



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
Programa de Pós-Graduação em Ciências e Técnicas Nucleares
Departamento de Engenharia Nuclear

Wemerson Rocha Ferreira

**ANÁLISE DO POTENCIAL ENERGÉTICO TERRITORIAL DO BIOGÁS
PROVENIENTE DE ATERROS SANITÁRIOS PARA INSERÇÃO NA MATRIZ
ELÉTRICA DO ESTADO DE MINAS GERAIS NO HORIZONTE DE 2050**

Belo Horizonte
2018

Wemerson Rocha Ferreira

ANÁLISE DO POTENCIAL ENERGÉTICO TERRITORIAL DO BIOGÁS
PROVENIENTE DE ATERROS SANITÁRIOS PARA INSERÇÃO NA MATRIZ
ELÉTRICA DO ESTADO DE MINAS GERAIS NO HORIZONTE DE 2050

Dissertação apresentada ao
Departamento de Engenharia Nuclear da
Escola de Engenharia da Universidade
Federal de Minas Gerais como requisito
parcial para a obtenção do grau de Mestre
em Ciências e Técnicas Nucleares.

Orientadora: Antonella Lombardi Costa

Coorientadora: Bruna Fátima P. Guedes
Flausino

Belo Horizonte
2018

F383a

Ferreira, Wemerson Rocha.

Análise do potencial energético territorial do biogás proveniente de aterros sanitários para inserção na matriz elétrica do estado de Minas Gerais no horizonte de 2050 [manuscrito] / Wemerson Rocha Ferreira. - 2018.
162 f., enc.: il.

Orientadora: Antonella Lombardi Costa.

Coorientadora: Bruna Fátima Pedrosa Guedes Flausino.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais,
Escola de Engenharia.

Anexos e apêndices: f. 152-162.

Bibliografia: f. 135-151.

1. Engenharia nuclear - Teses. 2. Biogás - Teses. 3. Resíduos sólidos urbanos - Teses. 4. Aterro sanitário - Teses. I. Costa, Antonella Lombardi. II. Flausino, Bruna de Fátima Pedrosa Guedes. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 621.039(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES



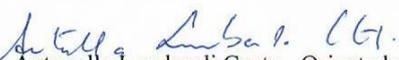
FOLHA DE APROVAÇÃO

**ANÁLISE DO POTENCIAL ENERGÉTICO TERRITORIAL DO BIOGÁS
PROVENIENTE DE ATERROS SANITÁRIOS PARA INSERÇÃO NA MATRIZ
ELÉTRICA DO ESTADO DE MINAS GERAIS NO HORIZONTE DE 2050**

WEMERSON ROCHA FERREIRA

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES, área de concentração ENGENHARIA NUCLEAR E DA ENERGIA.

Aprovada em 24 de janeiro de 2018, pela banca constituída pelos membros:


Profa. Antonella Lombardi Costa - Orientadora
Departamento de Engenharia Nuclear - UFMG


Profa. Bruna de Fátima Pedrosa Guedes Flausino - Coorientadora
UFOP


Prof. Gustavo Ferreira Simões
Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - UFMG


Dra. Maria Elizabeth Scari
Departamento de Engenharia Nuclear - UFMG

Belo Horizonte, 24 de janeiro de 2018.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos que lutam pelos avanços técnico-científicos em favor dos menos favorecidos e de um mundo melhor, mais justo e igualitário!

Aos meus pais e irmãs, à minha família, amigos e a todos os que perseveram na esperança de um mundo melhor!

Dedico à minha amada esposa Fabiola e ao nosso filho João Miguel, que está chegando, desejando que ele possa conhecer um mundo mais consciente e solidário!

“Totus tuus Mariae”!

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, e acima de tudo, ao bom DEUS pelo privilégio que me foi dado, por ter me dado dons e tudo quanto necessário e o suficiente para que eu pudesse caminhar e concluir esta etapa, com a clareza de perceber e atentar para a relevância do tema que faz parte, em profundidade, da vida contemporânea.

Ao meu pai (João) e minha mãe (Maria Lúcia) pela preocupação, orientação, dedicação e incentivo em todas as fases da minha vida e pelo amor sempre dedicado e concreto.

