre o mercado de produção de energia com o biogás de RSU no Brasil foram bastante relevantes. Essas informações foram incorporadas ao texto, compondo os resultados e as discussões apresentados no Capítulo 7.

As entrevistas foram realizadas pessoalmente, com representantes do setor energético em âmbito federal e estadual, sem aplicação de questionário. Seguiram apenas um roteiro com questões informais não estruturadas (GIL, 2002). Em âmbito federal, foi entrevistado um representante da Equipe Técnica da EPE; em âmbito estadual, um servidor público e colaborador da ARSP. Os nomes desses representantes foram preservados, e as informações obtidas por meio dessa fonte foram incorporadas ao texto, uma vez que o objetivo foi somente obter dados relevantes para a pesquisa e atualizar informações sobre o setor.

#### 6.4 PREMISSAS E LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Durante o desenvolvimento da pesquisa, verificaram-se duas limitações principais: (1) projeção populacional; e (2) estimativa de geração de resíduos.

A primeira limitação, embora elaborada por ferramenta apropriada de projeção aritmética indicada por Garcia (2016), apresenta desvios que, com a existência de futuros dados censitários, podem ser comparados para ajustes. No entanto, esse método foi empregado devido ao menor erro relativo (3% a 5%) apresentado no confronto entre cinco metodologias analisadas pelo autor, quando comparadas à projeção do IBGE, publicada no ano 2013 para o período de 2015 a 2030.

A segunda limitação, relativa à estimativa de geração de resíduos, apresenta ainda duas questões importantes, a saber:

(I) Ausência de dados indicando a exata composição gravimétrica dos resíduos sólidos nos municípios capixabas. Por isso, foram utilizados dados deficitários da composição gravimétrica constantes na minuta do Plano Nacional de Resíduos Sólidos, elaborado pelo IPEA no período de 1995 e 2008 (INSTITUTO DE

PESQUISA ECONÔMICA APLICADA, 2011). Esses estudos não consideram as diferenças regionais entre os municípios brasileiros, o que pode influenciar os resultados. No Espírito Santo, futuramente, quando os municípios realizarem a sua efetiva caracterização gravimétrica e implantarem um sistema de gerenciamento quali-quantitativo de resíduos sólidos municipais, desvios desse tipo poderão ser apurados para gerar resultados mais próximos da realidade local.

(II) Durante todo o período de projeção populacional (vinte anos), foi utilizada a mesma proporção de resíduos (secos e úmidos). Nesse caso, sabe-se que, atualmente, a taxa de geração de resíduos apresenta um crescimento com velocidade superior ao da taxa de crescimento populacional. No entanto, como a influência das estratégias de gerenciamento de resíduos, considerados os critérios de não geração e redução/minimização, ainda não foi analisada, aceita-se a impossibilidade de avaliar a mudança na taxa de geração de resíduos ao longo dos anos estudados nesta pesquisa. Sendo assim, optou-se por manter constante a composição gravimétrica e a geração *per capita* de resíduos.

A escolha do modelo LandGEM foi norteada por várias premissas. Cho, Moon e Kim (2012) afirmam que é um *software* amplamente aplicado para prever os potenciais anuais de CH<sub>4</sub> em aterros. Felca e outros (2015) argumentam que é um modelo mais recente e que apresenta um maior número de fatores considerados nos cálculos, o que aumenta a sua precisão. Em estudo comparativo com o modelo do Banco Mundial, por exemplo, o LandGEM demonstrou ser um método mais adequado porque apresenta melhor resposta com as variáveis empregadas, além de ter também um custo mais baixo. Entretanto, não desqualifica o modelo do Banco Mundial, apenas indica o LandGEM como uma solução mais precisa para o cálculo da geração do biogás. Do mesmo modo, Faour, Reinhart e You (2007) também assumem posição favorável sobre o uso desse *software* e recomendam o uso desse modelo por causa de sua ampla utilização, simplicidade e bom ajuste de dados. Mustafa, Mustafa e Mutlag (2013) atestam que o LandGEM é considerado uma ferramenta mais satisfatória de triagem dos dados de entrada e de melhores estimativas. De forma semelhante, no estudo de Emkes, Coulon e Wagland (2015), esse modelo de resíduos foi escolhido principalmente por requerer uma pequena quantidade de dados de entrada e fornecer uma estimativa da evolução das

emissões de gases de aterro cumulativos ao longo do tempo, o que oferece vantagens em relação aos modelos mais simples.

Por outro lado, Aydi e outros (2015) afirmam que uma desvantagem do modelo LandGEM é não considerar diferenças no teor de matéria orgânica no aterro, pois atesta todos os resíduos como RSU, o que não é o caso. Por exemplo, uma composição de resíduos com teor mais elevado de celulose apresenta valor de  $L_0$  mais elevado, portanto, produz uma saída de  $CH_4$  maior. Por isso, é fornecido um guia como parâmetro para cada gama de valores de  $L_0$  utilizados no modelo LandGEM, baseado em biorreator úmido de aterros convencionais, e para os valores de regulação CAA (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2005). Por conseguinte, o valor potencial da capacidade de geração de  $CH_4$  pode ser alterado pelo utilizador, dependendo da composição dos resíduos, se conhecida.

Aydi, Abichou e Zairi (2015) acrescentam ainda que, embora nenhum modelo combine perfeitamente com os dados de recuperação de biogás coletado manualmente, alguns modelos se encaixam melhor do que outros. Em seus estudos, o modelo LandGEM foi selecionado como a melhor ferramenta para determinar as taxas de geração de gás de aterro de forma mais representativa, uma vez que é mais confiável. Dito isto, justifica-se a aplicação do modelo LandGEM nesta pesquisa.

## 7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados tanto da fase técnica como da fase regulatória. Os resultados técnicos incluem os aspectos quantitativos referentes à estimativa de geração de biogás oriundo de aterros sanitários e, por conseguinte, de energia elétrica em regiões do Espírito Santo. Os resultados regulatórios apresentam os aspectos qualitativos referentes a geração, transporte, distribuição e comercialização desse energético no Brasil e no Espírito Santo.

### 7.1 RESULTADOS DA FASE TÉCNICA

Inicialmente, estimou-se a produção de  $\text{CH}_4$  dos aterros em operação até o final do ano de 2015. Em seguida, calculou-se a estimativa de produção desse gás no período seguinte, entre os anos 2016 e 2035. Foram gerados três cenários a partir dos períodos mencionados. O Cenário 3 foi destacado para apresentar o potencial de geração de energia elétrica porque representa a média ponderada dos valores de  $k$  (taxa de geração de  $\text{CH}_4$ ) e  $L_0$  (potencial de geração de  $\text{CH}_4$ ).

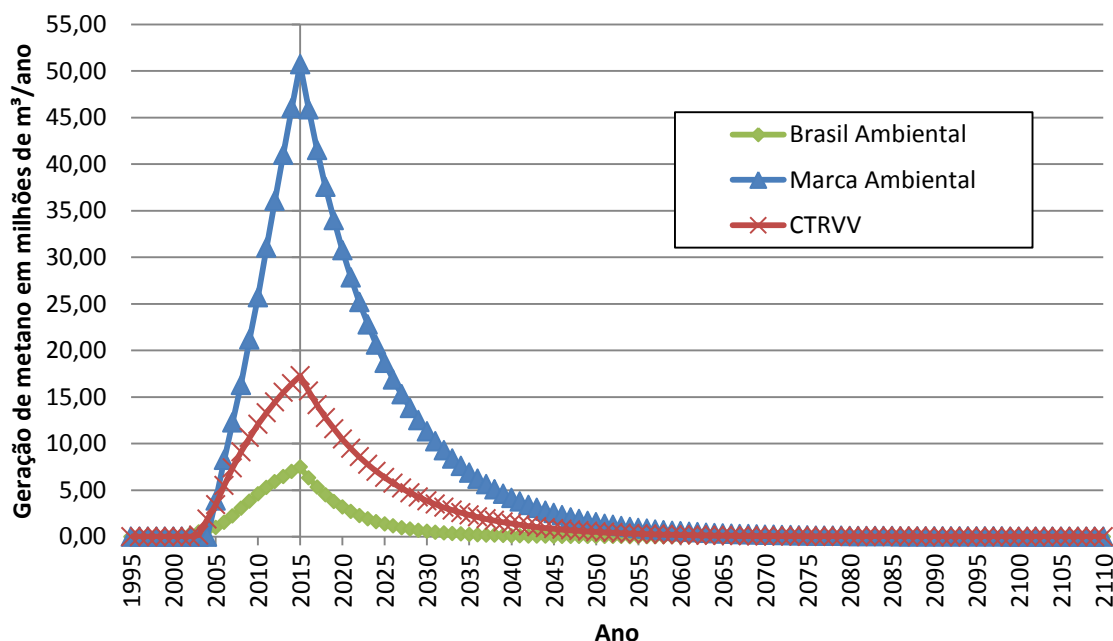
#### 7.1.1 Estimativa de geração de metano até 2015

Para estimar a geração atual de  $\text{CH}_4$  proveniente dos RSU depositados nos três aterros em operação no Espírito Santo – Brasil Ambiental, CTRVV e Marca Ambiental – até o final de 2015, considerou-se inicialmente o fechamento de tais aterros no ano de 2014.

Os dados organizados na Tabela 18, correspondentes à coleta de resíduos, foram introduzidos no modelo LandGEM com o objetivo de obter como resultado a quantidade de biogás e de  $\text{CH}_4$  gerada. O período representado compreende o ano considerado para abertura do aterro e o ano de 2110, empregado como limite de cálculo para que seja possível visualizar o momento de menor geração de gás em

todas as curvas do gráfico. No Gráfico 1, visualiza-se a geração de CH<sub>4</sub> para cada um dos três aterros em operação.

Gráfico 1 – Estimativa de geração de metano dos aterros sanitários das empresas Brasil Ambiental, CTRVV e Marca Ambiental considerando-se seu fechamento hipotético em 2014



Fonte: Oliveira e Cardoso (2017).

Observa-se que todas as curvas do gráfico apresentam o mesmo percurso, correspondente a um crescimento enquanto ocorre a deposição de resíduos, e, em seguida, começam a decair a partir do ano seguinte àquele determinado como limite da deposição, de acordo com a taxa de decrescimento apresentada na Equação 2.

Ainda no Gráfico 1, nota-se que o pico de geração de CH<sub>4</sub> ocorre no ano de 2015 e que, por volta de trinta anos após o hipotético encerramento desses aterros, essa geração se torna mínima. Percebe-se a elevada estimativa de geração de CH<sub>4</sub> do aterro sanitário da Marca Ambiental quando comparada à do aterro da Brasil Ambiental, com uma diferença de pico de geração quase dez vezes maior.

Essa elevada geração pode ser justificada tanto pelo maior valor de L<sub>0</sub> adotado como pelo grande volume de resíduos recebidos, uma vez que o aterro da Marca Ambiental se insere na Região Metropolitana, que apresenta maior produção de RSU do Estado.

A estimativa do total de CH<sub>4</sub> gerado até 2015 por esses aterros, resumida no Gráfico 2, totaliza 4,69 x 10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>, oriundos de cerca de 8 milhões de toneladas de resíduos.<sup>68</sup> Cabe informar que a massa acumulada de resíduos permanece gerando CH<sub>4</sub> continuamente, mas de forma decrescente. A importância desse resultado reside no fato de que esse CH<sub>4</sub> é somado ao produzido pelos resíduos dos demais municípios do Estado na Etapa 2, para então gerar a estimativa de aproveitamento energético do Espírito Santo.

É necessário ressaltar que os potenciais de geração de CH<sub>4</sub> (L<sub>0</sub>) apresentados por Gervázio e outros (2010) para os aterros são bem diferentes: enquanto o aterro da Brasil Ambiental exibiu um L<sub>0</sub> igual a 79,18m<sup>3</sup>/Mg, o da Marca Ambiental apresentou um L<sub>0</sub> igual a 164m<sup>3</sup>/Mg e o da CTRVV, um L<sub>0</sub> igual a 140m<sup>3</sup>/Mg. Sobre esse quesito, Abreu (2009) reforça que, quanto mais elevada a fração orgânica contida nos RSU, mais alto tende a ser o valor de L<sub>0</sub>. Portanto, nesse aspecto, a Marca Ambiental também indica maior concentração de matéria orgânica nos RSU e, com isso, maior capacidade de geração de CH<sub>4</sub>.

Com relação à taxa de geração de CH<sub>4</sub> (k), determinante da velocidade da taxa de geração desse gás para a massa de resíduos do aterro, os valores obtidos para os três aterros não apontaram diferença expressiva. Todos três exibiram características semelhantes, tais como teor de umidade, precipitação média anual e temperatura. Os valores apresentados, k = 0,17 ano<sup>-1</sup> para o Brasil Ambiental e k = 0,1 ano<sup>-1</sup> para os demais aterros sanitários, representam o estado do Espírito Santo de forma significativa, uma vez que valores elevados de k estão associados a regiões de alta umidade, conforme já mencionado por Abreu (2009).

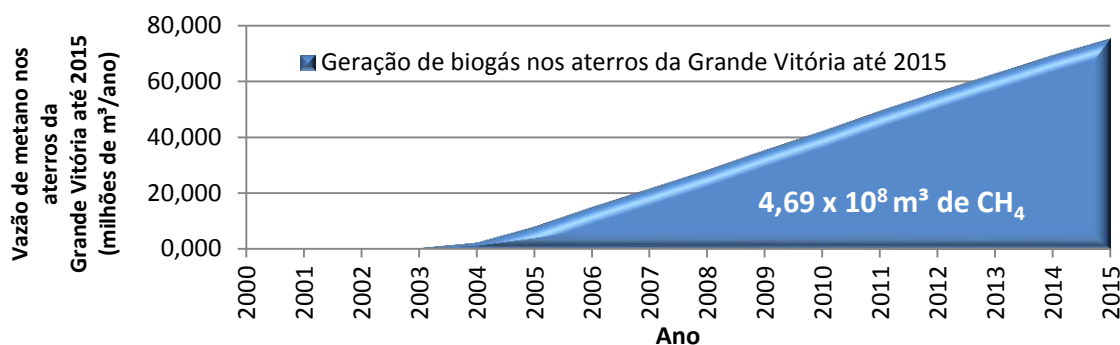
A área azul no Gráfico 2 expõe o total acumulado da estimativa de geração de CH<sub>4</sub> (4,69 x 10<sup>8</sup> CH<sub>4</sub>) dos três aterros em operação na Grande Vitória, até o final do ano de 2015. Tal resultado representa a quantidade de gás CH<sub>4</sub> que poderia ser utilizada, caso esses aterros tivessem um sistema instalado para aproveitamento energético.

---

<sup>68</sup> As informações sobre esse resultado correspondem aos Dados de Entrada 1 e podem ser verificadas no item 6.2.1.1. Ver também os valores de k e L<sub>0</sub> na Tabela 21, utilizados para obter a estimativa de geração estadual de biogás e metano.



Gráfico 2 – Estimativa de geração de metano nos aterros da Grande Vitória até 2015

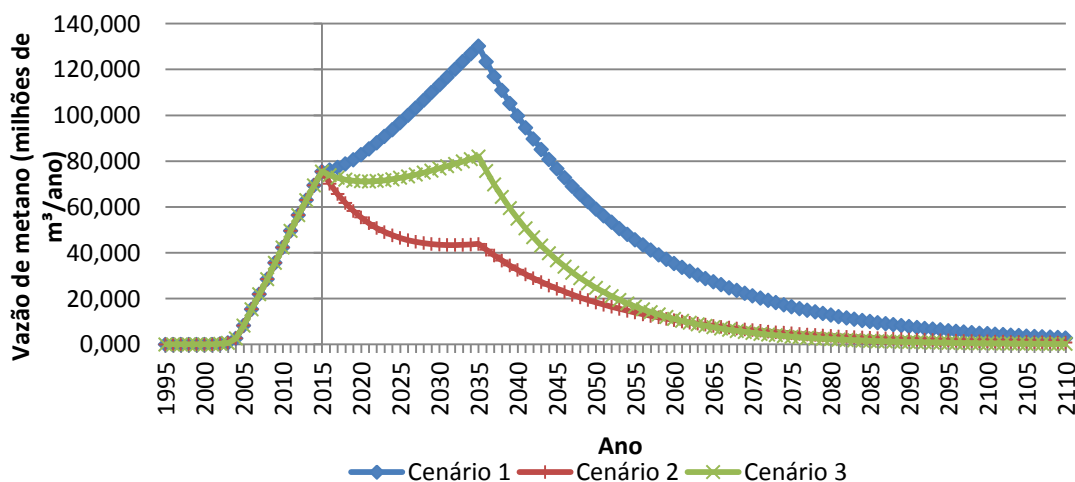


Fonte: Oliveira e Cardoso (2017).

### 7.1.2 Estimativa de geração de metano a partir do ano 2015

Conforme mencionado, o  $\text{CH}_4$  gerado nos três aterros em operação até 2015 soma-se ao gerado nos aterros propostos pelo Programa *Espírito Santo sem Lixão*. Logo, formam-se dois picos de geração de  $\text{CH}_4$ : o primeiro, em 2015, devido aos resíduos depositados nos atuais aterros da Grande Vitória; o segundo, em 2035, ano subsequente ao fechamento dos demais aterros. Considerou-se o fechamento neste ano para compor o período projetado de vinte anos, sabendo-se que esse processo deve continuar em outros aterros ou digestores. Assim, no Gráfico 3, demonstra-se tal situação e apresentam-se os três cenários.

Gráfico 3 – Estimativa de geração acumulada de metano de 1995 a 2110



Fonte: Oliveira e Cardoso (2017).

A coincidência das linhas de geração de  $\text{CH}_4$  até o ano de 2015 refere-se à soma das estimativas de geração desse gás nos aterros Brasil Ambiental, Marca Ambiental e CTRVV. Após esse ano, obviamente, notam-se três curvas diferentes, referentes aos cenários já estudados para a geração de  $\text{CH}_4$  por parte dos demais aterros do Programa considerados com características similares.

A elaboração desses cenários é importante para direcionar decisões de investimento em empreendimentos com as escalas encontradas. A alteração dos valores de  $k$  e  $L_0$  resulta em diferentes potenciais e velocidades de geração de  $\text{CH}_4$  indicados por essas variáveis, as quais foram modificadas em cada cenário de modo a apontar o Cenário 3 como o mais indicado para uma análise de investimento. Isso se justifica pelo fato de o Cenário 3 representar um cenário moderado, uma vez que corresponde à média entre um de maior estimativa, representado pelo Cenário 1, e outro de menor estimativa, representado pelo Cenário 2.

Com base nos números apresentados, constatou-se que o Cenário 1 apontou uma geração de  $\text{CH}_4$  bem acima da dos demais cenários, por conta do elevado valor de  $L_0$ . Tal valor, no entanto, foi empregado propositadamente acima do valor fornecido pelos aterros da Marca Ambiental e da CTRVV, de modo a indicar uma superestimativa em relação à real geração, uma vez que nenhum dos três aterros atinge esse valor de  $L_0$ .

Por outro lado, o Cenário 2 apresenta uma estimativa mais pessimista para a geração de  $\text{CH}_4$  devido ao menor valor de  $L_0$  adotado. Embora os valores dos parâmetros de precipitação e temperatura da região de Bhopal (Índia) se aproximem dos valores do Espírito Santo, conforme identificado na Tabela 16, as características de composição dos RSU apresentadas por Kumar e Sharma (2014) apontam diferenças importantes, como menor concentração de carbono orgânico disponível, o que resulta numa produção de  $\text{CH}_4$  mais reduzida.

Por fim, o Cenário 3 apresenta valores intermediários aos dos dois cenários anteriores, embasados na média ponderada de  $k$  e  $L_0$ , registrados na Tabela 16. Cabe apontar que esse cenário ainda tende a ser uma subestimativa da geração de  $\text{CH}_4$  por ter um valor de  $L_0$  menor que os adotados para os aterros existentes. Neste estudo, adotou-se, então, o valor de  $L_0 = 81,0447\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{Mg}$  de resíduos.

Na sequência, apresenta-se um resumo dos principais resultados obtidos para o Cenário 3, selecionado para exposição neste trabalho.

### 7.1.3 Elaboração de cenário com média ponderada de $k$ e $L_0$

#### 7.1.3.1 Vazão de metano em $m^3/h$

Os dados de disposição de RSU apresentados nas Tabelas 18 e 20 foram inseridos no modelo LandGEM, cujo resultado permitiu obter a quantidade de biogás e de  $CH_4$  gerada ao longo de todo o período considerado, tomando-se como parâmetros os valores de  $k$  e  $L_0$  adotados para o Cenário 3. Assim, a fim de estimar a geração de  $CH_4$  para o período de vinte anos após a abertura dos novos aterros do Programa, definiu-se um período de tempo entre os anos de 2016 e 2035.