Às minhas amadas irmãs (Thaís e Laura) pela companhia de sempre e a parceria que não se desfaz, vocês foram um grande incentivo para eu chegar até o fim!

Aos meus familiares e amigos pela compreensão, atenção, incentivo, preces, sorrisos e abraços, cada um na medida necessária!

À amiga Me. Livia Maria Leite da Silva pelo companheirismo e o auxílio necessário na utilização do software ArcGis e outras consultorias técnicas.

Aos amigos de fé, porque a fé não falha!

De forma especial, à minha amadíssima esposa Fabiola, que esteve ao meu lado sempre e em todo momento, com sua presença reconfortante e fortalecedora! E ao meu filho João Miguel que está chegando... A notícia de sua vinda foi um grande combustível na etapa final deste processo!

À minha orientadora, Prof^a. Dr^a. Antonella Lombardi Costa, por ter me recebido de braços abertos, pela oportunidade, orientação, incentivo e apoio em todos os momentos necessários no desenvolvimento dessa dissertação.

À minha co-orientadora, Prof^a. Dr^a. Bruna Fátima P. Guedes Flausino, por acreditar na proposta do trabalho, pelo incentivo e co-orientação.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências e Técnicas Nucleares – PCTN da Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, por me proporcionar esse aprendizado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo auxílio e apoio financeiro, essenciais no atendimento às necessidades logísticas deste processo.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Aos professores do PCTN, especialmente os professores Drs. Maria Auxiliadora Fortini Veloso e Ricardo Brant Pinheiro pelos gratos momentos de convívio e aprendizado em sala de aula.

À todos os colegas que cruzaram seus caminhos com o meu, nesse processo enriquecedor e desafiador para a pesquisa e elaboração desta dissertação.

Àqueles que acreditaram em mim, muito obrigado!

*“Fiat voluntas Tua[...]”
(Mateus 6, 10)”*

*“Não há lugar para a sabedoria onde não há paciência”.
(Santo Agostinho)*

*“Não basta ensinar ao homem uma especialidade, porque se tornará assim uma máquina utilizável e não uma personalidade. É necessário que adquira um sentimento, um senso prático daquilo que vale a pena ser empreendido, do que é belo e moralmente correto”.
(Albert Einstein)*

Resumo

Geralmente, verifica-se que os processos de urbanização ocorreram de forma desordenada, especialmente nos países em desenvolvimento, e são caracterizados como uma das formas mais agressivas de interação humana com o meio ambiente. O crescimento da população e a crescente urbanização no mundo exigem mais serviços de energia e de infraestrutura, como o gerenciamento adequado de resíduos. No Estado de Minas Gerais, que é composto por 853 municípios organizados em 17 Territórios de Desenvolvimento, cerca de 85,3% da população total vive em cidades, deixando clara a necessidade de um bom gerenciamento de recursos, especialmente recursos energéticos, e disposição adequada de resíduos sólidos urbanos (RSU), uma vez que os padrões e os níveis de consumo tendem a aumentar cada vez mais. Neste contexto, insere-se o potencial de aproveitamento energético do biogás proveniente da digestão anaeróbia de RSU em aterros sanitários, unindo soluções para gestão de RSU e geração de energia elétrica. Assim, os sistemas de biogás podem contribuir para uma diversificação das fontes de energia na matriz elétrica, desempenhando um papel importante principalmente na produção de eletricidade em momentos em que a demanda é maior que a oferta do Sistema Interligado Nacional - SIN. Assim, com base na metodologia do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, é apresentado um estudo teórico da capacidade de geração de biogás e seu potencial para gerar eletricidade. Desta forma, este trabalho apresenta uma contextualização da produção de biogás de aterro no Estado de Minas Gerais e realiza uma projeção do potencial total de geração de energia elétrica a partir desta fonte de cada um dos dezessete Territórios de Desenvolvimento do estado. Foram consideradas quatro rotas tecnológicas para conversão energética de biogás em eletricidade, a saber: motores de combustão interna do "ciclo Otto", motores diesel (diesel + biogás), turbinas a gás e microturbinas. Como resultado, o território que apresentou maior potencial de geração de RSU no ano de horizonte deste trabalho (2050) foi o Metropolitano, com 3.562.979,42 t_{RSU}/ano, com potencial de geração de 456.740.360 m³_{CH4}/ano; ao passo que o território com menor potencial de geração, em 2050, foi o território Central, 65.072,45 t_{RSU}/ano, com potencial de geração de 8.341.675 m³_{CH4}/ano. Ainda, de 2010 a 2050, o território que teve maior taxa de crescimento foi o do Vale do Aço, e o de menor taxa de crescimento foi o do Vale do Rio Doce. Quanto ao potencial de geração de eletricidade, os resultados obtidos demonstram valores de geração de até 2.237,06 MWh/dia em 2050, para o Território Metropolitano, sendo a rota tecnológica do motor de combustão interna a que apresenta maior eficiência de conversão.

Palavras-chave: *Biogás, Resíduos Sólidos Urbanos, Aterro Sanitário, Potencial Energético.*

Abstract

Generally, urbanization processes have occurred in a disorderly way, especially in developing countries, and are characterized as one of the most aggressive forms of human interaction with the environment. Population growth and increasing urbanization in the world require more energy and infrastructure services, such as adequate waste management. In the State of Minas Gerais, which consists of 853 municipalities organized in 17 Development Territories, about 85.3% of the total population live in cities, making clear the need for good management of resources, especially energy resources, and adequate provision of municipal solid waste (MSW), as consumption patterns and levels tend to increase more and more. In this context, the potential of energy utilization of biogas from the anaerobic digestion of USW in landfills, joining solutions for MSW management and generation of electric energy, is inserted. Thus, biogas systems can contribute to a diversification of energy sources in the electric matrix, playing an important role mainly in the production of electricity at times when demand is higher than the *Sistema Interligado Nacional* – SIN (National Interconnected System - NIS) supply. Thus, based on the methodology of the Intergovernmental Panel on Climate Change, a theoretical study of the generation capacity of biogas and its potential to generate electricity is presented. In this way, this work presents the State of the Art of the production of landfill biogas in the State of Minas Gerais and performs a projection of the total potential of electric power generation from this source in each of the seventeen Development Territories of the state. Four technological routes for energy conversion of biogas into electricity were considered, namely: "Otto cycle" internal combustion engines, diesel engines (diesel + biogas), gas turbines and microturbines. As a result, the Metropolitan Territory, with 3,562,979.42 t_{MSW}/year, with a generation potential of 456,740,360 m³_{CH₄}/year, was the territory with the highest MSW generation potential in this year's horizon (2050); while the territory with the lowest potential for generation in 2050 was the Central territory, 65,072.45 t_{MSW}/year, with a generation potential of 8,341,675 m³_{CH₄}/year. Regarding the potential for electricity generation, the results obtained show generation values of up to 2,237.06 MWh/day (Metropolitan Territory) in 2050, the technological route of the internal combustion engine being the one with the highest conversion efficiency.