Para a geração de energia elétrica, considerou-se somente a fração de  $CH_4$  no biogás, cuja estimativa de geração anual, no período calculado, é apresentada na Tabela 25. Na sequência, no Gráfico 4, mostra-se a estimativa da geração acumulada de  $CH_4$  para o período.

Tabela 25 – Vazão de metano gerada e possível de ser recuperada, em  $m^3/ano$ .  
(Continua)

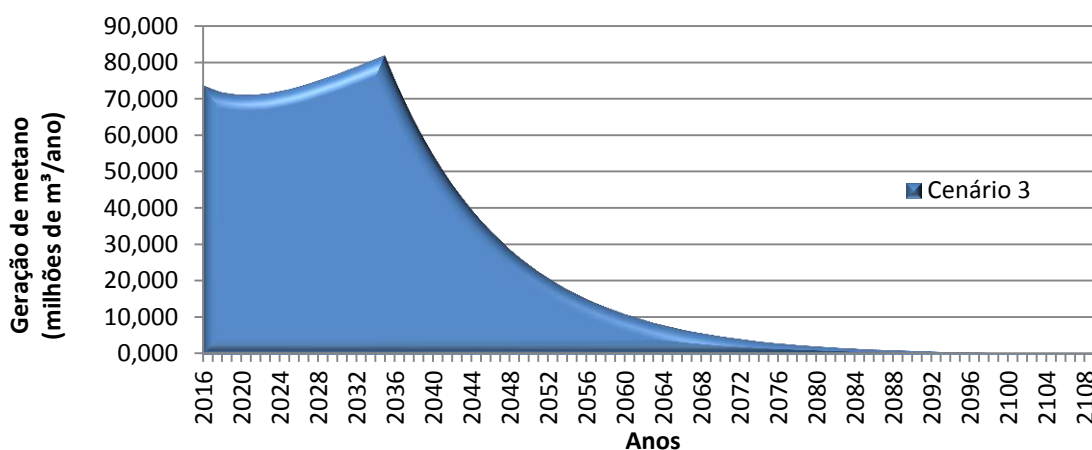
Ano	Geração de metano ( $m^3/ano$ )
2016	73.873.932,96
2017	72.711.724,95
2018	71.904.241,22
2019	71.401.056,22
2020	71.158.559,11
2021	71.139.034,19
2022	71.309.867,96
2023	71.642.864,83
2024	72.113.656,19
2025	72.701.189,73
2026	73.387.287,89
2027	74.156.265,73
2028	74.994.600,10
2029	75.890.643,00
2030	76.834.373,06

(Conclusão)	
<b>Ano</b>	<b>Geração de metano (m<sup>3</sup>/ano)</b>
2031	77.817.180,08
2032	78.828.877,75
2033	79.868.951,57
2034	80.928.972,24
2035	82.004.335,17
<b>TOTAL</b>	<b>1.494.667.613,96</b>

Fonte: Oliveira e Cardoso (2017).

Cabe ressaltar que, tanto no Gráfico 4 como na Tabela 26, observa-se uma redução inicial na produção de CH<sub>4</sub> referente à pouca influência dos novos resíduos sobre a geração total desse gás. Todavia, a partir de 2022, devido à continuidade da deposição de resíduos, a geração total tende a subir, chegando ao seu pico em 2035, quando cai significativamente em consequência da redução da quantidade de matéria orgânica disponível para decomposição. No decaimento, a curva é dirigida pela constante k que, de acordo com a *United States Environmental Protection Agency* (2005), tende a baixar ao longo do tempo, após estabilização da matéria orgânica dentro da célula do aterro.

Gráfico 4 – Geração de metano em milhões de m<sup>3</sup>/ano conforme o Cenário 3

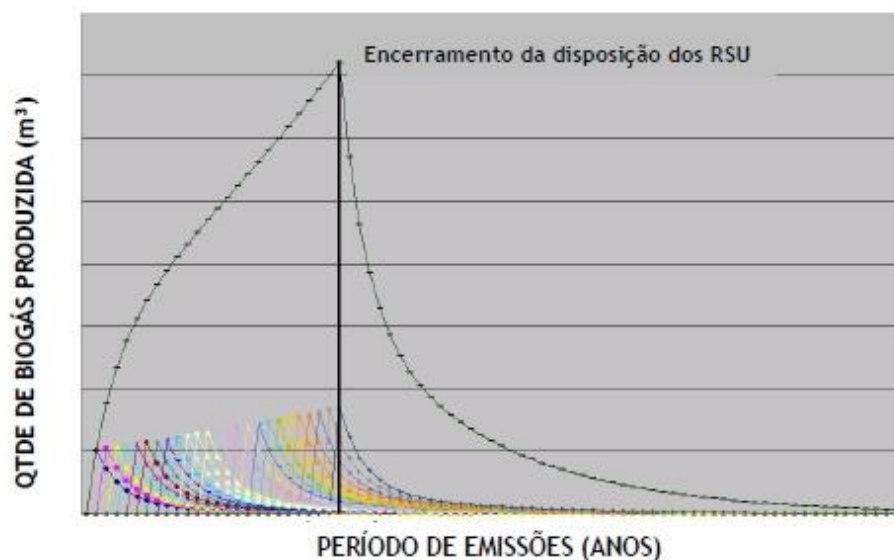


Fonte: Oliveira e Cardoso (2017).

Ainda no Gráfico 4, pode-se observar que, após o fechamento do aterro no ano de 2035, a geração de CH<sub>4</sub> ainda continua por um período de tempo, cerca de trinta anos, até atingir o valor zero, por volta de 2084. Esse comportamento da curva é

similar ao apresentado em estudo da Empresa de Pesquisa Energética (2014c), conforme visualizado na Figura 37.

Figura 37 – Evolução típica da produção de biogás em aterro sanitário



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2014c).

As estimativas de geração de  $\text{CH}_4$  até aqui verificadas foram importantes para se atingir o objetivo de calcular a produção de eletricidade e de outros usos para o Espírito Santo. Os resultados referentes a esse procedimento são descritos a seguir.

### 7.1.3.2 Geração de energia elétrica

Conforme já indicado, considerou-se que 75% do volume de  $\text{CH}_4$  gerado nos aterros podem ser recuperados em um projeto de captação de biogás. Na Tabela 26, apresenta-se a estimativa do volume anual de  $\text{CH}_4$  gerado e possível de ser recuperado, a energia elétrica que pode ser gerada a partir desse biogás bem como a potência instalada correspondente, calculadas com base nas equações 7 a 9. Para isso, levou-se em conta o rendimento de 42% do conjunto motogerador na conversão energética e um tempo de operação de 95%, conforme resumo de parâmetros já mencionados (Tabela 23).

Tabela 26 – Energia disponível a partir da geração gás metano estimado

Ano	Volume gerado de metano pela massa de resíduos [m <sup>3</sup> /ano]	Energia disponível no metano coletado (eficiência de coleta de 75%) [MWh/ano]	Energia gerada com eficiência de 42% do motorizador [MWh/ano]	Potência instalada [MW]
2016	73.873.932,959	373.481,980	156.862,432	18,849
2017	72.711.724,951	367.606,244	154.394,623	18,553
2018	71.904.241,220	363.523,876	152.680,028	18,347
2019	71.401.056,224	360.979,940	151.611,575	18,218
2020	71.158.559,111	359.753,955	151.096,661	18,156
2021	71.139.034,188	359.655,244	151.055,202	18,151
2022	71.309.867,958	360.518,922	151.417,947	18,195
2023	71.642.864,831	362.202,444	152.125,026	18,28
2024	72.113.656,189	364.582,608	153.124,695	18,4
2025	72.701.189,732	367.552,982	154.372,252	18,55
2026	73.387.287,892	371.021,665	155.829,099	18,725
2027	74.156.265,734	374.909,361	157.461,932	18,921
2028	74.994.600,104	379.147,700	159.242,034	19,135
2029	75.890.642,996	383.677,794	161.144,674	19,364
2030	76.834.373,061	388.448,979	163.148,571	19,604
2031	77.817.180,081	393.417,723	165.235,444	19,855
2032	78.828.877,753	398.532,530	167.383,662	20,113
2033	79.868.951,567	403.790,796	169.592,134	20,379
2034	80.928.972,244	409.149,907	171.842,961	20,649
2035	82.004.335,167	414.586,584	174.126,365	20,924
<b>MÉDIA</b>				
<b>TOTAL</b>	<b>1.494.667.613,964</b>	<b>7.556.541,234</b>	<b>3.173.747,318</b>	

Fonte: Oliveira e Cardoso (2017).

Com base no Cenário 3, pode-se dizer que a energia disponível para abastecimento, acumulada no período de 2016 a 2035, é de aproximadamente  $3,17 \times 10^9$  kWh ou representa uma média anual de 158.687 MWh/ano, conforme exibido na Tabela 26. Em comparação com os demais cenários, esses valores podem ser considerados intermediários entre o mínimo de  $2,12 \times 10^9$  kWh (Cenário 2) e o máximo de  $4,25 \times 10^9$  kWh (Cenário 1). Considerando-se apenas o Cenário 3, é possível atender um número de 47.228 a 88.160 residências<sup>69</sup>.

<sup>69</sup> Ver Tabela 20 e Apêndice A3 em Oliveira e Cardoso (2017).

Em seguida, na Tabela 27, apresentam-se os valores anuais estimados de kWh/t de RSU para o período estudado. Nota-se que a média para esse período se situa em 144,135kWh/t de RSU. Esse resultado assemelha-se ao estimado por Pecora e outros (2012), os quais calcularam 145kWh/t de RSU gerados na cidade de São Paulo.

Tabela 27 – Geração de energia por tonelada de resíduos

<b>Geração de energia por tonelada de resíduos</b>			
<b>Ano</b>	<b>t de RSU dispostos no ano anterior</b>	<b>MWh</b>	<b>kWh/t de RSU</b>
2016	995.425,682	156.862,432	157,5832677
2017	1.006.674,149	154.394,623	153,3710016
2018	1.017.922,615	152.680,028	149,9917827
2019	1.029.171,082	151.611,575	147,3142585
2020	1.040.419,548	151.096,661	145,2266651
2021	1.051.668,015	151.055,202	143,6339228
2022	1.062.916,481	151.417,947	142,4551695
2023	1.074.164,947	152.125,026	141,6216631
2024	1.085.413,414	153.124,695	141,0749981
2025	1.096.661,880	154.372,252	140,765586
2026	1.107.910,347	155.829,099	140,6513621
2027	1.119.158,813	157.461,932	140,6966819
2028	1.130.407,280	159.242,034	140,8713805
2029	1.141.655,746	161.144,674	141,1499693
2030	1.152.904,212	163.148,571	141,5109506
2031	1.164.152,679	165.235,444	141,9362312
2032	1.174.941,338	167.383,662	142,4612933
2033	1.186.649,612	169.592,134	142,916774
2034	1.197.898,078	171.842,961	143,4537414
2035	1.209.146,545	174.126,365	144,0076606
<b>TOTAL:</b>	<b>22.045.262,462</b>	<b>3.173.747,318</b>	<b>-</b>
<b>MÉDIA:</b>	<b>1.102.263,123</b>	<b>158.687,366</b>	<b>144,135</b>

Fonte: Oliveira e Cardoso (2017).

## 7.1.3.3 Gerações regionais de metano e energia elétrica

Embasadas na estimativa de geração regional de RSU, conforme distribuição definida em *Espírito Santo sem Lixão* (Tabela 20), as estimativas de potencial de geração de CH<sub>4</sub> e de energia elétrica foram calculadas para as regiões que compõem esse Programa, considerados os parâmetros definidos para o Cenário 3. Os resultados potenciais são apresentados na Tabela 28.

Tabela 28 – Metano/ano e energia/ano para as regiões do Espírito Santo sem Lixão  
(Continua)

Ano	Região 1 CONORTE Reg. Norte (São Mateus)			Região 2 CONDOESTE Região Doce Oeste (Colatina)			Região 3 Região Doce Leste (Aracruz)		
	Geração regional de metano (m <sup>3</sup> /ano)	Potencial de geração de energia elétrica (MWh/ano)	Potência instalada (KW)	Geração regional de metano (m <sup>3</sup> /ano)	Potencial de geração de energia elétrica (MWh/ano)	Potência instalada (KW)	Geração regional de metano (m <sup>3</sup> /ano)	Potencial de geração de energia elétrica (MWh/ano)	Potência instalada (KW)
2016	605.076,37	1.284,81	154,39	507.573,85	1.077,77	129,51	514.621,24	1.092,74	131,31
2017	1.170.130,78	2.484,63	298,56	979.955,68	2.080,82	250,04	999.300,99	2.121,90	254,97
2018	1.698.158,91	3.605,84	433,29	1.419.779,63	3.014,73	362,26	1.456.280,37	3.092,24	371,57
2019	2.191.932,19	4.654,30	559,28	1.829.482,68	3.884,69	466,80	1.887.632,79	4.008,16	481,63
2020	2.654.014,62	5.635,48	677,18	2.211.319,40	4.695,47	564,22	2.295.276,43	4.873,74	585,65
2021	3.086.778,27	6.554,40	787,60	2.567.375,59	5.451,51	655,07	2.680.985,90	5.692,75	684,06
2022	3.492.417,67	7.415,73	891,10	2.899.580,95	6.156,91	739,84	3.046.403,00	6.468,67	777,30
2023	3.872.963,09	8.223,77	988,20	3.209.720,72	6.815,46	818,97	3.393.046,62	7.204,73	865,74
2024	4.230.292,82	8.982,52	1.079,37	3.499.446,52	7.430,65	892,89	3.722.321,96	7.903,90	949,76
2025	4.566.144,58	9.695,66	1.165,06	3.770.286,36	8.005,75	962,00	4.035.529,05	8.568,96	1.029,68
2026	4.882.125,99	10.366,61	1.245,69	4.023.653,85	8.543,75	1.026,65	4.333.870,60	9.202,45	1.105,80
2027	5.179.724,38	10.998,52	1.321,62	4.260.856,81	9.047,42	1.087,17	4.618.459,32	9.806,74	1.178,41
2028	5.460.315,71	11.594,33	1.393,21	4.483.105,16	9.519,34	1.143,88	4.890.324,60	10.384,02	1.247,78
2029	5.725.172,97	12.156,72	1.460,79	4.691.518,27	9.961,88	1.197,05	5.150.418,81	10.936,30	1.314,14
2030	5.975.473,87	12.688,20	1.524,66	4.887.131,71	10.377,24	1.246,96	5.399.623,01	11.465,45	1.377,73
2031	6.212.307,97	13.191,09	1.585,09	5.070.903,55	10.767,46	1.293,85	5.638.752,33	11.973,21	1.438,74
2032	6.436.683,25	13.667,52	1.642,34	5.240.919,96	11.128,46	1.337,23	5.868.560,89	12.461,18	1.497,38
2033	6.649.532,27	14.119,48	1.696,65	5.403.810,88	11.474,34	1.378,80	6.089.746,33	12.930,85	1.553,81
2034	6.851.717,77	14.548,80	1.748,23	5.557.309,50	11.800,28	1.417,96	6.302.954,11	13.383,57	1.608,22
2035	7.044.037,93	14.957,17	1.797,30	5.702.118,83	12.107,77	1.454,91	6.508.781,37	13.820,62	1.660,73
<b>TOTAL</b>	<b>87.985.001,42</b>	<b>186.825,59</b>		<b>72.215.849,89</b>	<b>153.341,69</b>		<b>78.832.889,71</b>	<b>167.392,18</b>	



Tabela 28 – Metano/ano e energia/ano para as regiões do Espírito Santo sem Lixão.

(conclusão)

Ano	Região 4 Região Metropolitana			Região 5 CONLISUL Região Litoral Sul (Itapemirim)			Região 6 CONSUL Região Sul Serrana (Cachoeiro de Itapemirim)		
	Geração regional de metano	Potencial de geração de energia elétrica	Potência instalada	Geração regional de metano	Potencial de geração de energia elétrica	Potência instalada	Geração regional de metano	Potencial de geração de energia elétrica	Potência instalada
	(m <sup>3</sup> /ano)	(MWh/ano)	(KW)	(m <sup>3</sup> /ano)	(MWh/ano)	(KW)	(m <sup>3</sup> /ano)	(MWh/ano)	(KW)
2016	3.402.376,36	7.224,54	868,13	473.631,96	1.005,70	120,85	558.732,85	1.186,40	142,56
2017	6.593.620,67	14.000,76	1.682,38	916.648,51	1.946,39	233,89	1.079.125,27	2.291,39	275,34
2018	9.589.536,29	20.362,23	2.446,80	1.331.341,21	2.826,94	339,70	1.564.047,07	3.321,07	399,07
2019	12.404.743,69	26.339,98	3.165,10	1.719.830,13	3.651,85	438,82	2.016.153,23	4.281,06	514,43
2020	15.052.768,97	31.962,75	3.840,75	2.084.076,64	4.425,29	531,76	2.437.900,03	5.176,59	622,04
2021	17.546.125,82	37.257,09	4.476,94	2.425.895,29	5.151,10	618,97	2.831.559,89	6.012,48	722,48
2022	19.896.391,24	42.247,60	5.076,62	2.746.964,81	5.832,85	700,90	3.199.235,12	6.793,19	816,29
2023	22.114.275,72	46.957,01	5.642,52	3.048.838,31	6.473,84	777,92	3.542.870,69	7.522,86	903,97
2024	24.209.688,03	51.406,37	6.177,17	3.332.952,60	7.077,12	850,41	3.864.265,99	8.205,31	985,98
2025	26.191.795,30	55.615,13	6.682,90	3.600.636,97	7.645,52	918,71	4.165.085,70	8.844,06	1.062,73
2026	28.069.078,47	59.601,32	7.161,90	3.853.121,22	8.181,64	983,13	4.446.869,93	9.442,39	1.134,63
2027	29.849.383,68	63.381,58	7.616,15	4.091.543,07	8.687,90	1.043,97	4.711.043,49	10.003,34	1.202,04
2028	31.539.969,78	66.971,34	8.047,51	4.316.955,12	9.166,54	1.101,48	4.958.924,55	10.529,68	1.265,28
2029	33.147.552,31	70.384,85	8.457,68	4.530.331,14	9.619,61	1.155,93	5.191.732,60	11.024,02	1.324,68
2030	34.678.344,12	73.635,30	8.848,27	4.732.572,05	10.049,05	1.207,53	5.410.595,89	11.488,75	1.380,53
2031	36.138.093,04	76.734,90	9.220,73	4.924.511,31	10.456,61	1.256,50	5.616.558,17	11.926,09	1.433,08
2032	37.532.116,68	79.694,95	9.576,42	5.106.920,01	10.843,93	1.303,04	5.810.585,10	12.338,08	1.482,59
2033	38.865.334,61	82.525,87	9.916,59	5.280.511,51	11.212,53	1.347,34	5.993.570,04	12.726,63	1.529,28
2034	40.142.298,16	85.237,35	10.242,41	5.445.945,79	11.563,81	1.389,55	6.166.339,49	13.093,48	1.573,36
2035	41.367.218,02	87.838,32	10.554,95	5.603.833,42	11.899,07	1.429,83	6.329.658,09	13.440,27	1.615,03
<b>TOTAL</b>	<b>508.330.710,95</b>	<b>1.079.379,27</b>		<b>69.567.061,06</b>	<b>147.717,31</b>		<b>79.894.853,20</b>	<b>169.647,13</b>	

Fonte: Oliveira e Cardoso (2017).

Nota 1: Dados adaptados pela autora.

Nota 2: A coluna verde indica comercialização por minigeração distribuída conforme Resolução Aneel n° 687/2015. A coluna azul indica comercialização por PIE ou APE, conforme Decreto Aneel n° 2.003/1996.

Na Tabela 28, destaca-se a Região 4, correspondente à Região Metropolitana<sup>70</sup>, por absorver o potencial mais elevado de geração de CH<sub>4</sub> (508.330.710,95 m<sup>3</sup>/ano) e, conseqüentemente, o maior potencial de geração de energia elétrica (1.079.379,27MWh/ano). Tal situação associa-se ao fato de essa região abarcar os

<sup>70</sup> Os municípios inseridos nesta divisão são Cariacica, Domingos Martins, Marechal Floriano, Santa Leopoldina, Santa Maria de Jetibá, Serra, Viana, Vila Velha e Vitória (Ver Figura 32 e Quadro 15).

municípios com maior concentração populacional e maior geração de RSU. Nota-se que até o ano 2022 a estimativa referente à potência instalada de energia elétrica indica a possibilidade de uma central geradora de minigeração distribuída (até 5MW) conforme Resolução Normativa Aneel nº 687/2015. Nos anos seguintes, devido ao elevado crescimento da geração regional de CH<sub>4</sub>, a potência instalada de energia elétrica (selecionada na cor azul) aponta possibilidades de comercialização fora dessa mesma Resolução, porém com possibilidades de comercialização na categoria PIE e APE.