Keywords: *Biogas, Municipal Solid Waste, Landfill, Energy Potential.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Evolução da população brasileira conforme situação de domicílio.	25
Figura 2.	Comparação da variação da intensidade energética anual para alguns países (em %).	29
Figura 3.	Curva de carga típica residencial.	30
Figura 4.	Curva típica diária de demanda.	31
Figura 5.	A curva de Kuznets para os impactos ambientais e estágios de desenvolvimento.	31
Figura 6.	Evolução da oferta relativa de energia por fonte de geração, de 1973 a 2014.	32
Figura 7.	Evolução do consumo relativo de energia por fonte de geração, de 1973 a 2014.	33
Figura 8.	Composição da matriz de energia elétrica brasileira – novembro de 2017.	34
Figura 9.	Oferta interna de energia elétrica por fonte em 2016.	34
Figura 10.	Evolução da demanda total de energia por fonte até 2050.	35
Figura 11.	Evolução da participação das fontes na demanda total de energia até 2050.	36
Figura 12.	Projeção do consumo total de eletricidade no Brasil, de 2013 a 2050 (TWh).	36
Figura 13.	Emissões anuais globais de GEE antropogênicos de 1970 a 2010 (Gt de CO ₂ -eq/ano).	43
Figura 14.	Evolução das emissões brutas de GEE no Brasil entre 1990 e 2014 (Mt CO ₂ e).	44
Figura 15.	Evolução da participação dos diferentes GEE nas emissões brasileiras entre 1990-2014 (% total em CO ₂ e).	45
Figura 16.	Emissões de GEE por tratamento de resíduos entre 1970 e 2014 (tCO ₂ e).	46
Figura 17.	Estimativa da composição gravimétrica considerando a base de dados coletada em 2008.	63
Figura 18.	Hierarquia para o gerenciamento de RSU com a introdução do conceito de Prevenção da Poluição.	65
Figura 19.	Operações efetuadas na área de resíduos sólidos domiciliares.	66
Figura 20.	Principais técnicas de tratamento e destinação final de RSU no Mundo (em 2012).	70
Figura 21.	Análise qualitativa típica da geração dos principais gases ao longo das fases de degradação em um aterro sanitário.	84
Figura 22.	Processo de formação do biogás em aterro sanitário.	86
Figura 23.	Total de usinas termoeletricas de RSU no Brasil em janeiro de 2017.	89
Figura 24.	Diagrama com as alternativas de aproveitamento do biogás.	90
Figura 25.	Projeção da inserção do biometano para geração distribuída versus potencial teórico.	94

Figura 26.	Projeção da inserção da geração distribuída de biogás.	95
Figura 27.	Evolução das tipologias de destinação final de RSU em Minas Gerais no período de 2001 a 2016.	100
Figura 28.	Territórios de Desenvolvimento e Microterritórios de Minas Gerais.	102
Figura 29.	Área de ocupação e quantidade de municípios dos Territórios de Desenvolvimento de Minas Gerais.	104
Figura 30.	Projeção da população urbana dos Territórios de Desenvolvimento de Minas Gerais – de 1980 a 2050 – Grupo 1.	115
Figura 31.	Projeção da população urbana dos Territórios de Desenvolvimento de Minas Gerais – de 1980 a 2050 – Grupo 2.	115
Figura 32.	Projeção da população urbana dos Territórios de Desenvolvimento de Minas Gerais – de 1980 a 2050 – Grupo 3.	116
Figura 33.	Projeção da produção de RSU total (t/ano) por Território de Desenvolvimento de Minas Gerais – Grupo 1.	117
Figura 34.	Projeção da produção de RSU total (t/ano) por Território de Desenvolvimento de Minas Gerais – Grupo 2.	117
Figura 35.	Projeção da produção de RSU total (t/ano) por Território de Desenvolvimento de Minas Gerais – Grupo 3.	118
Figura 36.	Projeção do potencial de produção de RSU total (t/ano) por Território de Desenvolvimento de Minas Gerais e sua correspondência no total estadual– de 2010 a 2050.	119
Figura 37.	Mapa do potencial de geração de RSU em Minas Gerais no ano de 2050.	120
Figura 38.	Evolução do potencial de produção de biogás considerando um Cenário Otimista – de 2010 a 2050.	122
Figura 39.	Mapa do potencial de geração de biogás em Minas Gerais – Cenário Otimista - 2050.	123
Figura 40.	Evolução do potencial de produção de biogás considerando um Cenário Pessimista– de 2010 a 2050.	124
Figura 41.	Mapa do potencial de geração de biogás em Minas Gerais – Cenário Pessimista - 2050.	125