Em ordem decrescente de potenciais, têm-se as regiões 1 (Conorte), 6 (Consul), 3 (Doce Leste), 2 (Condoeste) e 5 (Conlisul)<sup>71</sup>. Esta última, correspondente à região Litoral Sul, apresenta menor concentração populacional e, obviamente, menor geração de RSU. Todavia, todas essas regiões têm potencial que pode ser aproveitado por uma usina de minigeração distribuída de energia elétrica, conforme a Resolução Normativa Aneel nº 687/2015, já citada.

Observa-se ainda que o menor valor da Tabela 28, 1.005,70MWh, referente ao potencial de geração de energia elétrica da Região 5 para o ano de 2016, é um valor interessante, uma vez que corresponde a 83.808,33kWh/mês, suficientes para abastecer 558 residências, se considerado um consumo residencial de 150kWh/mês.

Como indicam os resultados, ao considerar a totalidade das seis regiões e a hipótese de todos os resíduos destinados seguirem para um único aterro, a fim de atender uma única central geradora de energia elétrica, o Espírito Santo, dispondo de um total de energia acumulada no período de 2016 a 2035 de aproximadamente  $3,17 \times 10^9$ kWh ou uma média anual de 158.687MWh/ano, poderia abastecer anualmente 88.160 residências, se se considerar o consumo residencial brasileiro na faixa de 150kWh/mês, como sugerido pela Empresa de Pesquisa Energética (2014c).

Se a potência da usina se mantiver até 30.000kW, será possível obter benefícios de redução não inferiores a 50% nas tarifas de uso dos sistemas elétricos (TUST e TUSD), conforme disposto no artigo 26, § 1º, da Lei nº 9.427/1996 e na Lei nº

---

<sup>71</sup> Os municípios de cada região mencionada estão arrolados na Figura 32 e no Quadro 15.

13.097/2015. Dessa forma, será possível comercializar energia elétrica de forma direta com um consumidor de carga maior ou igual a 500kW, conforme disposto no artigo 26, § 5º, da referida Lei.

No aspecto relativo à capacidade das UTEs que já operam no Brasil, a pesquisa identificou que 80% delas têm capacidade instalada de até 5MW. As demais (20%) têm capacidade acima de 5MW e até o limite de 30MW. Esse resultado indica que a maior parte das usinas que operam com biogás de RSU no Brasil é de pequeno porte, o que confirma a realidade constatada para o Espírito Santo até o ano de 2022.

## 7.2 RESULTADOS DA FASE REGULATÓRIA

Os resultados regulatórios abordam aspectos qualitativos, empregados com o intuito de indicar viabilidade regulatória na inserção do biogás de RSU no mercado de energia elétrica e gás natural no Brasil e no Espírito Santo. Para tanto, foram analisados o arcabouço regulatório que trata do tema bem como artigos, livros, dissertações e teses sobre o assunto, além das informações colhidas com a aplicação de entrevistas a representantes do setor energético.

Constatou-se que existem formas variadas para a utilização da energia gerada a partir do biogás de RSU, mas esta pesquisa concentrou-se na utilização para a energia elétrica e o gás natural (biometano). Para ambas as finalidades, utilização de energia elétrica e de gás natural, existe um mercado em que operam diversos atores, sob influência de regulação específica – Aneel e ANP, no Brasil, e ARSP, no Espírito Santo. Algumas possibilidades regulatórias aplicadas aos RSU foram selecionadas e resumidas no Quadro 17, relativas ao Brasil, e no Quadro 18, relativas ao Espírito Santo.

Quadro 17 – Arcabouço legal para o uso energético a partir de RSU no Brasil

ARCABOUÇO LEGAL		DESCRIÇÃO
<b>LEIS</b>	Lei nº 9.427/1996	Cria ANEEL, regulamentada pelo Decreto nº 2.335/1997.
	Lei nº 9.478/1997	Cria ANP, regulamentada pelo Decreto nº 2.455/1998.
	Lei nº 10.848/2004	Dispõe sobre a comercialização de energia elétrica.
	Lei nº 12.305/2010	Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos.
	Lei nº 11.488/2007	O "REIDI" (Regime Especial de Incentivos para o Desenvolvimento da Infraestrutura), exonera o pagamento de PIS/COFINS na importação de maquinário para geração de energia renovável.
	Lei nº 11.196/2005	A "Lei do Bem" cria a concessão de incentivos fiscais às pessoas jurídicas que realizarem pesquisa e desenvolvimento de inovação tecnológica.
<b>DECRETOS</b>	Decreto nº 7.404/2010	Regulamenta a Lei nº 12.305/2010.
	Decreto nº 5.163/2004	Regulamenta a comercialização de energia elétrica, o processo de outorga de concessões e de autorizações de geração de energia elétrica.
	Decreto nº 2.003/1996	Regulamenta a produção de energia elétrica por Produtor Independente e por Autoprodutor.
<b>NOTAS TÉCNICAS</b>	NT EPE nº 13/14/2014	Compõe os estudos do Plano Nacional de Energia 2050 (PNE 2050).
	NT EPE nº 16/2014	Apresenta a análise e identificação dos potenciais econômicos, dos custos das energias e mercados competitivos dos RSU.
	NT EPE nº 18/2014	Analisa as principais questões da disponibilidade e caracterização dos RSU, as condições técnicas para aproveitamento energético e mapeamento do potencial de aproveitamento energético destes.
	NT ANEEL nº 0043/2010	Apresenta os principais instrumentos regulatórios utilizados no Brasil e outros países para a geração distribuída de pequeno porte, a partir de fontes renováveis de energia.
	NT ANP nº 132/2013/-SBQ-RJ	Estas Notas Técnicas têm por objetivo consolidar as informações obtidas pelo Grupo de Trabalho (GT) sobre a regulamentação do biometano.
	NT ANP nº 157/2014/SBQ/RJ	
<b>RESOLUÇÕES ANEEL<sup>1</sup></b>	R ANEEL nº 247/2006	Estabelece as condições para a comercialização de energia elétrica, oriunda de empreendimentos de geração que utilizem fontes primárias incentivadas, com unidade ou conjunto de unidades consumidoras cuja carga seja maior ou igual a 500 kW e dá outras providências.
	R ANEEL nº 271/2007	Estabelece procedimentos com redução das tarifas de uso dos sistemas elétricos de transmissão e de distribuição, para empreendimentos hidrelétricos e aqueles com base em fonte solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, cuja potência injetada seja menor ou igual a 30.000 kW.
	R ANEEL nº 376/2009	Estabelece as condições para contratação de energia elétrica, no âmbito do Sistema Interligado Nacional – SIN, por Consumidor Livre.
	R ANEEL nº 390/2009	Estabelece os requisitos necessários à outorga de autorização para exploração e alteração da capacidade instalada de usinas termelétricas e de outras fontes alternativas de energia, os procedimentos para registro de centrais geradoras com capacidade instalada reduzida e dá outras providências.
	R ANEEL nº 482/2012	Estabelece condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e outras providências.
	R ANEEL nº 687/2015	Altera a Resolução Normativa nº 482/2012, e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição – PRODIST.
<b>RESOLUÇÕES ANP<sup>2</sup></b>	R ANP nº 8/2015	Resolução que estabelece a especificação do biometano, orienta sobre a aplicação e uso do biometano oriundo de produtos e resíduos orgânicos agrossilvopastoris e comerciais destinado ao uso veicular (GNV) e às instalações residenciais e comerciais.
	R ANP nº 21/2016	Resolução que estabelece regras para os agentes envolvidos no uso de combustível experimental e suas misturas com combustíveis ou biocombustíveis especificados.
<b>PORTARIAS</b>	Portaria MME nº 44/2015	Trata da contratação de geração própria de unidade consumidora.

Fonte: Elaboração própria.

(1) Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel).

(2) Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP).

Cabe ressaltar que tais possibilidades não se esgotam nesta seleção, uma vez que o aproveitamento energético a partir da fonte RSU é uma atividade relativamente recente, portanto inserida num mercado em constante modificação.

No caso do Espírito Santo, as possibilidades regulatórias aplicadas aos RSU e à geração de energia em esfera estadual estão resumidas no Quadro 18.

Quadro 18 – Legislação estadual do Espírito Santo aplicada aos RSU *versus* energia

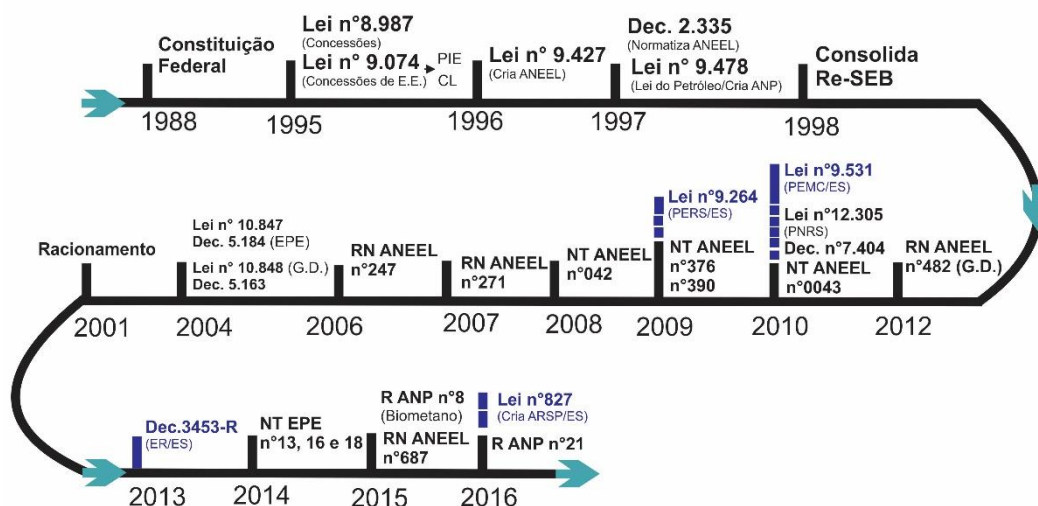
Legislação	Fundamentação
Lei nº 9.264/2009	Institui a Política Estadual de Resíduos Sólidos e dá outras providências correlatas.
Lei nº 9.531/2010	Institui a Política Estadual de Mudanças Climáticas (Pemc)
Lei nº 827/2016	Cria a Agência de Regulação de Serviços Públicos por Lei Complementar, em 1º de julho 2016.
Decreto nº 3.453-R/2013	Dispõe sobre a política estadual de incentivo a energias renováveis - eólica, solar e da biomassa, entre outras fontes renováveis.

Fonte: Elaboração própria.

Apesar da importância da Política Estadual de Resíduos Sólidos e da Pemc, destacou-se neste estudo o Decreto nº 3.453-R/2013, uma vez que está em conformidade com tais políticas e diretamente relacionado ao objeto de estudo.

Do ponto de vista regulatório, os marcos legais selecionados para o biogás de RSU estão expostos na Figura 38, que representa a linha do tempo desse energético em âmbito federal e estadual, com destaque para o estado do Espírito Santo.

Figura 38 – Marcos regulatórios para o biogás de RSU



Fonte: Elaboração própria.

Nota: A cor azul indica marcos do Espírito Santo: PIE (Produtor Independente de Energia); CL (Consumidor Livre); Re-SEB (Reestruturação do Setor Elétrico Brasileiro); EPE (Empresa de Pesquisa Energética); GD (Geração Distribuída); R (Resolução); RN (Resolução Normativa); NT (Nota Técnica).

Ao selecionar o biogás de resíduos como objeto de estudo regulatório para verificar sua viabilização no mercado de energia, fez-se necessário estudar os setores de saneamento, energia elétrica e gás natural, respectivamente apresentados na revisão bibliográfica, uma vez que esses setores estão associados ao biogás de resíduos. A literatura revisada até então permitiu observar que esses setores estão diretamente relacionados com o desenvolvimento econômico do País e com o bem-estar social. Sendo assim, estão configurados como serviços públicos. De modo geral, pode-se dizer que alguns segmentos desses setores estão configurados como “indústria de rede”, em situação de monopólio ou, em outras partes, como concorrenciais. Todos esses setores sofreram importantes mudanças nos últimos anos. Tais modificações foram específicas para permitir a concorrência, a redução de custos, a redução de preços, a ampliação e universalização do serviço, bem como a implantação de melhorias do serviço no que concerne a qualidade, preço e quantidade. A regulação dos setores estudados foi pertinente para se compreender a entrada do biogás e do biometano no Brasil. Assim, cabe apresentar a viabilidade regulatória desse energético no mercado de energia no Brasil.

### **7.2.1 Viabilidade regulatória de comercialização do biogás de RSU**

Na revisão do Capítulo 5, seção 5.3.1, tratou-se das principais formas de regulação econômica, quais sejam, regulação por preço, por quantidade, por controle de entrada e saída de agentes no mercado e por qualidade. Sendo assim, a análise de viabilidade regulatória permeia essas questões de modo a identificar possibilidades de comercialização do biogás de RSU no arcabouço regulatório pesquisado.

### 7.2.1.1 Aproveitamento do biogás de RSU para geração de energia elétrica

No setor energético, percebeu-se que o biogás proveniente de resíduos não é algo tão recente. Conforme mencionado na seção 4.1, o biogás foi integrante do movimento chamado “Revolução Verde”, mas foi preterido, devido a diversos fatores, tais como preços não competitivos, estrutura física de maquinários e desconhecimento técnico. Sua relevância só foi retomada a partir dos anos 2000, quando finalmente passou a ser visto como um combustível utilizável para geração de energia.

Assim, identificou-se que as possibilidades de aproveitamento do biogás de RSU no mercado de energia elétrica podem apresentar-se de quatro formas: 1) venda no mercado livre; 2) autoprodução e/ou produção independente; 3) GD; e 4) leilões. A descrição e a regulação dessas possibilidades são apresentadas no Quadro 19.

No contexto regulatório do setor elétrico, constatou-se que as possibilidades de obtenção de receita com o biogás para geração de energia elétrica, na modalidade integrada ao SIN, podem ocorrer tanto no ACL como no ACR.

No ACL, um dos desafios da regulação pelo preço é fazer com que este seja atraente e menor do que o praticado no ACR. Neste sentido, conforme resumo exposto no Quadro 19, a Resolução Normativa Aneel nº 271/2007 permite a venda no mercado livre, com formalização de contratos bilaterais, com consumidores especiais (entre 0,5 e 3MW) e livres (acima de 3MW), na condição de a usina comprovar a utilização de insumo energético composto de pelo menos 50% de biomassa de RSU e/ou biogás de aterro. Dessa forma, a usina tem o direito de obter 100% de redução nas tarifas de uso dos sistemas elétricos de transmissão e distribuição, a incidirem sobre a produção e o consumo da energia comercializada. Como essa redução é também aplicada a empreendimentos caracterizados como pequena central termelétrica de base biomassa, cuja potência injetada nos sistemas seja de até 30.000kW (regulação pela quantidade), estende-se a todas as macrorregiões delimitadas pelo Programa *Espírito Santo sem Lixão*, na hipótese da existência de uma usina em cada um desses locais. Cabe ressaltar que a proximidade da fonte consumidora pode ser determinante para a implantação e

viabilidade do projeto, uma vez que a distância de tais centros de consumo implica a elevação de custos.

Quadro 19 – Possibilidades de aproveitamento do biogás de RSU para geração de energia elétrica

POSSIBILIDADES DE APROVEITAMENTO DO BIOGÁS DE RSU PARA ENERGIA ELÉTRICA			
	FORMAS	DESCRIÇÃO	REGULAÇÃO
1	<b>VENDA NO MERCADO LIVRE</b>	Comercialização por meio de contratos bilaterais entre as partes envolvidas no ACL.	Resolução Normativa Aneel n° 271/2007 ► Permissão para o estabelecimento de contratos bilaterais com consumidores cuja demanda esteja entre 0,5 e 3MW (considerados como “especiais” ou “livres”, quando acima desse valor). ► Preço Desconto (art. 3°) - direito a 100% de redução, a ser aplicado às tarifas TUSD e TUST, incidindo na produção e no consumo da energia comercializada. ► Condicionante (inciso IV): permissão para utilizar como insumo energético, no mínimo, 50% de biomassa composta de RSU e/ou de biogás de aterro sanitário.
2	<b>AUTOPRODUÇÃO E PRODUÇÃO INDEPENDENTE</b>	Comercialização por meio das figuras APE ou PIE.	Decreto Aneel n° 2.003/1996: ► APE: uso próprio e exclusivo. ► PIE: produção para comercializar por própria conta e risco no ambiente regulado (leilões) ou livre (consumidores especiais e/ou livres). ► Preços APE – ressarcimento do custo de transporte. PIE – pagamento dos custos de transporte. ► Condicionantes (para ambos): autorização da Aneel no caso de usina termelétrica maior que 5MW; comunicação à Aneel no caso de usina termelétrica menor que 5MW.
3	<b>GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E COMPENSAÇÃO</b>	Acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição e compensação de energia elétrica para unidades até 5MW.	Resolução Normativa Aneel n° 482/2012 e Resolução Normativa Aneel n° 687/2015. Quantidade: ► Microgeração Distribuída: central geradora de energia elétrica com potência instalada menor ou igual a 75kW (com fonte alternativa). ► Minigeração Distribuída: central geradora de energia elétrica com potência instalada superior a 75kW e menor ou igual a 5MW (com fonte alternativa).
4	<b>LEILÕES</b>	Realizados pela CCEE por delegação da Aneel. Podem ocorrer centralizados ou por meio de chamada pública (exclusivo para uma Distribuidora). Nesse processo, agentes garantem atendimento à totalidade de seu mercado no ACR.	Decreto Aneel n° 5.163/2004: Condições de entrada: ► Como gerador distribuído: comercialização de energia diretamente com distribuidoras por meio dos <b>leilões anuais de ajuste (LA)</b> . ► Como gerador de energia renovável: comercialização de energia em leilões específicos de compra de energia proveniente de <b>fontes alternativas (LFA)</b> . Preço: limitado ao Valor de Referência (VR) do último leilão.

Fonte: Elaboração própria.



No contexto regulatório do setor elétrico, constatou-se que as possibilidades de obtenção de receita com o biogás para geração de energia elétrica, na modalidade integrada ao SIN, podem ocorrer tanto no Ambiente de Comercialização Livre (ACL) como no Ambiente de Comercialização Regulada (ACR).

No ACL, um dos desafios da regulação pelo preço é fazer com que este seja atraente e menor do que o praticado no ACR. Nesse sentido, conforme resumo exposto no Quadro 19, a Resolução Normativa Aneel nº 271/2007 permite a venda no mercado livre, com formalização de contratos bilaterais, a consumidores especiais (entre 0,5 e 3MW) e livres (acima de 3MW) na condição de a usina comprovar a utilização de insumo energético composto de pelo menos 50% de biomassa de RSU e/ou biogás de aterro. Dessa forma, a usina tem o direito de obter 100% de redução nas tarifas de uso dos sistemas elétricos de transmissão e de distribuição, a incidirem sobre a produção e o consumo da energia comercializada. Como essa redução é também aplicada a empreendimentos caracterizados como pequena central termelétrica de base biomassa, cuja potência injetada nos sistemas seja de até 30.000 kW (regulação pela quantidade), estende-se a todas as macrorregiões delimitadas pelo Programa *Espírito Santo sem Lixão*, na hipótese da existência de uma usina em cada um desses locais.

Na pesquisa realizada nas UTEs, levantaram-se questões sobre os objetivos da produção de energia, ou seja, sobre qual seria o objetivo principal da atividade que praticavam. Constatou-se que 100% delas produzem energia elétrica para venda no mercado livre, conforme exposto na Tabela 29.

Tabela 29 - Objetivos da produção de energia nas UTEs de RSU

<b>Principais objetivos</b>		
Injetar energia elétrica na rede	2	40%
Vender energia elétrica no mercado livre	5	100%
Vender energia elétrica no mercado regulado	1	20%
Produzir energia elétrica para autoconsumo	1	20%
Vender Certificados de Emissão Reduzida	1	20%
Abastecer grandes e médias empresas interligadas ao SIN	0	0%
Outros	0	0%
<b>Total de UTEs*</b>	<b>5</b>	<b>100%</b>

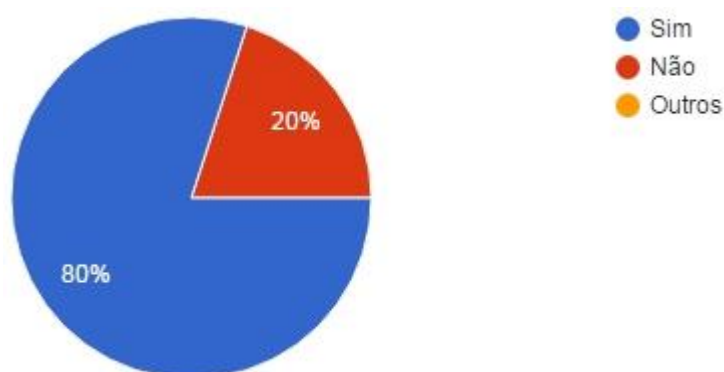
Fonte Elaboração própria.

(\*) As UTEs que responderam ao questionário poderiam escolher mais de um item.

A venda de energia elétrica no mercado livre admite maior flexibilidade de comercialização porque ocorre por meio de contratos bilaterais entre as partes envolvidas. Essa opção é vantajosa para as usinas porque propicia descontos de TUST e TUSD, que incidem diretamente sobre a produção e o consumo da energia comercializada, o que justifica o maior interesse das UTEs por essa forma de comercialização.

Também se perguntou às UTEs se eram beneficiadas com algum tipo de incentivo para a produção de energia com o biogás de RSU. A respeito desse quesito, 80% responderam positivamente, conforme visualizado na Figura 39.

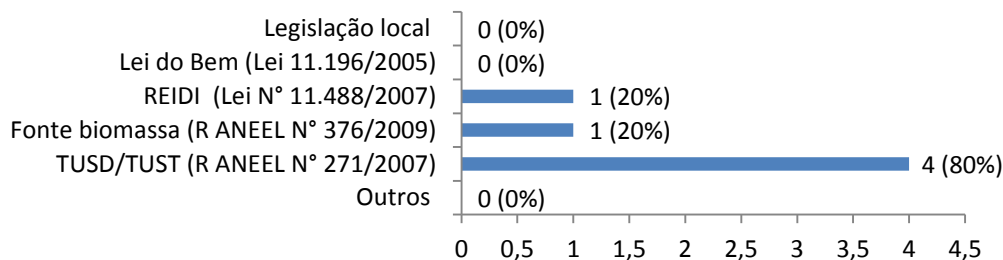
Figura 39 – UTEs de RSU beneficiadas com incentivo



Fonte: Elaboração própria.

A questão seguinte buscou identificar qual o tipo de incentivo ou benefício financeiro recebido, no caso de a resposta anterior ser positiva. Os resultados indicaram que pelo menos 80% das usinas eram beneficiadas com a redução das tarifas TUST/TUSD (Resolução Aneel nº 271/2007), conforme apresentado no Gráfico 5. Dentro desse percentual (80%), além desse benefício, uma UTE respondeu que também era beneficiada com o Regime Especial de Incentivos para o Desenvolvimento da Infraestrutura (REIDI) e com a comercialização com fonte incentivada, nesse caso pelo uso da biomassa de RSU (Resolução Aneel nº 376/2009). Uma UTE respondeu não ser contemplada com nenhum dos benefícios mencionados. Esses resultados podem ser visualizados no Gráfico 5.

Gráfico 5 – Incentivos obtidos pelas UTEs de RSU



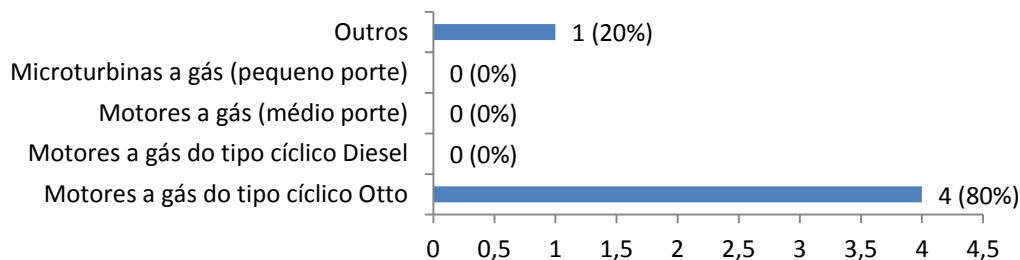
Fonte: Elaboração própria.

Cabe ressaltar que o REIDI é um importante incentivo fiscal, concedido pela Lei nº 11.488/2007, que talvez justifique o surgimento recente das usinas que operam com o biogás de RSU no Brasil. Esse incentivo exonera o pagamento de PIS/COFINS na importação de máquinas para geração de energia renovável. É um incentivo interessante, uma vez que uma das maiores dificuldades para a implantação de empreendimentos desse tipo é o alto investimento em maquinário. No entanto, esse benefício só é concedido inicialmente, antes de a usina entrar em operação.

Por outro lado, no ACR, a regulação pela quantidade aponta que o biogás de RSU precisa alcançar elevado volume de produção para concorrer com outros segmentos em leilões, como o segmento de cana-de-açúcar, por exemplo. A Nota Técnica EPE DEA nº 16/2014 indica inviabilidade da participação do biogás de RSU em leilões. Embora os resultados obtidos neste estudo, quando comparados com os praticados nos leilões do setor elétrico (R\$125/MWh – preço médio do 1.º leilão A-5 de 2013), tenham demonstrado inviabilidade de disputa nessa seara, a disponibilidade de financiamentos e a redução de custos, seja por políticas de incentivo, seja por readequação dos valores dos equipamentos e tecnologia, podem melhorar a competitividade dos projetos.

Relativo à tecnologia, na pesquisa realizada com as UTEs, 80% das usinas que responderam ao questionário informaram utilizar motores a gás do tipo ciclo Otto, conforme verificado no Gráfico 6.

Gráfico 6 – Tipo de tecnologia utilizada para conversão do biogás nas UTEs de RSU



Fonte: Elaboração própria.

Nota: Em Outros, a usina mencionou a utilização de “Motores a biogás GE Jenbacher J 420”.

O resultado apresentado no Gráfico 6 vem confirmar os encontrados na revisão bibliográfica apresentada, uma vez que indicou ser a opção mais adotada devido ao baixo custo, à facilidade de operação e manutenção e à eficiência, segundo mencionado por Pavan (2010) e Mendes (2005).

Ainda no ACR, também é possível o estabelecimento de contratos com as distribuidoras de energia por meio da GD. Nesse caso, a comercialização direta com as distribuidoras ocorre por leilões anuais de ajuste, cuja contratação poderá durar até dois anos, com possibilidade de repasse integral de preços às tarifas limitados ao Valor de Referência (VR) do último leilão de energia ocorrido, em conformidade com o Decreto nº 5.163/2004.

Ainda nesse ambiente, um possível desafio inerente à regulação pelo preço seria o VR, ou seja, o limite a ser pago pelas distribuidoras de energia elétrica, o qual, dependendo do valor, pode inviabilizar alguns projetos. Tal situação está mais associada à questão econômica, por isso, com relação a esse quesito, cabe reforçar a necessidade de estudos de viabilidade não contemplados nesta pesquisa.

Como produção de energia a partir de fonte renovável, é possível ainda a comercialização no ACR por meio dos leilões específicos de compra de energia proveniente de fontes alternativas, com contratação por período de dez a trinta anos e possibilidade de repasse de preços das tarifas de forma integral, conforme Decreto nº 5.163/2004 já mencionado.

Outra possibilidade apresentada no setor de energia elétrica é a de produção para autoconsumo, uma opção complementar ao sistema de compensação de energia

conhecido como *net metering* de GD, conforme apresentado nas Resoluções Aneel nº 482/2015 e nº 687/2015. É importante enfatizar que esse sistema não é caracterizado como uma forma de comercialização, uma vez que não existe venda de mercadoria, tampouco um valor financeiro agregado à energia injetada, e sim um balanço de energia em kWh correspondente a uma troca de energia. Conforme apresentado na revisão de literatura, nesse sistema, a rede funciona como uma bateria que possibilita uma conta mensal resumida ao cálculo sobre a diferença entre consumo e geração. Esse sistema pode beneficiar indústrias e comércios de grande porte (*shoppings*, agências, entre outros), que tenham várias unidades consumidoras que se enquadram, por exemplo, na categoria de consumidores livres ou especiais, bem como de grupos de residências.

Porém, o desafio que essa alternativa apresenta é vencer algumas dificuldades relativas a tributação, impostos, dúvidas sobre perdas de energia e contratos realizados com as distribuidoras. Nesse cenário, o Espírito Santo está envolvido em recentes discussões referentes à não aderência ao Convênio ICMS nº 16/2015 do CONFAZ. Relativo a esse assunto, cabe tratá-lo com mais ênfase na sequência, já que a região é objeto deste estudo.

#### 7.2.1.2 Possibilidades de comercialização de energia elétrica no Espírito Santo

Embora em Nota Técnica ASPE DT nº 015/2015 a agência reguladora local<sup>72</sup> indique a importância da adesão do Espírito Santo ao Convênio ICMS nº 16/2015 do CONFAZ, o Estado permanece afastado. Com a adesão, considera-se a isenção do ICMS em parte da energia (injetada e utilizada posteriormente) dos microgeradores, o que poderia representar maior incentivo ao crescimento desse mercado no local, uma vez que já é um sistema consolidado em vários países, como, por exemplo, na Alemanha, mas somente permitido no Brasil a partir de 2012 (AGÊNCIA DE SERVIÇOS PÚBLICOS DE ENERGIA DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO, 2015).

---

<sup>72</sup> Necessário reforçar que a ASPE tornou-se a ARSP, criada recentemente pela Lei Complementar nº 827/2016.

A Nota Técnica acrescenta ainda que a isenção do ICMS sobre a energia injetada é recomendada por um período de cinco anos, a partir da adesão da unidade consumidora à microgeração. Com essa iniciativa, o Estado pode conceder maiores incentivos às energias renováveis, com perspectivas de atrair a cadeia produtiva de energia e novos serviços, visando atender a demanda por equipamentos, tais como sua instalação e manutenção, além de promover o desenvolvimento da micro e da minigeração no Espírito Santo (AGÊNCIA DE SERVIÇOS PÚBLICOS DE ENERGIA DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO, 2015). Todavia, até o mês de janeiro de 2017, o Estado não fazia parte desse contexto, o que pode reduzir a inserção de empreendimentos locais do tipo.

No caso do Espírito Santo, os limites de potência instalada estabelecidos na Resolução Aneel nº 687/2015 (até 75kW para microgeração distribuída e, quando superior, até 5MW para minigeração distribuída), se comparados com os das escalas encontradas no resultado técnico deste trabalho referente às regiões do Programa *Espírito Santo sem Lixão*, apontam para aproveitamento desse energético por meio de centrais geradoras operando em condição de minigeração distribuída. A Região Metropolitana tende a modificar esse enquadramento regulatório a partir do ano 2023, quando alcançará escala suficiente para sair dessa condição. Assim, poderá passar, por exemplo, para a condição de PIE, com usina termelétrica superior a 5MW. Todavia, o acesso aos sistemas elétricos ocorre mediante pagamento dos custos de transporte, o que também revela a necessidade de estudos de viabilidade econômica para esse fim, e de outros custos. Nessa condição, usinas termelétricas com potencial maior que 5MW precisam apenas de autorização (não onerosa) da Aneel para operar, enquanto usinas com potencial abaixo de 5MW devem somente fazer uma comunicação à reguladora.

Nesse quesito, a comercialização de que trata a Resolução Normativa Aneel nº 376/2009 refere-se à contratação de energia elétrica por consumidor livre. De acordo com a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (2016), os consumidores livres têm demanda igual ou superior a 3.000kW e compram energia diretamente dos geradores ou comercializadores por meio de contratos bilaterais, em condições livremente negociadas (preço, prazo, volume, entre outras). Já o consumidor especial precisa ter uma demanda contratada entre 500kW e 3.000kW e, ao migrar para o mercado livre, só poderá comprar energia de fontes incentivadas, proveniente

de PCHs, usinas a biomassa, eólicas, solares ou a biogás. Como benefício, esse consumidor terá 50% de desconto na TUSD, que, em alguns casos, representa um valor significativo na tarifa.

Ainda no contexto de energia elétrica, porém saindo da modalidade integrada ao SIN, cabe reforçar a opção de produzir eletricidade de forma isolada, adequada às condições locais. Nesse quesito, a biomassa de resíduos desempenha um papel essencial, já que dessa forma é possível produzir energia de forma descentralizada e próxima de centros consumidores, beneficiando comunidades isoladas em locais onde antes não havia energia elétrica. A esse respeito, existem diversos exemplos no Brasil, que fogem, porém, ao objeto deste estudo, por isso não foram aqui enfatizados. Esta escolha é justificada porque o Espírito Santo faz parte do SIN, ou seja, não está caracterizado em sistemas isolados.

A conversão do biogás de aterro em eletricidade pode ser uma política de gestão atraente e viável em termos de economia de energia, com contribuição sanitária e ambiental. Assim, a produção de energia pode ser considerada não somente para cobrir as supostas unidades de consumos de biogás, mas também para prover energia suficiente à rede.

#### 7.2.1.3 Aproveitamento do biogás de RSU como gás natural

As possibilidades de comercialização do biogás de RSU no mercado de gás natural podem ocorrer de três formas: (1) injeção na rede de gás (limitada ao uso experimental e industrial), (2) uso dedicado, (3) autoprodução. A descrição e a regulação dessas possibilidades são apresentadas no Quadro 20.

Quadro 20 – Possibilidades de aproveitamento do biogás de RSU como gás natural

POSSIBILIDADES DE USO DO BIOGÁS DE RSU COMO GÁS NATURAL			
FORMAS	DESCRIÇÃO	REGULAÇÃO	
1	INJEÇÃO NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE GÁS NATURAL	Biogás de RSU não liberado para uso como gás natural pela ANP, embora previsto em legislação anterior no Espírito Santo.	Resolução ANP nº 8/2015 Art. 5º. O biometano que atenda à especificação estabelecida no Regulamento Técnico, parte integrante desta Resolução, poderá ser misturado ao gás natural. § 1º. <b>Não se aplica o disposto no caput ao biometano oriundo de resíduos sólidos urbanos</b> ou resíduos de esgotamento sanitário.
		Biogás de RSU limitado a uso experimental e industrial.	Resolução ANP nº 21/2016 ► Condicionantes: Art. 1º. Fica sujeita à autorização prévia da ANP a utilização de Combustíveis Experimentais em todo o território nacional. § 1º. Fica dispensada a autorização de que trata o caput caso o consumo mensal por usuário seja inferior a 10m³ para combustíveis líquidos e 10.000m³ (a 20°C e 1 atm) para combustíveis gasosos. Art. 5º. Fica dispensada a autorização de que trata o art. 1º para utilização de biometano oriundo de resíduos sólidos urbanos e de estação de tratamento de esgoto em Equipamentos de Uso Industrial.
2	USO DEDICADO	Uso exclusivo para uma instituição.	Acordo direto com o consumidor. No caso do Espírito Santo, tal uso deve obedecer ao disposto na Resolução ASPE nº 004/2011 para os seguintes consumidores: ► XVI. Consumidor cativo: o consumidor residencial e o consumidor de gás natural, cujo consumo é inferior a 35.000m³/dia em um único endereço ou em um único ponto de entrega. ► XVII. Consumidor livre: consumidor de gás natural, com volume de consumo igual ou superior a 35.000m³/dia em um único ponto de entrega, que exerceu a opção de adquirir o gás natural de qualquer agente produtor, importador ou comercializador.
3	AUTOPRODUTOR	Uso exclusivo para consumo próprio.	Resolução Aspe nº 004/2011 ► IV. Autoprodutor: sociedade ou consórcio explorador e produtor de gás natural, que utiliza parte ou a totalidade de sua produção como matéria-prima ou combustível em suas instalações. Resolução ANP nº 21/2016 ► Como combustível veicular ou em equipamentos residenciais e comerciais em frotas cativas deve obedecer ao disposto nesta Resolução.

Fonte: Elaboração própria.



Conforme explicitado na seção 5.7.2, considerando o uso do biogás como um biocombustível, a ANP permite sua utilização como combustível veicular, bem como sua mistura e injeção na rede de distribuição de gás natural. Para tal, por meio da regulação pela qualidade, elaborou a Resolução ANP n° 8/2015 que trata das especificações do biometano.

Contudo, antes da aprovação dessa Resolução, era consenso entre os empresários e demais agentes do setor que a Resolução ANP n° 16/2008, que trata das propriedades físico-químicas do gás natural, seria suficiente para legalizar a injeção do biometano na rede de distribuição de gás natural bem como regular o seu uso como combustível veicular. No entanto, isso não ocorreu, e as especificações da regulamentação pela qualidade excluíram o biometano produzido em aterros sanitários devido à presença dos contaminantes, como já mencionado (AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS, 2013).

[...]

Art. 5°. 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 (AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS, 2015).

Assim, caracteriza-se como um grande desafio atual o esclarecimento das possibilidades técnicas de remoção dos contaminantes contidos no biometano de RSU, além da busca de consenso por parâmetros de qualidade aplicáveis a esse combustível no Brasil. Nesse quesito, o País ainda depende de tecnologias estrangeiras.

Soma-se a esse cenário a exigência da ANP quanto ao teor mínimo de CH<sub>4</sub> contido no biometano, cuja porcentagem deve ser de 96,5% (para todas as regiões nacionais, exceto para a Região Norte), o que eleva o padrão de qualidade do gás, embora demande elevados investimentos para sua purificação, que poderão inviabilizar financeiramente projetos com o biogás de RSU.

Para o caso de injeção de biometano na rede de gás natural, existe a necessidade de um exigente processo de purificação do biogás para retirada de contaminantes (siloxano, sílica ou silicatos, cálcio, enxofre, zinco, fósforo, entre outros), o que gera custos elevados. Soma-se a isso a variação da composição do biogás de RSU em

certos períodos de tempo, que dificulta seu controle e padronização, interferindo no atendimento às exigências da ANP. Esta, por sua vez, estabelece restrições ao seu uso comercial, embora permita seu uso experimental e industrial, conforme mencionado.

Com relação à rede gasífera, cabe mencionar a limitada extensão da malha dutoviária no Brasil. Grande parte da malha de dutos concentra-se na região litorânea, tornando inacessível o uso dessa fonte de combustível a grande parte do território nacional, especialmente às áreas agrícolas, onde estão concentrados os potenciais de biogás derivados de resíduos agrossilvopastoris já permitidos pela ANP. No que tange ao GNV, cabe mencionar também que o País não conta com uma extensa rede de abastecimento, o que dificulta a oferta. Uma das soluções para essa questão seria a produção de forma descentralizada, semelhante à da área de energia elétrica, para autoconsumo ou para atendimento próximo a centros de consumo.

Na pesquisa realizada com as UTEs, quando as questões versaram sobre a produção de combustível veicular, 100% de seus representantes responderam não realizar esse tipo de aproveitamento. Esse resultado indica que há maior interesse na produção elétrica. Tal escolha pode estar associada a decisões de viabilidade econômica, uma vez que a produção de combustível exige maiores investimentos na purificação do gás, além de investimentos em infraestrutura e logística de distribuição para a comercialização desse energético. Soma-se a esse cenário a questão de o desenvolvimento tecnológico para aplicação desse gás em veículos pesados, por exemplo, ser algo recente, resultante do *boom* do *shale gas* nos EUA, país que dispõe de expressiva malha dutoviária. Esse fato, inclusive, levou as montadoras desse país a investir nessa solução para combustível abundante e barato. Assim também ocorreu em países da Europa, por conta do biometano na Suécia, França, Alemanha, UK e Áustria. No Brasil, esse tipo de aproveitamento aconteceu na década de 1980, conforme já mencionado.

#### 7.2.1.4 Possibilidades de comercialização de gás no Espírito Santo

Com relação ao estado do Espírito Santo, apresentou-se na Tabela 25 a estimativa da geração acumulada de CH<sub>4</sub>, no período de 2016 a 2035 (1.494.667.613,96m<sup>3</sup>/ano), que pode ser injetado em gasodutos ou comprimido para uso automotivo. Se visualizado somente o ano 2016, esse potencial chega a 205.205,37m<sup>3</sup>/dia e tem possibilidade, conforme identificado e resumido no Quadro 20, de inserção no mercado, por meio de injeção na rede de gás, para uso industrial, dedicado e autoprodução.

No caso do Espírito Santo, embora o Decreto ARSP nº 3.453-R/2013 permita à distribuidora comprar o biometano para ser inserido no gás natural canalizado, ocorre limitação quanto a obedecer à regulamentação vigente da ANP. Assim, só é permitido o uso do biogás de RSU de forma industrial, o que pode ocorrer por meio de operações dedicadas, de forma independente das linhas principais de gás natural. No entanto, tal opção fica sujeita à verificação da existência de um mercado consumidor para esse energético nas proximidades de cada região, bem como a estudo de viabilidade econômica.