LISTA DE QUADROS

Quadro 1.	Classificação de resíduos sólidos segundo NBR 10.004.	55
Quadro 2.	Classificação de resíduos sólidos segundo PNRS.	56
Quadro 3.	Principais características químicas dos RSU.	60
Quadro 4.	Principais características físicas dos RSU.	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.	Produção per capita de RSU em kg/dia – conforme extratos populacionais dos municípios brasileiros.	59
Tabela 2.	Perspectivas globais da composição de Resíduos Sólidos Urbanos	63
Tabela 3.	Histórico da destinação final de RSU no Brasil.	70
Tabela 4.	Fases típicas de produção do biogás em um aterro sanitário.	84
Tabela 5.	Peso específico e Poder Calorífico Inferior do biogás de acordo com a concentração volumétrica de metano e dióxido de carbono.	88
Tabela 6.	Comparação das tecnologias de conversão de biogás em eletricidade.	93
Tabela 7.	Evolução da capacidade instalada em Minas Gerais (MW) conforme cenários de referência e alternativo.	98
Tabela 8.	Caracterização sintética dos Territórios de Desenvolvimento de Minas Gerais.	103
Tabela 9.	Cenários de aproveitamento do biogás de aterro para geração de eletricidade.	113
Tabela 10.	Parâmetros dados e calculados para a estimativa de produção de biogás.	121
Tabela 11.	Parâmetros dados e calculados para a estimativa de geração de eletricidade.	126
Tabela 12.	Cenários de potencial de geração de eletricidade à partir da conversão energética de biogás – ano de 2050 - Melhores resultados.	127
Tabela 13.	Cenários de potencial de geração de eletricidade à partir da conversão energética de biogás – ano de 2050 - Piores resultados.	128

LISTA DE SIGLAS

AAF - Autorização Ambiental de Funcionamento
ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
AR5 - *Fifth Assessment Report*
BEIS - *Department for Business, Energy & Industrial Strategy*
BEN - Balanço Energético Nacional
BIG - Banco de Informações de Geração
CONER - Conselho Estadual de Energia
COP - Conferência Mundial do Clima
COPAM - Conselho Estadual de Política Ambiental
COV - Compostos orgânicos voláteis
DN - Deliberação Normativa
DOC - carbono orgânico degradável
EPE - Empresa de Pesquisa Energética
EU - *European Union*
FEAM - Fundação Estadual do Meio Ambiente
GD - Geração Distribuída
GEE - Gases de efeito estufa
GWP - *Global Warming Potential*
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEA - *International Energy Agency*
IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change*
JICA - *Japan International Cooperation Agency*
MCF - Fator de correção de metano
MG - Minas Gerais
MMA - Ministério do Meio Ambiente
MME - Ministério de Minas e Energia
NBR - Norma Brasileira Regulamentadora
NP - Novas políticas
NT - Nota técnica
ONS - Operador Nacional do Sistema
ONU - Organização das Nações Unidas
PCH - Pequena central hidrelétrica
PCI - Poder calorífico inferior
PERS - Política Estadual de Resíduos Sólidos
PIB - Produto Interno Bruto
PMDI - Plano Mineiro de Desenvolvimento Integrado
PNRS - Política Nacional de Resíduos Sólidos
PPAG - Plano Plurianual de Ação Governamental
ppb - Partes por bilhão
ppm - Partes por milhão
PROINFA - Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica

PSGIRS - Plano Simplificado de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos

RSU - Resíduos sólidos urbanos

SIG - Sistema de Informação Geográfica

SIN - Sistema Interligado Nacional

tep - Tonelada equivalente de petróleo

UNCED - *United Nations Conference on Environment and Development*

UNEP - *United Nations Environment Programme*

UNFCCC - *United Nations Framework Convention on Climate Change*

USEPA - *United States Environmental Protection Agency*

UTC - Usina de triagem e compostagem

WB - *World Bank*

WEC - *World Energy Council*

WRI - *World Resources Institute*

WtE - *Waste-to-energy*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Situação problema	17
1.2	Objetivo geral	19
1.3	Estrutura da Dissertação	20
2	REVISÃO DE LITERATURA	22
2.1	O crescimento populacional urbano	22
2.1.1	Aumento da demanda energética.....	27
2.1.2	Aumento da geração de resíduos sólidos.....	37
2.1.3	Aumento das emissões de gases de efeito estufa.....	41
2.1.4	Projeção populacional	47
2.2	Os Resíduos Sólidos Urbanos	50
2.2.1	Definição.....	52
2.2.2	Caracterização dos resíduos sólidos urbanos	57
2.2.3	O tratamento de resíduos sólidos urbanos e sua destinação final	64
2.2.4	Os resíduos sólidos urbanos como fonte de energia renovável	74
2.3	O biogás de aterros sanitários	76
2.3.1	Descoberta do biogás.....	80
2.3.2	Caracterização do biogás	82
2.3.3	Formação do biogás de aterro sanitário	83
2.3.4	Potencial energético do biogás.....	87
2.3.5	Tecnologias de conversão energética do biogás em eletricidade	88
2.3.6	Análise da inserção do biogás no mercado energético nacional	93
3	CARACTERIZAÇÃO DO ESTADO DE MINAS GERAIS	96
3.1	Caracterização geográfica	96

3.2	Comportamento da demanda e oferta de energia.....	97
3.3	Situação da destinação final de RSU em Minas Gerais	98
3.4	Os Territórios de Desenvolvimento	100
4	METODOLOGIA DE TRABALHO	105
4.1	Projeção Populacional.....	105
4.1.1	Taxa de crescimento	106
4.2	Estimativa de produção de RSU	107
4.3	Cálculo do potencial de geração de biogás de aterro	107
4.4	Cálculo da geração de energia elétrica a partir do biogás de aterro	110
4.5	Mapeamento dos resultados	113
5	Resultados e discussões.....	114
6	Conclusões e sugestões	132
	Referências bibliográficas	135
	Apêndices.....	152
	Anexos	158

1 INTRODUÇÃO

A questão energética está fortemente ligada às questões sociais e antropológicas. O estilo de vida de determinada população, seus níveis de acesso a serviços, os índices de renda e emprego, as formas de produção e consumo, dentre outros, são fatores que ditam a sensibilidade de determinada região quanto ao equilíbrio entre oferta e demanda de energia. Assim, a organização da população quanto ao espaço ocupado é um fator crucial na avaliação e/ou planejamento de serviços de energia e de infraestrutura urbana, como a destinação final de resíduos sólidos urbanos - RSU. Isso se deve ao fato das necessidades entre populações rurais e populações urbanas serem distintas entre si. A forma como avançam os processos de urbanização constituem, pois, um ponto importante para a promoção de um desenvolvimento sustentável, que garanta a qualidade de vida das populações. Em uma realidade presente, as mudanças climáticas têm chamado a atenção de governos e indivíduos, sendo que a busca por fontes alternativas e renováveis de energia tem conquistado espaço nas discussões políticas e científicas. Associar uma solução energética à uma solução de infraestrutura urbana parece uma promissora e eficiente alternativa às questões citadas. Embora a ideia da recuperação e aproveitamento energético do biogás de aterro não seja recém-descoberta, carece-se de estudos que fomentem a criação de políticas públicas cujo foco seja o favorecimento da implantação de sistemas de aproveitamento energético do biogás, de modo a atrair investidores, munidos de segurança jurídica, possibilitando a ampliação do filão de negócio que caracteriza a cadeia produtiva do biogás de aterro sanitário.

1.1 Situação problema

Um dos grandes problemas ambientais da atualidade consiste na geração crescente e compulsória de resíduos sólidos urbanos, frente ao crescimento populacional e ao aumento do grau de urbanização desordenada (FEAM, 2016b, p. 12), que, por vezes, não são acompanhados por políticas públicas e medidas sociais capazes de garantir um tratamento e destinação adequada dos RSU produzidos. De acordo com Seibert (2014, p. 11), o crescimento acelerado das cidades, especialmente as de grande

porte, tem tornado escassas as áreas disponíveis para a destinação dos RSU.

A disposição final de resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários deve ser ordenada, de modo que, observando-se as normas operacionais específicas, os impactos ambientais adversos sejam minimizados, evitando-se ao máximo os danos e/ou riscos à saúde pública.

De acordo com Figueiredo (2012, p. 14) quando os resíduos sólidos urbanos são acondicionados sob condições anaeróbias em ambiente redutor, estes sofrem decomposição, sendo que, a partir de sua parcela orgânica, ocorre a liberação de biogás, que é uma mistura gasosa que contém metano, dentre outros gases, sendo que este apresenta alto potencial de aproveitamento energético.