Segundo a Resolução ASPE nº 004/2011, a venda de gás natural para consumidor livre requer um volume de consumo igual ou superior a 35.000m<sup>3</sup>/dia em um único ponto de entrega. Com relação a esse aspecto, a escala encontrada nesta pesquisa permitiu identificar a possibilidade de atendimento a pelo menos quatro consumidores livres, com uma margem de reserva para cobrir sazonalidades.

Como as opções mencionadas ainda estão sujeitas a determinadas dificuldades regulatórias, principalmente relativas às esferas de competências, além de a questões referentes à padronização do gás natural, conforme já apresentado na revisão bibliográfica, uma opção interessante seria a produção para consumo próprio e para abastecimento de frotas cativas, como os veículos que atendem o aterro.

Conforme apresentado no Quadro 20, a reguladora local, por meio da Resolução nº 004/2011, considera como autoprodutor a sociedade ou o consórcio explorador e produtor de gás natural que usa parte ou o total de sua produção como matéria-prima ou combustível em suas próprias instalações. Essa opção, inclusive, está

sendo avaliada pela administração do aterro sanitário da Marca Ambiental, segundo informações de Coelho (2015)<sup>73</sup>.

## 8 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Do ponto de vista do planejamento setorial relacionado à gestão dos RSU, a criação da PNRS, por meio da Lei nº 12.305/2010, foi extremamente importante para gerar iniciativas no setor, resultando em leis estaduais que poderão contribuir para aumentar a participação dos RSU como fonte alternativa de energia renovável na matriz elétrica brasileira. Todavia, conforme pontuado por Galvão Jr., Monteiro e Melo (2013, p. 15), embora se considere a implementação de leis federais para disciplinar o saneamento básico e os resíduos sólidos, ainda se constata “[...] patente incipiência do modelo regulatório para essa componente do saneamento básico, carecendo da elaboração de instrumentos legais de regulação para a adequada prestação do serviço público”. Nesse contexto, torna-se evidente a necessidade de integração entre órgãos da esfera municipal, estadual e federal. Quanto a esta última esfera, a criação da PNRS revelou a necessidade de um olhar mais preciso para o aproveitamento energético dos RSU, especialmente para o biogás oriundo dessa fonte.

De forma geral, apesar de incipiente e ainda carecer de regulação mais direcionada para o biogás de RSU, observa-se que já existe um movimento de incentivo ao uso dessa fonte no Brasil. Nos setores de pesquisa, é possível mencionar alguns projetos, tais como o Probiogás, desenvolvido pelo Ministério das Cidades em cooperação com a agência alemã de cooperação internacional para o desenvolvimento sustentável - *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit* (GIZ); o CIBiogás, instituição científica, tecnológica e de inovação em energias renováveis, com ênfase no biogás; o projeto Biogásfert, coordenado

---

<sup>73</sup> Esta forma de uso do biogás de RSU já ocorre no Rio de Janeiro. No ano de 2013, o aterro de Gramacho passou a ser o único fornecedor de biogás do mundo para uma refinaria de petróleo. O biogás que sai do aterro é conduzido até uma estação de tratamento para a retirada de impurezas. Em seguida, passa por um gasoduto de seis quilômetros de extensão até chegar à refinaria Duque de Caxias. O volume de biogás bombeado por dia equivale a 10% do consumo da refinaria (TRIGUEIRO, 2013).

pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa). Além desses projetos, a comunidade acadêmica tem diversos grupos de pesquisa sobre o assunto vinculados ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq)<sup>74</sup>.

No âmbito regulatório, o biogás e o biometano foram inseridos no planejamento setorial da Aneel, resultando na criação de regulações importantes, como a Resolução Normativa Aneel nº 482/2012, complementada pela Resolução Normativa Aneel nº 687/2015, permitindo assim a abertura do mercado para o consumo de energia elétrica, conforme já apresentado. A Resolução nº 482/2012 favoreceu a geração de energia elétrica próxima ao local de consumo ou na própria instalação consumidora, denominada geração distribuída. Conforme foi discutido, esse tipo de geração pode trazer muitas vantagens em relação à geração centralizada tradicional, como, por exemplo, economia dos investimentos em redes de transmissão, redução das perdas nessas redes e melhoria da qualidade do serviço de energia elétrica.

Além disso, a Aneel também estimulou o desenvolvimento de projetos de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) voltados à injeção de eletricidade proveniente do biogás e do biometano na rede de energia, por meio da Chamada P&D Estratégico nº 14/2012. De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (2012c), oitenta empresas responderam a essa Chamada, das quais 68 demonstraram interesse no assunto. Ainda com relação a esse panorama, por intermédio do MME, a Agência também incluiu o biogás entre as fontes renováveis de energia de reserva para o ano de 2017 no Leilão A-3.

Em sequência a esse cenário, a EPE inseriu o biogás no PNE 2050, e, por meio de notas técnicas, tais como as Notas Técnicas EPE DEAs nº 15 a 18, de 2014, orienta as aplicações desse gás. Em complementação, o MME estabeleceu com a Portaria

---

<sup>74</sup> UFPE – Geotecnia Ambiental aplicada a aterro sanitário (2012); Procad – Mecanismos de desenvolvimento limpo (MDL) aplicados a aterros sanitários (2011); Pronex – Redução dos gases de efeito estufa através do aproveitamento do biogás proveniente de aterros (2010); Faperj/Fapesp – Utilização do hidrogênio produzido por reforma do biogás proveniente de resíduos urbanos para a geração de energia (2014); Ufes – Caracterização dos compostos traços influentes no aproveitamento energético do biogás gerado em reator UASB no tratamento de esgoto doméstico (2013).

nº 44/2015 oportunidades importantes para geração de energia elétrica com microgeradores por biogás e biometano.

Nesse contexto, identificou-se também a Lei nº 11.196/2005, denominada Lei do Bem, que confere incentivos fiscais às pessoas jurídicas que realizam pesquisa e desenvolvimento em inovação tecnológica. Embasado nessa Lei, o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) utiliza-se desse mecanismo para incentivar investimentos em inovação por parte do setor privado. Assim, objetiva aproximar as empresas das universidades e institutos de pesquisa, potencializando os resultados em P&D.

Todos esses movimentos regulatórios confirmam um ambiente favorável ao reaproveitamento do biogás no País. Sendo assim, a presente pesquisa aprofundou-se nas questões regulatórias dos setores de energia elétrica e gás natural no Brasil a fim de elucidar o conhecimento do objeto de estudo e, dessa forma, aproximar tais conhecimentos da realidade do Espírito Santo.

No caso da geração de energia elétrica no Brasil, as alternativas regulatórias para a inserção desse energético são direcionadas para comercialização livre, autoprodução, venda como gerador distribuído a concessionária de distribuição de energia elétrica e, mais recentemente, para a possibilidade de minigeração no sistema de compensação de energia elétrica.

No caso do Espírito Santo, cuja escala de potência instalada alcança o máximo de 10.554,95kW (10,55MW) na Região 4 (Metropolitana) no ano 2035, constata-se a possibilidade de implementação de uma central geradora de minigeração distribuída (máximo 5MW) até o ano de 2021, cuja extensão pode ser possível em cada uma das regiões abrangidas pelo Programa *Espírito Santo sem Lixão*, no âmbito da Resolução Normativa Aneel nº687/2015. Nesse possível cenário, a usina poderia operar na categoria registro (REG), semelhante à maior parte das usinas atualmente em operação no Brasil. A partir de 2022, quando a Região 4 atingir escala superior (5,07MW), deverá então solicitar autorização da Aneel para operar como usina termelétrica na categoria PIE, com possibilidade de comercializar energia elétrica por sua própria conta em ambiente tanto regulado, por meio de leilões, como livre, com consumidores especiais ou livres.

Complementa-se que, mesmo que o menor valor alcançado para o potencial de geração de energia elétrica da Região 5 no ano de 2016 tenha sido 1.005,70MWh (ver Tabela 26), correspondente a 83.808,33kWh/mês, ainda assim seria possível abastecer 558 residências, se considerado um consumo residencial de 150 kWh/mês. Logo, trata-se de um potencial interessante, uma vez que pode representar benefício econômico para a região. Nos municípios menores, onde essa escala menor dificulta a aplicação desse tipo de tecnologia em aterros, pode-se pensar em consórcios (de regiões próximas) e em sistemas de separação da matéria orgânica, de modo a aproveitá-la em sistemas de compostagem, assim como de codigestão com substratos de origem rural, tais como esterco de animais confinados, palhas agrícolas e resíduos agroindustriais. Essa forma de aproveitamento deve ser incentivada por meio de linhas de financiamento, como a do Fundo Clima do BNDES e de outras já mencionadas neste trabalho.

Para o biometano, a injeção na rede de gás natural depende da localização do empreendimento e da eficiência nos investimentos para atender exigências da ANP nos quesitos de regulação pela qualidade. Assim, a injeção, na rede, desse gás, oriundo de aterros, ainda não está autorizada, e sua aplicação ainda está condicionada a uso experimental e industrial. No entanto, nessa seara, é possível o uso dedicado, exclusivo para uma instituição, semelhante à situação da REDUC no Rio de Janeiro. Para tal, no caso do Espírito Santo, necessita-se de mercado consumidor nas formas da Resolução ASPE nº 004/2011. Outra possibilidade verificada foi a autoprodução, que permite atender frotas cativas, como os veículos utilizados para a coleta municipal de RSU. Nesse aspecto, a possível economia com a substituição do diesel nessas frotas, por exemplo, poderá reduzir custos com a coleta de lixo.

Para todas as possibilidades mencionadas, faz-se indispensável um estudo de viabilidade econômica que venha a contemplar todos os parâmetros necessários para uma decisão de investimento, o que não foi abordado neste trabalho, representando uma limitação desta pesquisa. Sugere-se que seja incluído em estudos futuros.

De forma geral, a recuperação energética dos resíduos precisa de um olhar multidimensional, que deve abranger não só o tratamento adequado desses resíduos, mas também a energia potencial disponível em cada região, a redução de

emissões de poluentes e diversos benefícios sociais, caracterizando-se como uma solução de transformação socioambiental da realidade de tratamento de resíduos no Brasil. Além disso, é preciso que as políticas atentem para o setor de biogás, assim como ocorreu com outras fontes (biodiesel e etanol), que deve abranger desde a regulamentação até a criação de incentivos para o setor.

No contexto estadual, diante do arcabouço legal de que dispõe o estado do Espírito Santo, embasado nas leis e decretos apresentados, cujo incentivo às atividades de recuperação do biogás, do biometano e de gestão dos resíduos é evidente no Decreto nº 3453-R/2013, questiona-se o motivo de a região ainda não dispor de uma usina que utilize os RSU para fins energéticos. Pontua-se que esse fato pode estar associado à dificuldade de articulação entre órgãos federais, estaduais, municipais e da iniciativa privada. Nesse sentido, a presença de um ente regulador do setor de resíduos seria essencial para ativar o entrosamento entre os órgãos mencionados, além de corroborar para ampliar a segurança de possíveis investidores, disseminar conhecimentos da área e promover o uso eficaz dos RSU.

Quanto ao aspecto de melhoria, é inegável que uma agência própria de regulação para o setor também pode contribuir para uma prestação mais adequada e eficiente do serviço de limpeza pública. Entre os motivos que justificam a implantação da regulação no setor, decorrentes das falhas de mercado inerentes às atividades da área, podem-se mencionar as características de monopólio, a caracterização como bens e serviços públicos, a apresentação de externalidades e a assimetria de informações. Tais falhas são perceptíveis no setor, o que sugere a necessidade de regulação específica.

Entre as limitações identificadas durante a elaboração deste estudo, mencionou-se a ausência de dados que indicassem a exata composição gravimétrica dos resíduos sólidos nos municípios capixabas, como indicado na seção 6.4. Por isso, ressalta-se a importância da realização de um estudo de caracterização gravimétrica dos municípios, bem como da implantação de um sistema eficiente de gerenciamento de resíduos sólidos municipais. De fato, uma gestão eficiente de RSU poderia contribuir para gerar resultados mais precisos e próximos da realidade da região. Em relação à projeção populacional, a projeção de dados censitários futuros pode contribuir para reduzir os desvios observados.



Ainda no contexto de limitações, cabe ressaltar que o estudo econômico, cuja importância também é essencial para confirmar a viabilidade de empreendimentos com uso do biogás de aterros, não foi incluído nesta pesquisa. Tal estudo deve abranger a viabilidade de um mercado de energia bem como uma análise mais aprofundada sobre o custo de projetos, preços de comercialização, tarifas e fontes de receita.

Embora a PNRS indique o aterro sanitário como última opção de tratamento na hierarquia de gestão dos resíduos, na prática ainda se observa que o aterramento de RSU permanece como principal opção de tratamento no Brasil. Embora esse fato indique que o fornecimento de energia com essa fonte ainda se estenderá por um longo período de tempo, não é algo permanente. Assim, o aproveitamento do biogás de aterro é coerente e necessário, mas projetar uma garantia de oferta desse gás é conflitante com a PNRS, uma vez que o aterro é somente o destino dos rejeitos.

Nesse panorama, esta pesquisa procurou contribuir para o avanço do conhecimento relativo às principais questões técnicas e regulatórias que permeiam o aproveitamento do biogás de RSU no Brasil e no Espírito Santo. A análise da revisão bibliográfica permitiu observar que o aproveitamento desse energético tem sido promovido no Brasil, especialmente no sentido de formulação de políticas públicas.

A esse respeito, para a formulação de políticas públicas, o Brasil pode manter uma atuação semelhante à dos países mencionados na seção 5.6.2 e expostos na Figura 22, uma vez que quase todos os países verificados aplicam algum tipo de incentivo fiscal ou financeiro. Outros tipos de incentivos fiscais e econômicos podem ser aplicados também em âmbito estadual, embasados no investimento inicial do empreendimento e/ou em sua vida útil. São políticas que podem favorecer tanto o gerador como os demais agentes do setor e devem ser estimuladas.

Desse ponto de vista, o biogás de RSU deve ser inserido no contexto de mitigação de mudanças climáticas, renovabilidade da matriz energética, oferta de energia e melhoria de ações sanitárias. Nesses aspectos, este estudo contribuiu para reforçar a necessidade de valorização dos RSU, os quais têm capacidade energética e, assim, potencial a ser explorado, especialmente no Espírito Santo.

## REFERÊNCIAS

ABICHOU, T.; KORMI, T.; YUAN, L.; JOHNSON, T.; FRANCISCO, E. Modeling the effects of vegetation on methane oxidation and emissions through soil landfill final covers across different climates. **Waste Management**, n. 36, p. 230-240, 2015.

ABREU, F. V. **Análise de viabilidade técnica e econômica da geração de energia através do biogás de lixo em aterros sanitários**. 2009. 179 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **Biogás: economia, regulação e sustentabilidade**. Rio de Janeiro: Interciência, 2014.

ABREU, F. V.; AVELINO, M. R.; MONÂCO, D. P. Estudo técnico, econômico e ambiental da geração de energia através do biogás de lixo - o caso do aterro sanitário de Gramacho. **Cadernos Unifoa**, Rio de Janeiro, n. 16, p. 37-43, 2011.

AGÊNCIA DE SERVIÇOS PÚBLICOS DE ENERGIA DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO. **Atlas de bioenergia do Espírito Santo**. Vitória, 2013.

\_\_\_\_\_. **Nota técnica ASPE DT 015 - avaliação da adesão ao convênio Confaz 16/2015**. Vitória, 2015.

\_\_\_\_\_. **Balço energético do estado do Espírito Santo 2016: ano base 2015**. Vitória, 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução nº 271, de 3 de julho de 2007**. Brasília, 2007. Disponível em: <<https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=106613>>. Acesso em: 20 jan. 2016.

\_\_\_\_\_. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3. ed. Brasília, 2008. Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/livro\\_atlas.pdf](http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/livro_atlas.pdf)>. Acesso em: 3 abr. 2016.

\_\_\_\_\_. **Nota técnica nº 0043, de 8 de setembro de 2010**. Brasília, 2010. Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/consulta\\_publica/documentos/Nota%20T%C3%A9cnica\\_0043\\_GD\\_SRD.pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/consulta_publica/documentos/Nota%20T%C3%A9cnica_0043_GD_SRD.pdf)>. Acesso em: 20 jan. 2016.

\_\_\_\_\_. **Resolução normativa nº 82, de 4 de abril de 2012**. Brasília 2012a. Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2012/021/documento/nota\\_tecnica\\_0082\\_bruno\\_celtins.pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2012/021/documento/nota_tecnica_0082_bruno_celtins.pdf)>. Acesso em: 10 maio 2016.

\_\_\_\_\_. **Resolução normativa nº 482, de 17 de abril de 2012**. Brasília, 2012b. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/bren2012482.pdf>>. Acesso em: 10 maio 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Oitenta empresas interessadas em projetos de P&D sobre biogás**. Brasília, 2012c. Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias/Output\\_Noticias.cfm?Identidade=5928&id\\_area=90](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias/Output_Noticias.cfm?Identidade=5928&id_area=90)>. Acesso em: 10 jun. 2016.

\_\_\_\_\_. **Resolução normativa nº 517, de 11 de dezembro de 2012**. Brasília, 2012d. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012517.pdf>>. Acesso em: 15 jun. 2016.

\_\_\_\_\_. **Resolução normativa nº 687, de 24 de novembro de 2015**. Brasília, 2015a. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>. Acesso em: 10 maio 2016.

\_\_\_\_\_. **Informações gerenciais**. Brasília, 2015b. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Z\\_IG\\_Mar\\_2015-170615.pdf](http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Z_IG_Mar_2015-170615.pdf)>. Acesso em: 21 jun. 2015.

\_\_\_\_\_. **Micro e minigeração distribuída**: sistema de compensação de energia elétrica. 2. ed. Brasília, 2016a. (Cadernos temáticos Aneel). Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/documents/656877/14913578/Caderno+tematico+Micro+e+Minigera%C3%A7%C3%A3o+Distribuida+-+2+edicao/716e8bb2-83b8-48e9-b4c8-a66d7f655161>>. Acesso em: 22 maio 2016.

\_\_\_\_\_. **Banco de informações de geração**. Brasília, 2016b. Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/CombustivelPorClasse\\_fn1.cfm?origem=2&Combustivel=Biomassa&fase=3](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/CombustivelPorClasse_fn1.cfm?origem=2&Combustivel=Biomassa&fase=3)>. Acesso em: 30 ago. 2016.

\_\_\_\_\_. **Banco de informações de geração**. Brasília, 2016c. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/CombustivelListaUsinas.asp?classe=Biomassa&combustivel=19&fase=3>>. Acesso em: 30 ago. 2016.

\_\_\_\_\_. **Banco de informações de geração**. Brasília, 2016d. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>>. Acesso em: 30 ago. 2016.

\_\_\_\_\_. **Principais atividades da Aneel**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em: 15 jan. 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Portaria nº 128, de 28 de agosto de 2001**. Rio de Janeiro, 2001a. Disponível em: <[http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll/leg/folder\\_portarias\\_anp/portarias\\_anp\\_tec/2001/agosto/panp%20128%20-%202001.xml](http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll/leg/folder_portarias_anp/portarias_anp_tec/2001/agosto/panp%20128%20-%202001.xml)>. Acesso em: 10 abr. 2016.

\_\_\_\_\_. **Regulação**. Rio de Janeiro, 2001b. (Séries ANP, n. I).

\_\_\_\_\_. **Indústria brasileira de gás natural**: regulação atual e desafios futuros. Rio de Janeiro, 2001c. (Superintendência de Comercialização e Movimentação de Gás Natural).

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS.  
**Nota técnica nº 033, de 23 de julho de 2002.** Rio de Janeiro, 2002. Disponível em:  
<[www.anp.gov.br/wwwanp/?dw=2274](http://www.anp.gov.br/wwwanp/?dw=2274)>. Acesso em: 4 jul. 2016.

\_\_\_\_\_. **Resolução nº 16, de 17 de junho de 2008.** Rio de Janeiro, 2008.  
Disponível em:  
<[http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll/leg/resolucoes\\_anp/2008/junho/ranp%2016%20-%202008.xml](http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll/leg/resolucoes_anp/2008/junho/ranp%2016%20-%202008.xml)>. Acesso em: 10 abr. 2016.

\_\_\_\_\_. **Evolução da indústria brasileira de gás natural:** aspectos técnico-econômicos e jurídicos. Rio de Janeiro, 2009. Disponível em:  
<[www.anp.gov.br/?dw=32427](http://www.anp.gov.br/?dw=32427)>. Acesso em: 7 set. 2016.

\_\_\_\_\_. **Nota técnica conjunta nº 002, de 27 de dezembro de 2011.** Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: <[www.anp.gov.br/?dw=58828](http://www.anp.gov.br/?dw=58828)>. Acesso em: 4 jul. 2016.

\_\_\_\_\_. **Nota técnica nº 132, de 8 de outubro de 2013.** Rio de Janeiro, 2013.  
Disponível em: <[www.anp.gov.br/?dw=72845](http://www.anp.gov.br/?dw=72845)>. Acesso em: 4 jun. 2015.

\_\_\_\_\_. **Nota técnica nº 157, de 17 de setembro de 2014.** Rio de Janeiro, 2014.  
Disponível em: <[www.anp.gov.br/?dw=79196](http://www.anp.gov.br/?dw=79196)>. Acesso em: 4 jun. 2014.

\_\_\_\_\_. **Resolução nº 8, de 30 de janeiro de 2015.** Rio de Janeiro, 2015.  
Disponível em:  
<<http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll?f=templates&fn=default.htm&vid=anp:10.1048/enu>>. Acesso em: 10 fev. 2015.

\_\_\_\_\_. **Resolução nº 21, de 11 de junho de 2016.** Rio de Janeiro, 2016.  
Disponível em:  
<<http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll?f=templates&fn=default.htm&vid=anp:10.1048/enu>>. Acesso em: 12 jul. 2016.

AHMED, A.; UDDIN, G. S.; SOHAG, K. Biomass energy, technological progress and the environmental Kuznets curve: evidence from selected European countries. **Biomass and Bioenergy**, n. 90, p. 202-208, 2016.

ALBUQUERQUE, K. F. **A retomada da reforma/melhora regulatória no Brasil:** um passo fundamental para o crescimento econômico sustentado. 2006, 69 f. Monografia (Especialização em Administração Pública) – Programa de Pós-Graduação em Administração Pública da FGV Management, Fundação Getúlio Vargas, Brasília, 2006.

ALMEIDA, E. F. A.; FERRARO, M. C. **Indústria do gás natural:** fundamentos técnicos e econômicos. Rio de Janeiro: Synergia, 2013.

AMARAL FILHO, J. B. S. **A reforma do setor elétrico brasileiro e a questão da modicidade tarifária.** 2007. 248 f. Tese (Doutorado em Ciências Econômicas) Instituto de Economia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, 2007.

AMINI, H. R.; REINHART, D. R.; NISKANEN, A. Comparison of first-order-decay modeled and actual field measured municipal solid waste landfill methane data. **Waste Management**, n. 33, p. 2720-2728, 2013.

ARAÚJO, J. L. R. H. Regulação de monopólios e mercados: questões básicas. In: SEMINÁRIO NACIONAL DO NÚCLEO DE ECONOMIA DA INFRAESTRUTURA, 1., 1997, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: IE/UFRJ, 1997.

ARAÚJO JR., J. T. **Regulação e concorrência em setores de infraestrutura**. In: FÓRUM NACIONAL DO INSTITUTO NACIONAL DE ALTOS ESTUDOS, 17., 2005, Rio de Janeiro. Disponível em: <[www.inae.org.br/estudo/regulacao-e-concorrencia-em-setores-de-infraestrutura/](http://www.inae.org.br/estudo/regulacao-e-concorrencia-em-setores-de-infraestrutura/)>. Acesso em: 2 jul. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE BIOGÁS E DE BIOMETANO. **Proposta de programa nacional do biogás e do biometano – PNBB**. São Paulo: Abiogás, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil - 2014**. São Paulo: ABRELPE, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.004**: resíduos sólidos – classificação. Rio de Janeiro, 2004.

AYDI, A.; ABICHOU, T.; ZAIRI, M.; SDIRI, A. Assessment of electrical generation potential and viability of gas collection from fugitive emissions in a Tunisian landfill. **Energy Strategy Reviews**, n. 8, p. 8-14, 2015.

AZUELA, G. E.; BARROSO, L. A. **Design and performance of policy instruments to promote the development of renewable energy**: emerging experience in selected developing countries. Washington, DC: The World Bank Group, 2011. (Energy and mining sector board discussion paper, n. 22).

BACEN. Aparato de regulação econômica: as agências reguladoras. **Bahia Análise & Dados**, v. 12, n. 4, p. 183-189, 2003.

BANCO DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. **Programa Fundo Clima**. Disponível em: <[http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/bndes/bndes\\_pt/Areas\\_de\\_Atualizacao/Meio\\_Ambiente/fundo\\_clima.html](http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/bndes/bndes_pt/Areas_de_Atualizacao/Meio_Ambiente/fundo_clima.html)>. Acesso em: 10 jul. 2016.

BANCO MUNDIAL. **Como revitalizar os investimentos em infra-estrutura no Brasil**: políticas públicas para uma melhor participação do setor privado. Washington, DC, 2007. [Volume I: Relatório Principal].

BARLAZ, M. A.; CHANTON, J. P.; GREEN, R. B. Controls on landfill gas collection efficiency: instantaneous and lifetime performance. **Journal of the Air & Waste Management Association**, n. 59, p. 1399-1404, 2009.

BARROS, R. M.; TIAGO FILHO, G. L.; SILVA, T. R. The electric energy potential of landfill biogas in Brazil. **Energy Policy**, n. 65, p. 150-164, 2014.

BIENER, C.; ELING, M.; SCHMIT, J. T. Regulation in microinsurance markets: principles, practice, and directions for future development. **World Development**, v. 58, p. 21-40, 2014.

BILGILI, F.; OZTURK, I. Biomass energy and economic growth nexus in G7 countries: evidence from dynamic panel data. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 49, p. 132-138, 2015.

BLEY JR., C. **Biogás: a energia invisível**. 2. ed. rev. e ampl. São Paulo: CIBiogás, 2015.

BORBA, S. M. P. **Análise de modelos de geração de gases em aterros sanitários**: estudo de caso. 2006. 149 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

BRASIL. **Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981**. Brasília, 1981. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/LEIS/L6938.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L6938.htm)>. Acesso em: 8 nov. 2014.

\_\_\_\_\_. **Lei nº 8.987, de 13 de fevereiro de 1995**. Brasília, 1995a. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/L8987cons.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L8987cons.htm)>. Acesso em: 4 out. 2016.

\_\_\_\_\_. **Lei nº 9.074, de 7 de julho de 1995**. Brasília, 1995b. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/L9074cons.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9074cons.htm)>. Acesso em: 8 nov. 2015  
BRASIL. **Decreto nº 2.003, de 10 de setembro de 1996**. Brasília, 1996. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/decreto/D2003.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/D2003.htm)>. Acesso em: 10 jun. 2015.

\_\_\_\_\_. Constituição (1988). **Constituição [da] República Federativa do Brasil**. Brasília: Senado Federal, Subsecretaria de Edições Técnicas, 2002.

\_\_\_\_\_. **Lei nº 10.848, de 15 de março de 2004**. Brasília, 2004a. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/lei200410848.pdf>>. Acesso em: 4 ago. 2016.

\_\_\_\_\_. **Decreto nº 5.163, de 30 de julho de 2004**. Brasília, 2004b. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2004-2006/2004/decreto/d5163.HTM](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/decreto/d5163.HTM)>. Acesso em: 11 jun. 2015.

\_\_\_\_\_. **Lei nº 11.196, de 21 de novembro de 2005**. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2004-2006/2005/lei/l11196.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2005/lei/l11196.htm)> Acesso em: 7 set. 2016.

BRASIL. **Lei nº 11.445, de 15 de junho de 2007**. Brasília, 2007. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2007/lei/l11445.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/l11445.htm)>. Acesso em: 7 set. 2016.

\_\_\_\_\_. **Lei nº 11.909, de 4 de março de 2009**. Brasília, 2009a. Disponível em: <[https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2009/lei/l11909.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/l11909.htm)>. Acesso em: 4 jul. 2016.

\_\_\_\_\_. **Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009**. Brasília, 2009b. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2009/lei/l12187.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/l12187.htm)>. Acesso em: 4 jul. 2016.

\_\_\_\_\_. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Brasília, 2010a. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm)>. Acesso em: 4 nov. 2014.

\_\_\_\_\_. **Decreto nº 7.390, de 9 de dezembro de 2010**. Brasília, 2010b. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2007-2010/2010/Decreto/D7390.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Decreto/D7390.htm)>. Acesso em: 4 out. 2015.

\_\_\_\_\_. **Decreto nº 7.404, de 23 de dezembro de 2010**. Brasília, 2010c. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/decreto/d7404.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/decreto/d7404.htm)>. Acesso em: 4 nov. 2014.

\_\_\_\_\_. Decreto n.º 7.217, de 21 de junho de 2010d. Regulamenta a Lei n.º 11.445/2007, que estabelece as diretrizes do saneamento básico, e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 22 jun. 2010. Seção 1, p. 1-8.

\_\_\_\_\_. Ministério do Meio Ambiente. **Brasil – planos de gestão de resíduos sólidos**: manual de orientação. Brasília, 2012a.

\_\_\_\_\_. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano: **Levantamentos e análise da situação dos planos de resíduos sólidos no estado do Espírito Santo**. Brasília, 2012b. [Relatório Técnico Único BRA/OEA 08/001].

\_\_\_\_\_. Ministério de Minas e Energia. **Soluções energéticas para a Amazônia em biomassa**. 2014a. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br>>. Acesso em: 5 nov. 2015.

\_\_\_\_\_. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS**: série histórica dos diagnósticos dos serviços de água e esgotos. Brasília, 2014b. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/PaginaCarrega.php?EWRErterterTERTer=6>>. Acesso em: 20 out. 2016.

\_\_\_\_\_. Senado Federal. Subcomissão temporária de resíduos sólidos. **Projeto de Lei do Senado nº 425, de 18 de dez 2014c**. 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: 2 jan 2016.

BRASIL. Conselho Nacional de Política Fazendária. **Convênio ICMS 16, de 22 de abril de 2015**. Brasília: CONFAZ, 2015.

\_\_\_\_\_. Ministério de Minas e Energia. **Boletim mensal de energia**. Brasília, 2016a. Disponível em: <[http://www.mme.gov.br/documents/10584/3594382/03+-+Boletim+Mensal+de+Energia+-+Mar%C3%A7o+2016+\(PDF\)/b69283ed-51b8-4219-a2fe-9a9b2af17eb0;jsessionid=1C220D2A66E5D27F9EAF4AD1811929D2.srv155](http://www.mme.gov.br/documents/10584/3594382/03+-+Boletim+Mensal+de+Energia+-+Mar%C3%A7o+2016+(PDF)/b69283ed-51b8-4219-a2fe-9a9b2af17eb0;jsessionid=1C220D2A66E5D27F9EAF4AD1811929D2.srv155)>. Acesso em: 10 mar. 2016.

\_\_\_\_\_. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Terceira comunicação nacional do Brasil à convenção**: quadro das nações unidas sobre mudança do clima. 2016b. Disponível em: <<http://sirene.mcti.gov.br/publicacoes>>. Acesso em: 18 set. 2016.

\_\_\_\_\_. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Probiogás. **Barreiras e propostas de soluções para o mercado de biogás no Brasil**. Brasília, 2016c. (Série Desenvolvimento do Mercado de Biogás).

BRITO FILHO, L. F. **Estudo de gases em aterros de resíduos sólidos urbanos**. 2005. 218 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

BRITTO, A. L. N. P. A Regulação dos serviços de saneamento no Brasil: perspectiva histórica, contexto atual e novas exigências de uma regulação pública. In: ENCONTRO NACIONAL DA ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA EM PLANEJAMENTO URBANO E REGIONAL, 9, 2001, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ANPUR, 2001. p. 1080-1093.

BROUN, R.; SATTLER, M. A comparison of greenhouse gas emissions and potential electricity recovery from conventional and bioreactor landfills. **Journal of Cleaner Production**, n. 112, p. 2664-2673, 2016.

BUNEDER, D.; CAMPONOGARA, G.; PANTALEÃO, P. **Microprodução, miniprodução, autoprodução e produção independente de energia**. Rio Grande do Sul: Ed. UFRGS, 2014.

BUTLER, L.; NEUHOFF, K. Comparison of feed-in tariff, quota and auction mechanisms to support wind power development. **Renewable Energy**, v. 33, n. 8, p. 1854-1867, 2008.

BUZANELLO, J. C. Aspectos da regulação de saneamento no Brasil. **Conpendi Law Review**, Florianópolis, v. 1, n. 7, p. 122-142, 2016.

CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. **Fontes**. 2016. Disponível em: <<http://www.ccee.org.br/portal>>. Acesso em: 10 set. 2016.

\_\_\_\_\_. **O que fazemos**: tipos de leilões. Disponível em: <[http://www.ccee.org.br/portal/faces/pages\\_publico/o-que-](http://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/o-que-)



fazemos/como\_ccee\_atua/tipos\_leiloes\_n\_logado?\_afrLoop=780806850326756#%40%3F\_afrLoop%3D780806850326756%26\_adf.ctrl-state%3Dzzinezbmb\_671>. Acesso em: 24 jan. 2017a.

\_\_\_\_\_. **Ambiente livre e ambiente regulado**. Disponível em: <[http://www.ccee.org.br/portal/faces/pages\\_publico/como-participar/ambiente-livre-ambiente-regulado?\\_adf.ctrl-state=zzinezbmb\\_281&\\_afrLoop=780400509313684](http://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/como-participar/ambiente-livre-ambiente-regulado?_adf.ctrl-state=zzinezbmb_281&_afrLoop=780400509313684)>. Acesso em: 24 jan. 2017b.

\_\_\_\_\_. **Como se dividem**. Disponível em: <[https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages\\_publico/quem-participa/como\\_se\\_dividem?\\_afrLoop=114828285325509#%40%3F\\_afrLoop%3D114828285325509%26\\_adf.ctrl-state%3Djunnbowy4\\_21](https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/quem-participa/como_se_dividem?_afrLoop=114828285325509#%40%3F_afrLoop%3D114828285325509%26_adf.ctrl-state%3Djunnbowy4_21)>. Acesso em: 24 jan. 2017c.

CAMPOS, A. F. **Indústria do petróleo**: desdobramentos e novos rumos da reestruturação sul-americana dos anos 90. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2014.

\_\_\_\_\_. Gestão dos recursos energéticos para o desenvolvimento de uma matriz mais renovável no estado do Espírito Santo. **Espacios**, Caracas, Ven., v. 37, n. 24, p. 20-?, 2016a.

CAMPOS, A. F. Principais impactos das mudanças institucionais e regulatórias da indústria de gás natural no Brasil. **Sodebras**, v. 11, n. 132, p. 53-58, 2016b.

CAMPOS, A. F.; MOARES, N. G. **Tópicos em energia**: teoria e exercícios com respostas para concursos. Rio de Janeiro: Synergia, 2012.

CARAPETO, C.; ALVES, F.; CAEIRO, S. **Educação ambiental**. Lisboa: Universidade Aberta, 1998.

CARVALHO, R. A. L. **Regulação estadual do gás natural no Brasil**: metodologia tarifária e marcos regulatórios regionais. 2010. 85 f. Monografia (Especialização em Contabilidade Governamental) – Departamento de Ciências Contábeis, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

CARVALHO, V. N. **O princípio do usuário-pagador no direito ambiental**. Teresina, 2014. Disponível em: <<https://jus.com.br/artigos/34880/o-principio-do-usuario-pagador-no-direito-ambiental>>. Acesso em: 28 dez. 2016.

CAVÉ, J. Economia política da gestão de resíduos sólidos municipais em Vitória (Espírito Santo). **Revista Geografares**, Vitória, n. 9, p. 168-202, 2011.

CENTRO INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS–BIOGÁS. **Curso de atualização em energias do biogás**. Módulo 1, aula 1 – Cenário das energias renováveis. Foz do Iguaçu: Parque Tecnológico Itaipu, 2016.

CENTRO NACIONAL DE REFERÊNCIA EM BIOMASSA. **Conceituando biomassa**. São Paulo, 2016. Disponível em: <<http://www.iee.usp.br/gbio/?q=livro/conceituando-biomassa>>. Acesso em: 10 maio 2016.

CHAKRABORTY, M.; SHARMA, C.; PANDEY, J.; GUPTA, P. Assessment of energy generation potentials of MSW in Delhi under different technological options. **Energy Conversion and Management**, n. 75, p. 249-255, 2013.

CHEN, H.; HO, Y. S. Highly cited articles in biomass research: a bibliometric analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 49, p. 12-20, 2015.

CHERNICHARO, C. A. L.; STUETZ, R. M. Energy recovery from biogas in anaerobic wastewater treatment plants. In: CHERNICHARO, C. A. L. **Limitações e possíveis melhorias futuras no projeto, na construção e na operação de reatores UASB tratando esgotos domésticos**. Belo Horizonte: Ed. UFMG, 2009.

CHO, H. S.; MOON, H. S., KIM, J. Y. Effect of quantity and composition of waste on the prediction of annual methane potential from landfills. **Bioresource Technology**, n. 109, p. 86-92, 2012.

CIBIOGAS ENERGIAS RENOVÁVEIS. **Desafios e oportunidades para o biogás no Brasil**. São Paulo: Fiesp, 2015.

COELHO, C. G. **Pesquisa sobre biogás de aterro**. 2015. Entrevista concedida a Juçara de Jesus Monteiro De Galiza, Vitória, 30 jun. 2015.

COIMBRA-ARAÚJO, C. H.; MARIANE, L.; BLEY JÚNIOR, C.; FRIGO, E. P.; FRIGO, M. S.; ARAÚJO, I. R. C.; ALVES, H. J. Brazilian case study for biogas energy: production of electric power, heat and automotive energy in condominiums of agroenergy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 40, p. 826-839, 2014.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Biogás: pesquisas e projetos no Brasil**. São Paulo, 2006. Disponível em: <<http://cetesb.sp.gov.br/biogas/wpcontent/uploads/sites/27/2014/01/livrobiogas.pdf>>. Acesso em: 6 abr. 2016.

CRESWELL, J. W.; CLARK, V. L. P. **Pesquisa de métodos mistos**. Porto Alegre: Penso, 2013.

CUNHA, J. Abastecer carro com gás derivado de dejetos começa a virar realidade. **Folha de São Paulo**, São Paulo, 20 fev. 2016. Disponível em: <[http://www.canalenergia.com.br/zpublisher/materias/Clipping\\_imprimir.asp?id=184246&prlink=1](http://www.canalenergia.com.br/zpublisher/materias/Clipping_imprimir.asp?id=184246&prlink=1)>. Acesso em: 28 jul. 2016.

DI PIETRO, M. S. Z. 500 anos de direito administrativo brasileiro. **Rede**, Salvador, BA, n. 5, p. 1-25, 2006.

DUTRA, R. M. **Avaliação do cenário de compra e venda de resíduos sólidos recicláveis nos municípios do Condoeste/ES**. 2016. 204 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2016.

DUTRA, R. M.; SZKLO, A. S. Incentive policies for promoting wind power production in Brazil: scenarios for the Alternative Energy Sources Incentive Program (PROINFA) under the New Brazilian electric power sector regulation. **Renewable Energy**, n. 33, p. 65-76, 2008.

EMKES, H.; COULON, F.; WAGLAND, S. A decision support tool for landfill methane generation and gas collection. **Waste Management**, n. 43, p. 307-318, 2015.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano nacional de energia 2030**. Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_. **Balanco energético nacional 2008**: ano base 2007. Rio de Janeiro, 2008.

\_\_\_\_\_. **Plano decenal de expansão da malha de transporte dutoviário – PEMAT 2022**. Rio de Janeiro, 2014a. Disponível em: <[http://www.epe.gov.br/PEMAT/Relat%C3%B3rio\\_PEMAT\\_Consulta%20P%C3%BAblica.pdf](http://www.epe.gov.br/PEMAT/Relat%C3%B3rio_PEMAT_Consulta%20P%C3%BAblica.pdf)>. Acesso em: 10 nov. 2016.

\_\_\_\_\_. **Nota Técnica DEA nº 16, de outubro de 2014**: economicidade e competitividade do aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro, 2014b. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br>>. Acesso em: 11 jun. 2015.

\_\_\_\_\_. **Inventário energético dos resíduos sólidos urbanos**. Rio de Janeiro, 2014c. (Série Recursos Energéticos).

\_\_\_\_\_. **Nota Técnica DEA nº 13/14, de agosto de 2014**: demanda de energia 2050. Rio de Janeiro, 2014d. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br>>. Acesso em: 11 jun. 2015.

\_\_\_\_\_. **Anuário estatístico de energia elétrica 2015**: ano base 2014. Rio de Janeiro, 2015.

\_\_\_\_\_. **Energia termelétrica**: gás natural, biomassa, carvão, nuclear. Rio de Janeiro, 2016a.

\_\_\_\_\_. **Energia renovável**: hidráulica, biomassa, eólica, solar, oceânica. Rio de Janeiro, 2016b.

\_\_\_\_\_. **EPE publica mapa da infraestrutura de gasodutos de transporte de gás natural no Brasil**. Rio de Janeiro, 2016c. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br>>. Acesso em: 12 jul. 2016.

\_\_\_\_\_. **Balanco energético nacional 2016**: ano base 2015. Rio de Janeiro, 2016d.

ENSINAS, A. V. **Estudo da geração de biogás no aterro sanitário Delta em Campinas-SP**. 2003. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, 2003.

ESPÍRITO SANTO (Estado). Lei n.º 9.096, de 29 de dezembro de 2008. Estabelece as diretrizes e a política estadual de saneamento básico e dá outras providências. **Diário Oficial [dos] Poderes do Espírito Santo**, Vitória, 30 dez. 2008. p. 1-9.

\_\_\_\_\_. **Lei nº 9.264, de 15 de julho de 2009**. Vitória, 2009. Disponível em: <[http://www.normasbrasil.com.br/norma/lei-9264-2009-es\\_126138.html](http://www.normasbrasil.com.br/norma/lei-9264-2009-es_126138.html)>. Acesso em: 13 jul. 2015.

\_\_\_\_\_. **Lei nº 9.531, de 15 de setembro de 2010**. Vitória, 2010. Disponível em: <[http://www.al.es.gov.br/antigo\\_portal\\_ales/images/leis/html/9.531.htm](http://www.al.es.gov.br/antigo_portal_ales/images/leis/html/9.531.htm)>. Acesso em: 11 jun. 2015.

\_\_\_\_\_. **Resolução Aspe nº 004, de 15 de junho de 2011**. Vitória, 2011a. Disponível em: <[http://www.aspe.es.gov.br/download/RESOLUCAO\\_ASPE\\_004\\_11.pdf](http://www.aspe.es.gov.br/download/RESOLUCAO_ASPE_004_11.pdf)>. Acesso em: 5 dez. 2016.

\_\_\_\_\_. **Lei nº 9.772, de 27 de dezembro de 2011**. Vitória, 2011b. Disponível em: <<http://www.conslegis772.es.gov.br/>>. Acesso em: 13 nov. 2016.

\_\_\_\_\_. **Decreto nº 3.453, de 6 de dezembro de 2013**. Vitória, 2013. Disponível em: <<https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=109588>>. Acesso em: 11 jun. 2015.

\_\_\_\_\_. **Lei Complementar ARSP nº 827/2016**. Vitória, 2016. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/document/324003221/LC-827-2016-Cria-a-ARSP-e-Da-Outras-Providencias>>. Acesso em: 13 jul. 2015.

FAAIJ, A. P. C. Bio-energy in Europe: changing technology choices. **Energy Policy**, v. 34, p. 322-342, 2006.

FAOUR, A. A.; REINHART, D. R.; YOU, H. First-order kinetic gas generation model parameters for wet landfills. **Waste Management**, n. 27, p. 946-953, 2007.

FELCA, A. T. A.; GLÓRIA, R. F.; BARROS, R. M.; ALVES, A. P. Estimativa do potencial energético de um aterro sanitário por meio de duas metodologias. In: CONGRESSO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE, 12., 2015, Poços de Caldas. **Anais...** Poços de Caldas: [s.n.], 2015.

FERNANDES, J. G. **Estudo da emissão de biogás em um aterro sanitário experimental**. 2009. 116 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

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.

FIGUEIREDO, J. C. **Estimativa de produção de biogás e potencial energético dos resíduos sólidos urbanos em Minas Gerais**. 2012. 139 f. Dissertação

(Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais) – Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

FIOROT, G. M. **Utilização de ferramentas de apoio à tomada de decisão como suporte ao planejamento integrado de recursos energéticos (PIR):** implicações e soluções para o estado do Espírito Santo. 2016. 137 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2016.

FOGAÇA, J. R. V. **Energia limpa:** Brasil-escola. Disponível em: <<http://brasilecola.uol.com.br/quimica/energia-limpa.htm>>. Acesso em: 12 jan. 2017.

FORBES, E. G. A.; OLAVE, R. J.; JOHNSTON, C. R.; BROWNE, J. D.; RELF, J. Biomass and bioenergy utilisation in a farm-based combined heat and power facility. **Biomass and Bioenergy**, p. 1-12, 2016.

FREITAS, H.; OLIVEIRA, M.; SACCOL, A. Z.; MOSCAROLA, J. O método de pesquisa survey. **Revista de Administração**, São Paulo, v. 35, n. 3, p. 105-112, 2000.

GALVÃO JR., A. C.; MONTEIRO, A. P.; MELO, A. J. M. **Regulação do saneamento básico.** Barueri, SP: Manole, 2013.

GALVÃO JR., A. C.; PAGANINI, W. S. Aspectos conceituais da regulação dos serviços de água e esgoto no Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 14, n. 1, p. 79-88, jan./mar. 2009.

GARCIA, M. C. D. **Rede de organizações de catadores do estado do Espírito Santo:** modelagem matemática para avaliação de cenários do problema localização. 2016. 186 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2016.

GE, X.; MATSUMOTO, T.; KEITH, L.; LI, Y. Biogas energy production from tropical biomass wastes by anaerobic digestion. **Bioresource Technology**, Ohio, n. 169, p. 38-44, 2014.

GERMANY TRADE AND INVEST. **Mecanismos de apoio para biogás ainda são expansíveis na Suécia.** Berlin, 2012. Disponível em: <<http://www.gtai.de/GTAI/Navigation/DE/Trade/maerkte,did=698754.html>>. Acesso em: 11 jun. 2016.

GERVÁZIO, A. F.; FRIGINI, C. C.; DIAS, M.; VESCOVI, P. **Avaliação da produção de biogás em aterro sanitário e projeto de mecanismo de desenvolvimento limpo (MDL).** 2010. 143 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Curso de Engenharia Química, Faculdade de Aracruz, Aracruz, 2010.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GOBBI, M. F. Introdução à modelagem da poluição ambiental. Apostila do curso de Dispersão Ambiental de Poluentes oferecido pela Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

GODOI, M. Biogás poderia suprir 12% da matriz energética do país, aponta estudo da Abiogás. **Canal Energia**, São Paulo, 2 fev. 2016. Disponível em: <<http://www.canalenergia.com.br/zpublisher/materias/imprimir.asp?id=110345> 1/>. Acesso em: 28 jul. 2016.

GÓES, H. C.; Coleta seletiva, planejamento municipal e a gestão de resíduos sólidos urbanos em Macapá/AP. **Revista Internacional de Direito Ambiental e Políticas Públicas**, Macapá, n. 3, p. 45-60, 2011.

GOLDEMBERG, J.; COELHO, S. T.; REI, F. Brazilian energy matrix and sustainable development. **Energy for Sustainable Development**, n. 6, p. 55-59, 2002.

GUERRA, J. B. S. O. A.; DUTRA, L.; SCHWINDEN, N. B. C.; ANDRADE, S. F. Future scenarios and trends in energy generation in Brazil: supply and demand and mitigation forecasts. **Journal of Cleaner Production**, n.103, p. 197-210, 2015.

GUPTA, K. K.; REHMAN, A.; SARVIYA, R. M. Bio-fuels for the gas turbine: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, p. 2946-2955, 2010.

GUZIANA, B.; SONG, H.; THON, E.; DOTZHAUER, E.; YAN, J. Policy based scenarios for waste-to-energy use: swedish perspective. **Waste and Biomass Valorization**, n. 5, p. 679-688, 2014.

HALL, R. E; LIEBERMAN, M. **Microeconomia**: princípios e aplicações. São Paulo: Thomson, 2003.

HENRIQUES, R. M. **Aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos**: uma abordagem tecnológica. 2004. 204 f. Tese (Mestrado em Ciências em Planejamento Energético) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia da COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

HOOGWIJK, M.; FAAIJ, A. P. C; BROEK, R. V. D.; BERNDES, G.; GIELEN, D.; TURKENBURG, W. Exploration of the ranges of the global potential of biomass for energy. **Biomass and Bioenergy**, n. 25, p. 119-133, 2003.

HOORNWEG, D.; BHADA-TATA, D. H; **What a waste**: a global review of solid waste management. Washington: World Bank , 2012. Disponível em: <[http://siteresources.worldbank.org/INTURBANDEVELOPMENT/Resources/336387-1334852610766/What\\_a\\_Waste2012\\_Final.pdf](http://siteresources.worldbank.org/INTURBANDEVELOPMENT/Resources/336387-1334852610766/What_a_Waste2012_Final.pdf)>. Acesso em: 20 jun. 2015.

IBGE. **Censo – IBGE**. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **Estados – IBGE**. Rio de Janeiro, 2016.

IDDRISU, I.; BHATTACHARYYA, S. C. Sustainable energy development index: a multi-dimensional indicator for measuring sustainable energy development. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 50, p. 513-530, 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE DEFESA DO CONSUMIDOR]. **Defesa do consumidor, participação social e ferramentas para a cidadania**: um banco de dados para o monitoramento da regulação. São Paulo: IDEC, 2011. 56 p.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Caderno de diagnóstico – resíduos sólidos urbanos**. 2011. Disponível em: <[http://www.cnrh.gov.br/projetos/pnrs/documentos/cadernos/01\\_CADDIAG\\_Res\\_Sol\\_Urbanos.pdf](http://www.cnrh.gov.br/projetos/pnrs/documentos/cadernos/01_CADDIAG_Res_Sol_Urbanos.pdf)>. Acesso em: 10 mar. 2016.

INSTITUTO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. **Projeto Espírito Santo sem Lixão**. Disponível em: <[http://www.meioambiente.es.gov.br/download/es\\_sem\\_lixao.pdf](http://www.meioambiente.es.gov.br/download/es_sem_lixao.pdf)>. Acesso em: 20 abr. 2016.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Good practice guidance and uncertainty management in national greenhouse gas inventories**. 2000. Disponível em: <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/english/>>. Acesso em: 27 dez. 2016.

\_\_\_\_\_. **IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories**. 2006. Disponível em: <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol5.html>>. Acesso em: 15 mar. 2016.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Key world energy trends** - excerpt from world energy balances. 2016a. Disponível em: <<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorldEnergyTrends.pdf>>. Acesso em: 20 jul. 2016.

\_\_\_\_\_. **Key electricity trends** - excerpt from electricity information. 2016b. Disponível em: <<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyElectricityTrends.pdf>>. Acesso em: 20 dez. 2016.

JOSKOW, P. L. **Economic regulation**. Cheltenham UK: Edward Elgar, 2000.

JUÁREZ, A. B.; ARAÚJO, A. M.; ROHATGI, J. S.; OLIVEIRA FILHO, O. D. Q. Development of the wind power in Brazil: political, social and technical issues. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 39, p. 828-834, 2014.

KARANJEKAR, R. V.; BHATT, A.; ALTOUQUI, S.; JANGIKHATOONABAD, N.; DURAI, V.; SATTLER, M. L.; HOSSAIN, S.; CHEN, V. Estimating methane emissions from landfills based on rainfall, ambient temperature, and waste composition: the CLEEN model. **Waste Management**, n. 46, p. 389-398, 2015.

KELMAN, J. **Desafios do regulador**. 2. ed. Rio de Janeiro: Synergia, 2009.

KHAN, D.; KUMAR, A.; SAMADDER, S. R. Impact of socioeconomic status on municipal solid waste generation rate. **Waste Management**, v. 49, p. 15-25, 2016.

KILEBER, S.; PARENTE, V. Diversifying the Brazilian electricity mix: income level, the endowment effect, and governance capacity. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 49, p. 1180-1189, 2015.

KILPELAINEN, A.; ALAM, A.; TORSSONEN, P.; RUUSUVUORI, H.; AKI, S. K.; PELTOLA, H. Effects of intensive forest management on net climate impact of energy biomass utilisation from final felling of Norway spruce. **Biomass and Bioenergy**, n. 87, p. 1-8, 2016.

KNOWLES, B. C.; LEE, H. Optimized working conditions for a thermoelectric generator as a topping cycle for gas turbines. **Journal of Applied Physics**, n. 112, p. 073515.1-073515.8, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1063/1.4757008>>. Acesso em: 20 dez. 2016.

KRAUSE, G. G.; PINTO JR., H. Q. **Estrutura e regulação do mercado de gás natural**: especificidades do caso brasileiro. Rio de Janeiro: ANP, 1998.

KUMAR, A.; SHARMA, M. P. GHG emission and carbon sequestration potential from MSW of Indian metro cities. **Urban Climate**, n. 8, p. 30-41, 2014.

LAMBORN, J. Observations from using models to fit the gas production of varying volume test cells and landfills. **Waste Management**, n. 32, p. 2353-2363, 2012.

LEBRE, E. L. R.; SOARES, J. B.; OLIVEIRA, L. B.; LAURIA, T. Sustainable expansion of electricity sector: sustainability indicators as an instrument to support decision making. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 14, p. 422-429, 2010.

LEME, M. M. V.; ROCHA, M. H.; LORA, E. E. S.; VENTURINI, O. J.; LOPES, B. M.; FERREIRA, C. H. Techno-economic analysis and environmental impact assessment of energy recovery from Municipal Solid Waste (MSW) in Brazil. **Resources, Conservation and Recycling**, n. 87, p. 8-20, 2014.

LOBATO, L. C. S. **Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgoto doméstico**. 2011. 187 f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

LOCAL GOVERNMENTS FOR SUSTAINABILITY - BRASIL. **Manual para aproveitamento de biogás**: aterros sanitários. São Paulo, 2009. Disponível em: <[http://www.resol.com.br/cartilha12/manual\\_iclei\\_brazil.pdf](http://www.resol.com.br/cartilha12/manual_iclei_brazil.pdf)>. Acesso em: 10 abr. 2016.

LUCON, O.; GOLDEMBERG, J. Crise financeira, energia e sustentabilidade no Brasil. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 23, n. 65, p. 121-130, 2009.



- MADEIRA, R. F. O setor de saneamento básico no Brasil e as implicações do marco regulatório para a universalização do acesso. **Revista do BNDES**, [S.l.], n. 33, p. 123-154, jun. 2010.
- 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**, n. 35, p. 484-498, 2014.
- MARINHO, M. S. J. **Regulação dos serviços de saneamento do Brasil (água e esgoto)**. 2006. 230 f. Tese (Doutorado em Desenvolvimento Econômico) – Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Econômico, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.
- MARTIN, R. Comercialização de energia renovável lançada na Alemanha. **Mit Technology Review**, Madrid, 30 dez. 2015. Disponível em: <[http://www.technologyreview.com.br/read\\_article.aspx?id=48953](http://www.technologyreview.com.br/read_article.aspx?id=48953)>. Acesso em: 27 jan. 2017. [Traduzido por Elisa Matté].
- MATHIAS, M. C. P. P. **A formação da indústria global de gás natural**: definição, condicionantes e desafios. 2008. 296 f. Tese (Doutorado em Planejamento Energético) – Programa de Pós-Graduação em Planejamento Energético da COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.
- MATIAS, J. P. Políticas de defesa da concorrência e de regulação econômica: as deficiências do sistema brasileiro de defesa da concorrência. **Revista de Administração Contemporânea**, Curitiba, v. 10, n. 2, p. 1-17, 2006.
- MENDES, L. G. G. **Proposta de um sistema para aproveitamento energético de um aterro sanitário regional na cidade de Guaratinguetá**. 2005. 161 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2005.
- MESQUITA, A. M.; CAMPOS, F. M. Produtividade, eficiência econômica e regulação por incentivos nos serviços de abastecimento de água e esgotamento sanitário. In: PHILIPPI JR., Arlindo (Coord.). **Regulação do saneamento básico**. São Paulo: Manole, 2013. p. 167-199.
- MINAS GERAIS (Estado). **Resolução SEDE nº 17, de 9 de dezembro de 2013**. 2013. Disponível em: <<https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=262601>>. Acesso em: 5 dez. 2016.
- MOTTA, R. S.; MOREIRA, A. Efficiency and regulation in the sanitation sector in Brazil. **Utilities Policy**, v. 14, n. 3, p. 185-195, 2006.
- MSPC. **MSPC informações técnicas**. Disponível em: <<http://www.mspc.eng.br/termo/termo0530.shtml>>. Acesso em: 14 out. 2016.
- MUSTAFA, S. S.; MUSTAFA, S. S.; MUTLAG, A. H. Kirkuk municipal waste to electrical energy. **Electrical Power and Energy Systems**, n. 44, p. 506–513, 2013.

NOGUEIRA, B. F. **Aproveitamento energético dos resíduos urbanos**: utilização do biogás gerado em aterros sanitários. 2013. 78 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.

NOZAKI, V. T. **Análise do setor de saneamento básico do Brasil**. 2007, 109 f. Dissertação (Mestrado em Economia Aplicada) – Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2007.

NUNES, E.; RIBEIRO, L. M.; PEIXOTO, L. V. **Agências reguladoras no Brasil**. Rio de Janeiro: Observatório Universitário, 2007. (Documento de trabalho n. 65).

OKOLI, C.; SCHABRAM, K. A guide to conducting a systematic literature review of information systems research. **Sprouts: Working Papers on Information Systems**, v. 10, n. 26, p. 1-51, 2010.

OLIVEIRA, E. M.; CARDOSO, T. **Potencial de produção de energia elétrica a partir de biogás gerado em aterros sanitários no estado do Espírito Santo**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2017. (Em fase de publicação).

OLIVEIRA, L. B.; ROSA, L. P. Brazilian waste potential: energy, environmental, social and economic benefits. **Energy Policy**, n. 31, p. 1481-1491, 2003.

OLIVEIRA, L. B.; ARAUJO, M. S. M.; ROSA, L. P.; BARATA, M.; ROVERE, E. L. L. Analysis of the sustainability of using wastes in the Brazilian power industry. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 12, p. 883-890, 2008.

OLIVEIRA, L. B.; HENRIQUES, R. M.; PEREIRA JR., A. O. Use of wastes as option for the mitigation of CO<sub>2</sub> emissions in the Brazilian power sector. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 14, p. 3247-3251, 2010.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Mapas do SIN**. Brasília, 2015. Disponível em: <[http://www.ons.org.br/conheca\\_sistema/mapas\\_sin.aspx](http://www.ons.org.br/conheca_sistema/mapas_sin.aspx)>. Acesso em: 13 jul. 2016.

ORGANIZAÇÃO PARA A COOPERAÇÃO E DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO. **Recommendation of the council of the OECD on improving the quality of government regulation**. Paris, 1995. Disponível em: <[http://www.oecd.org/olis/1995doc.nsf/LinkTo/OCDE-GD\(95\)95](http://www.oecd.org/olis/1995doc.nsf/LinkTo/OCDE-GD(95)95)>. Acesso em: 11 mar. 2016.

ORGANIZAÇÃO PARA A COOPERAÇÃO E DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO. **The OECD report on regulatory reform – synthesis**. Paris, 1997. Disponível em: <<http://www.oecd.org/regreform/regulatory-policy/2391768.pdf>>. Acesso em: 20 jun. 2016.

\_\_\_\_\_. **Países membros**. Disponível em:

<<http://www.oecd.org/about/membersandpartners/#d.en.194378>>. Acesso em: 28 out. 2016.

PARASKAKI, I.; LAZARIDIS, M. Quantification of landfill emissions to air: a case study of the Ano Liosia landfill site in the greater Athens area. **Waste Management & Research**, n. 23, p. 199–208, 2005.

PAVAN, M. C. O. **Geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos: avaliação e diretrizes para tecnologias potencialmente aplicáveis no Brasil**. 2010. 187 f. Tese (Doutorado em Energia) – Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

PECORA, V. **Implantação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residencial da USP: estudo de caso**. 2006. 153 f. Dissertação (Mestrado em Energia) – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia do Instituto de Eletrotécnica e Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

PECORA, V.; FIGUEIREDO, N. J. V.; COELHO, S. T.; VELÁZQUEZ, S. M. S. G. Conversão energética do biogás: estudo de caso em São Paulo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AGROENERGIA, 1., 2008, Botucatu. **Anais eletrônicos...** Botucatu: SIAGRE, 2008. Disponível em: <[http://143.107.4.241/download/publicacoes/biogas\\_siagre2008.pdf](http://143.107.4.241/download/publicacoes/biogas_siagre2008.pdf)>. Acesso em: 10 out. 2016.

PECORA, V.; GRISOLI, R.; CORTEZ, C. L.; MORENO, M.; BRAUNE, A.; LIMA, A.; COELHO, S.; NOGUEIRA, A. R. L.; FERNANDES, E. D.; SILVA, G. A.; SCHOTT, A. K. E. B. S. Comparação do desempenho ambiental de alternativas para a destinação de resíduos sólidos urbanos com aproveitamento energético. In: CONGRESSO BRASILEIRO EM GESTÃO DO CICLO DE VIDA DE PRODUTOS E SERVIÇOS, 3., 2012, Maringá. **Anais...** Maringá: ABCV, 2012.

PIECHOTA, G.; SKI, B. I.; BUCZKOWSKI, R. Development of measurement techniques for determination main and hazardous components in biogas utilised for energy purposes. **Energy Conversion and Management**, n. 68, p. 219-226, 2013.

PILAVACHI, P. A. Mini and micro-gas turbines for combined heat and power. **Applied Thermal Engineering**, v. 22, p. 2003-2014, 2002.

PINCETL, S. Nature, urban development and sustainability – what new elements are needed for a more comprehensive understanding? **Cities**, n. 29, p. 32–37, 2012.

PINDYCK, R. S.; RUBINFELD, D. L. **Microeconomia**. 2. ed. São Paulo: Macmillan, 1992.

PINHEIRO, G.; RENDEIRO, G.; PINHO, J.; MACEDO, E. Sustainable management model for rural electrification: case study based on biomass solid waste considering the Brazilian regulation policy. **Renewable Energy**, n. 37, p. 379-386, 2012.

PINTO JR., H. Q.; PIRES, M. C. P. **Assimetria de informações e problemas regulatórios**. Rio de Janeiro: Agência Nacional do Petróleo, 2000. (Nota Técnica, 9). Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/wwwanp/?dw=1992>>. Acesso em: 2 fev. 2015.

PIRES, J. C. L. **Políticas regulatórias no setor de energia elétrica: a experiência dos Estados Unidos e da União Europeia**. Rio de Janeiro: [s.n.], 1999. (Texto para discussão 73).

POLETTI, M.; DE MORI, P. R.; SCHNEIDER, V. E.; ZATTERA, A. Urban waste management in Caxias do Sul/Brazil: practices and challenges. **Journal of Urban and Environmental Engineering**, v. 10, n. 1, p. 50-56, 2016.

POSNER, R. A. **Theories of economic regulation**. New York: Center for Economic Analysis of Human Behavior and Social Institutions, 1974. (Working Paper n. 41).

\_\_\_\_\_. Taxation by regulation. In: JOSKOW, P. L. **Economic regulation**. Cheltenham UK: Edward Elgar, 2000.

\_\_\_\_\_. **Regulation vs. litigation: perspectives from economics and law**. Chicago: University of Chicago Press, 2010.

POSSAS, M. L.; PONDÉ, J. L.; FAGUNDES, J. **Regulação da concorrência nos setores de infraestrutura no Brasil: elementos para um quadro conceitual**. Rio de Janeiro: Instituto de Economia da UFRJ, 1997. Disponível em: <[http://www.ie.ufrj.br/grc/pdfs/regulacao\\_da\\_concorrenca\\_nos\\_setores\\_de\\_infraestrutura\\_no\\_brasil.pdf](http://www.ie.ufrj.br/grc/pdfs/regulacao_da_concorrenca_nos_setores_de_infraestrutura_no_brasil.pdf)>. Acesso em: 12 jun. 2016.

POTTMAIER, D.; MELO, C. R.; SARTOR, M. N.; KUESTER, S.; AMADIO, T. M.; FERNANDES, C. A. H.; MARINHA, D.; ALARCON, O. E. The Brazilian energy matrix: from a materials science and engineering perspective. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 19, p. 678-691, 2013.

PROENÇA, J. D.; PRADO, C. E. R.; (Org.). **Melhoria da regulação no Brasil: o papel da participação e do controle social**. Brasília: Presidência da República, 2011.

PROJETO BRASIL-ALEMANHA DE FOMENTO AO APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE BIOGÁS NO BRASIL. **Barreiras e propostas de soluções para o mercado de biogás no Brasil**. Brasília, 2016. Disponível em: <[https://www.giz.de/en/downloads/giz\\_barreiras\\_digital\\_simples.pdf](https://www.giz.de/en/downloads/giz_barreiras_digital_simples.pdf)>. Acesso em: 17 out. 2016.

QDAIS, H. A.; HANI, K. B.; SHATNAWI, N. Modeling and optimization of biogas production from a waste digester using artificial neural network and genetic algorithm. **Resources, Conservation and Recycling**, n. 54, p. 359-363, 2010.

RASI, S. **Biogas composition and upgrading to biomethane**. 2009. 76 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas e Ambientais) – Faculdade de Matemática e Ciências, Universidade de Jyväskylä, Jyväskylä, Finlândia, 2009.

RAUSCHMAYER, H.; GALDINO, M. A. Os impactos da regulamentação Aneel/482 e da legislação tributária no retorno financeiro de sistemas fotovoltaicos conectados à rede. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 5., 2014, Recife. **Anais Eletrônicos...** Recife: UFPE, 2014.

REN21. **Global status report 2015**. 2015. Disponível em: <<http://www.ren21.net/status-of-renewables/global-status-report/>>. Acesso em: 20 out. 2016.

RIO DE JANEIRO (Estado). **Deliberação Agenera nº 257, de 24 de junho de 2008**. Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: <<http://www.agenera.rj.gov.br/>>. Acesso em: 5 dez. 2016.

\_\_\_\_\_. **Lei nº 6.361, de 18 de dezembro de 2012**. Rio de Janeiro, 2012.

Disponível em:

<<http://alerjln1.alerj.rj.gov.br/CONTLEI.NSF/e9589b9aabd9cac8032564fe0065abb4/f0294f2b42bc949483257ada00673a4a?OpenDocument>>. Acesso em: 13 jun. 2016.

RÍO, P. D.; LINARES, P. Back to the future? Rethinking auctions for renewable electricity support. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 35, p. 42-56, 2014.

ROVERE, E. L. L.; SOARES, J. B.; OLIVEIRA, L. B.; LAURIA, T. Sustainable expansion of electricity sector: sustainability indicators as an instrument to support decision making. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 14, p. 422-429, 2010.

SAIANI, C. C. S.; TONETO JR., R. Evolução do acesso a serviços de saneamento básico no Brasil (1970 a 2004). **Economia e Sociedade**, Campinas, v. 19, n. 1, p. 79-106, abr. 2010.

SALGADO, L. H. **Agências regulatórias na experiência brasileira: um panorama do atual desenho institucional**. Rio de Janeiro: IPEA, 2003. (Texto para Discussão n. 941).

SALGADO, L. H.; MOTTA, R. S. **Marcos regulatórios no Brasil: o que foi feito e o que falta fazer**. Rio de Janeiro: IPEA, 2005.

SALINO, P. J. **Energia eólica no Brasil: uma comparação do Proinfa e dos novos leilões**. 2011. 110 f. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

SALOMÃO FILHO, C. **Regulação da atividade econômica**. São Paulo: Malheiros, 2001.

SALOMON, K. R.; LORA, E. E. S. Estimate of the electric energy generating potential for different sources of biogas in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, n. 33, p. 1101-1107, 2009.

SANTOS, G. G. D. **Análise e perspectivas de alternativas de destinação dos resíduos sólidos urbanos: o caso da incineração e da disposição em aterro.** 2011. 208 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) – Programa de Pós-Graduação em Planejamento Energético da COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

SÃO PAULO (Estado). **Decreto nº 58.659, de 4 de dezembro de 2012.** São Paulo, 2012. Disponível em: <<http://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/decreto/2012/decreto-58659-04.12.2012.html>>. Acesso em: 11 jun. 2016.

SCHARFF, H.; JACOBS, J. Applying guidance for methane emission estimation for landfills. **Waste Management**, n. 26, p. 417-429, 2006.

SCHELL, K.; CLARO, J.; FISCHBECK, P. Geographic attribution of an electricity system renewable energy target: local economic, social and environmental tradeoffs. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 50, p. 884-902, 2015.

SCS ENERGY. **Assesment report:** Marca Ambiental landfill. Vitória, 2013.

SHARIATZADEH, F.; MANDAL, P.; SRIVASTAVA, A. K. Demand response for sustainable energy systems: a review, application and implementation strategy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 45, p. 343-350, 2015.

SIKKEMA, R.; FAAIJ, A. P. C.; RANTA, T.; HEINIMO, J.; GERASIMOV, Y. Y.; KARJALAINEN, T.; NABUURS, G. J. Mobilization of biomass for energy from boreal forests in Finland & Russia under present sustainable forest management certification and new sustainability requirements for solid biofuels. **Biomass and Bioenergy**, n. 71, p. 23-36, 2014.

SILVA FILHO, C. R. V. **Gestão de resíduos sólidos no Brasil: situação e perspectivas.** São Paulo: ABRELPE, 2010.

SILVA, R. C.; NETO, I. M.; SEIFERT, S. S. Electricity supply security and the future role of renewable energy sources in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 59, p. 328-341, 2016.

SIMÕES, P.; PIRES, J. S.; MARQUES, R. C. Regulação do serviço de resíduos sólidos em Portugal. **Engenharia Sanitária Ambiental**, Lisboa, v. 18, n. 2, p. 149-157, 2013.

SMEETS, E. M. W.; FAAIJ, A. P. C.; LEWANDOWSKI, I. M.; TURKENBURG, W. C. A bottom-up assessment and review of global bio-energy potentials to 2050. **Progress in Energy and Combustion Science**, n. 33, p. 56-106, 2007.

SORRELL, S. Reducing energy demand: a review of issues, challenges and approaches. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 47, p. 74-82, 2015.

SOUZA, G. A.; PAULA, A. A. H. A regulação como fator fundamental para a transformação do atual cenário de gestão integrada de resíduos sólidos urbanos -

estudo de caso: Minas Gerais, Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE REGULAÇÃO, 9., 2015, Brasília. **Anais Eletrônicos...** Brasília: Abar, 2015.

SRINIVASAN, K. K.; MAGO, P. J.; KRISHNAN, S. R. Analysis of exhaust waste heat recovery from a dual fuel low temperature combustion engine using an organic rankine cycle. **Energy**, n. 35, p. 2387-2399, 2010.

STIGLER, G. J. The theory of economic regulation. **Bell Journal of Economics and Management Science**, v. 2, n. 1, p. 3-21, 1971.

SZKLO, A. S.; TOLMASQUIM, M. T. Strategic cogeneration: fresh horizons for the development of cogeneration in Brazil. **Applied Energy**, v. 69, n. 4, p. 257-268, 2001.

THOMPSON, S.; SAWYER, J.; BONAM, R.; VALDIVIA, J. E. Building a better methane generation model: validating models with methane recovery rates from 35 Canadian landfills. **Waste Management**, n. 29, p. 2085-2091, 2009.

TOLMASQUIM, M.; GORINI, R.; CAMPOS, A. **As empresas do setor elétrico brasileiro: estratégias e performance**. Rio de Janeiro: Cenergia, 2002.

TOLMASQUIM, M. T. **Novo modelo do setor elétrico brasileiro**. 2. ed. Rio de Janeiro: Synergia, 2015.

TONETO JR., R.; SAIANI, C. C. S. Regulação econômica dos serviços de saneamento básico. In: PHILIPPI JR., Arlindo (Coord.). **Gestão do saneamento básico: abastecimento de água e esgotamento sanitário**. Barueri (SP): Manole, 2012. p. 541-556.

TRIGUEIRO, A. Transformação de lixo em energia já é realidade no Brasil. **Jornal da Globo**, Rio de Janeiro, 28 fev. 2013. Disponível em: <<http://g1.globo.com/jornal-da-globo/noticia/2013/03/projetos-de-producao-de-biogas-no-brasil-comecam-funcionar.html>>. Acesso em: 28 jun. 2015.

TUPPER, H. C.; RESENDE, M. Efficiency and regulatory issues in the Brazilian water and sewage sector: an empirical study. **Utilities Policy**, v. 12, n. 1, p. 29-40, 2004.

TURKENBURG, W. C. (Coord.). **Renewable energy technologies in world energy assessment of the United Nations**. New York: UNDP, 2000.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Landfill gas emissions model (LandGEM): version 3.02 user's guide**. 2005. Disponível em: <<http://www3.epa.gov/ttnecatc1/dir1/landgem-v302-guide.pdf>>. Acesso em: 10 nov. 2015.

\_\_\_\_\_. **LFG Energy Project Development Handbook**. 2015. Disponível em: <[http://www3.epa.gov/lmop/documents/pdfs/pdf\\_full.pdf](http://www3.epa.gov/lmop/documents/pdfs/pdf_full.pdf)>. Acesso em: 20 jun. 2016.

VALENTE, V. B. **Análise de viabilidade econômica e escala mínima de uso do biogás de reatores anaeróbios em estações de tratamento de esgoto no Brasil.** 2015. 198 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) – Programa de Pós-Graduação em Planejamento Energético da COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

VARIAN, R. **Microeconomia: princípios básicos.** 2. ed. Rio de Janeiro: Campus, 1997.

VEIGA, A. P. B. **Contribuição à avaliação das barreiras e oportunidades regulatórias, econômicas e tecnológicas do uso de biometano a partir de gás de aterro no Brasil.** 2016. 173 f. (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Energia do Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

VOJNOVIC, I. Research, politics, policy and practice. **Cities**, n. 41, p. S30-S44, 2014.

WILKEN, L. M. S. **A regulação dos serviços de esgotamento sanitário no Espírito Santo a partir da Lei nº 11.445/2007: uma análise do papel do controle externo para a efetivação do planejamento e da universalização do acesso.** 2017. 195 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2017.

WORLD BIOENERGY ASSOCIATION. **WBA global bioenergy statistics 2015.** Disponível em: <<http://www.worldbioenergy.org/content/wba-gbs>>. Acesso em: 4 ago. 2016.

\_\_\_\_\_. **WBA global bioenergy statistics 2016.** Disponível em: <<http://www.worldbioenergy.org/content/wba-gbs>>. Acesso em: 17 set. 2016.

YANG, N.; ZHANG, H.; SHAO, L.; LU, F.; HE, P. Greenhouse gas emissions during MSW landfilling in China: influence of waste characteristics and LFG treatment measures. **Journal of Environmental Management**, n. 129, p. 510-521, 2013.

YIN, R. K. **Estudo de caso: planejamento e métodos.** 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.

ZANETTE, A. L. **Potencial de aproveitamento energético do biogás no Brasil.** 2009. 97 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) – Programa de Pós-Graduação em Planejamento Energético da COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

ZGLOBISZ, N.; CASTILLO, A. C.; GRIMES, S.; JONES, P. Influence of UK energy policy on the deployment of anaerobic digestion. **Energy Policy**, n. 38, p. 5988-5999, 2010.

ZHENG, C. W.; PAN, J. Assessment of the global ocean wind energy resource. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 33, p. 382-391, 2014.



ZHOU, H.; MENG, A.; LONG, Y.; LI, Q.; ZHANG, Y. An overview of characteristics of municipal solid waste fuel in China: physical, chemical, composition and heating value. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 36, p. 107-122, 2014.



Vitória - ES, 17 de Novembro de 2016.

Memo nº 150/2016 – LAGESA



O Laboratório de Gestão Ambiental (LAGESA), lotado no Centro Tecnológico (CT) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), criado pela Portaria nº 1310, de 09 de junho de 2014, tem desempenhado atividades de apoio na elaboração de políticas públicas relacionadas ao Saneamento Ambiental em conjunto com o Programa de Pós-graduação em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável (PPGES) - CT/UFES.

Uma de nossas atuais pesquisas visa realizar um levantamento sobre as principais questões referentes ao reaproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos por meio do biogás gerado em aterros que servem ao Estado do Espírito Santo. Nossa intenção é mapear as usinas em operação no Brasil a fim de verificar os parâmetros técnicos e regulatórios para auxiliar no direcionamento do que está sendo calculado e analisado na pesquisa. E, para tanto, temos entrado em contato com as usinas e solicitado resposta ao questionário por meio de link disponível no e-mail enviado. Assim, solicitamos preenchimento do questionário até 25/11/2016.

As informações e os dados repassados por este formulário estarão sob total sigilo, interessando apenas como fonte para elaboração de estudos acadêmicos. A divulgação de nomes de empresas ou responsáveis técnicos, caso ocorra, se dará apenas com a permissão dos mesmos.

Agradecemos pela colaboração.

Atenciosamente,

Renato Ribeiro Siman

DIRETOR DO LAGESA/CT/UFES

7/12/2016

## APÊNDICE B

**USINAS DE BIOGÁS NO BRASIL**

\*Obrigatório



### **Questionário das Usinas Termelétricas operando com biogás de RSU no Brasil**

#### **Apresentação**

O Questionário apresentado a seguir faz parte de um Projeto de Pesquisa elaborado pelo Laboratório de Gestão em Saneamento Ambiental (Lagesa) da Universidade Federal do Espírito Santo (Ufes) que busca levantar dados e informações sobre as usinas termelétricas que operam com biogás de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) no Brasil, servindo de base para elaboração de dissertação de mestrado, na área de Gestão e Gerenciamento de Resíduos Sólidos para geração de energia.

As informações e os dados repassados por este formulário estarão sob total sigilo, interessando apenas como fonte para elaboração de estudos acadêmicos. A divulgação de nomes de empresas ou responsáveis técnicos, caso ocorra, se dará apenas com a permissão dos mesmos.

Favor responder até 05/01/2017.

#### **Dados Gerais**

Dados de Identificação e Contato com a Usina.

\* - Resposta obrigatória

1. Nome da Usina \*
  
2. Data de operação da usina de energia \*  
*Exemplo: 15 de dezembro de 2012*
  
3. Data de operação do aterro  
*Exemplo: 15 de dezembro de 2012*
  
4. Nome e Cargo do Responsável pelo Preenchimento do Questionário \*

12/2016

USINAS DE BIOGÁS NO BRASIL

5. E-mail \*

---

6. Telefone \*

---

7. Endereço \*

---

## QUESTIONÁRIO TÉCNICO

INFORMAÇÕES TÉCNICAS - Questionário contendo 10 perguntas sobre a parte técnica

8. 1- Qual a estimativa prevista no projeto de geração de gás? \*

---

---

---

9. 2- Qual a estimativa prevista no projeto de captação de gás? \*

---

---

---

10. 3- A quantidade estimada no projeto de captação de gás foi a mesma da obtida? (Se a resposta for não, favor informar a quantidade obtida). \*

---

---

---

11. 4- A quantidade estimada no projeto de geração de gás foi a mesma da obtida? (Se a resposta for não, favor informar a quantidade obtida).

---

12. 5- Mantém registro da produção de biogás por tonelada de resíduo aterrado? (Se sim, favor informar o valor mínimo, médio e máximo)

---

12/2016

USINAS DE BIOGÁS NO BRASIL

13. 6- Qual a quantidade atual da produção de biogás? (kWh/Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> ou kWh/Nm<sup>3</sup> biogás)  
\*

14. 7- Quais as perdas na coleta e transferência do gás? (Se possível, enviar o relatório de estudo via email) \*

15. 8- Qual a tecnologia utilizada? \*

*Marque todas que se aplicam.*

- Motores a gás do tipo ciclo Otto
- Motores a gás do tipo ciclo Diesel
- Turbinas a gás (Médio porte)
- Microturbinas a gás (Pequeno porte)
- Outro: \_\_\_\_\_

16. 9- Quais as especificações da tecnologia utilizada (dados do motor, quantidade, marca, etc.)?

17. 10 - Qual a eficiência na conversão de biogás para eletricidade (Se possível, informar unidades kWh/Nm<sup>3</sup> biogás ou kWh/Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>) \*

## QUESTIONÁRIO GERAL

INFORMAÇÕES GERAIS - Questionário contendo 5 perguntas gerais organizadas de forma breve para facilitar o preenchimento.

18. 1- Houve empresa responsável pela elaboração do projeto de aproveitamento energético da usina? Qual?

12/2016

USINAS DE BIOGÁS NO BRASIL

**19. 2- Qual o objetivo da produção de energia (pode marcar mais de uma opção)? \****Marque todas que se aplicam.*

- Injeção na rede de energia elétrica
- Venda de energia elétrica no mercado livre
- Venda de energia elétrica no mercado regulado
- Autoconsumo de energia elétrica
- Venda de CER's (Certificado de Emissões Reduzidas)
- Abastecer grandes e médias empresas interligadas ao sistema elétrico
- Outro: \_\_\_\_\_

**20. 3- A usina também produz combustível veicular?***Marcar apenas uma oval.*

- Sim
- Não
- Outro: \_\_\_\_\_


**21. 4- A usina possui algum tipo de incentivo ? \****Marcar apenas uma oval.*

- Sim
- Não
- Outro: \_\_\_\_\_

**22. 5- Se a resposta anterior for sim, qual o tipo de incentivo?***Marque todas que se aplicam.*

- Redução das tarifas TUSD/TUST (Resolução ANEEL n° 271/2007)
- Redução por comercialização com fonte biomassa (Resolução ANEEL n° 376/2009)
- Regime Especial de Incentivos para o Desenvolvimento da Infraestrutura (REIDI/Lei n° 11.488/2007)
- Lei do Bem (Lei 11.196/2005)
- Legislação local
- Outro: \_\_\_\_\_

Powered by

 Google Forms