Tendo-se como alternativa o aproveitamento e recuperação energética do biogás gerado pela decomposição anaeróbia dos RSU depositados em aterros sanitários, a utilização de tecnologias para conversão do biogás em eletricidade apresenta-se como sendo uma possível solução de relevância estratégica para impulsionar a erradicação de vazadouros a céu aberto (lixões), contribuindo para a efetivação de políticas públicas sustentáveis. Desta forma, o aproveitamento do biogás originado dos processos de digestão anaeróbia que ocorrem em aterros sanitários apresenta um potencial de contribuição na minimização de emissões de gases de efeito estufa – GEE. Esta alternativa torna-se ainda mais atrativa quando, em uma visão holística, destacam-se as contribuições e melhorias para a segurança energética, incrementando a geração de energia elétrica e térmica de fonte renovável descentralizada (geração distribuída – GD), bem como o aumento das taxas de autossuficiência no tratamento de RSU, na geração de energia e na utilização dos recursos (ZGLOBISZ *et al.*, 2010 p. 5988).

Diante deste contexto, este trabalho se propôs a apresentar o potencial teórico de geração de energia elétrica a partir do aproveitamento energético de biogás de aterro, considerando-se a projeção da geração de resíduos sólidos urbanos nos dezessete Territórios de Desenvolvimento Econômico e Social do Estado de Minas Gerais. Este modelo de divisão regional do Estado, definido pelo Decreto 46.774 do Governo do Estado de Minas Gerais e em vigor desde o dia 09 de junho de 2015 (MINAS GERAIS, 2015, p. 1), tem como pretensão a valorização dos atributos regionais comuns de cada agrupamento territorial, tratando as demandas e potencialidades características de cada território com equidade (CASTRO, 2015, p. 1).

Assim, sob esta perspectiva, este estudo apresenta-se com a seguinte pergunta norteadora: “Qual o potencial de aproveitamento energético do biogás de aterro no Estado de Minas Gerais?”

1.2 Objetivo geral

No intuito de responder de forma concisa e clara à pergunta norteadora exposta, o principal objetivo deste trabalho consiste em apresentar o estado da arte sobre a produção de biogás, proveniente da decomposição de resíduos sólidos urbanos depositados em aterros sanitários, no Estado de Minas Gerais. Pretende-se, com isso, mostrar seu potencial para geração de energia elétrica, tendo como premissa o suprimento energético como uma questão estratégica, uma vez que se trata de robustecer as garantias de segurança energética do Estado e promover a diversificação de sua matriz energética. Visa ainda apresentar subsídios que contribuam com o desenvolvimento de uma estrutura de planejamento energético para Minas Gerais, além de referência estratégica ao Estado, bem como à União e demais atores públicos e privados que tenham interface com as tomadas de decisão e políticas públicas no âmbito energético e de desenvolvimento sustentável.

De forma geral, o objetivo pode ser descrito como:

- Identificar o potencial de geração de biogás proveniente da decomposição de resíduos sólidos urbanos depositados em aterros sanitários;
- Caracterizar este potencial conforme os dezessete Territórios de Desenvolvimento do Estado de Minas Gerais; e
- Relacionar o potencial de geração de biogás com o potencial de conversão energética para geração de eletricidade.

O intuito é favorecer a expansão de conhecimentos sobre múltiplas possibilidades para que ocorra uma transição energética e a diversificação da matriz elétrica de Minas Gerais. Por fim, busca-se contribuir à efetiva mudança de paradigmas com relação à destinação e tratamento de resíduos sólidos urbanos, propiciando a transformação de passivos ambientais em ativos sustentáveis.

1.3 Estrutura da Dissertação

O presente estudo é composto por seis capítulos, estando organizados conforme descrição a seguir.

No “Capítulo 1 – INTRODUÇÃO” é apresentada a contextualização do trabalho dentro do tema proposto, bem como sua relevância e justificativa, apresentando a problemática e a proposta de solução. Neste capítulo também são declarados os objetivos do trabalho, que caracterizam os produtos esperados.

No “Capítulo 2 – REVISÃO DE LITERATURA” discorre-se com maior profundidade sobre a temática do trabalho, organizada sobre três grandes eixos: o crescimento populacional urbano e suas consequências ambientais, sociais e energéticas; a questão dos resíduos sólidos urbanos, conceituando-os e demonstrando seu ciclo, desde sua geração, passando pelo seu tratamento e disposição final, tal como seu potencial energético como biomassa; e o biogás gerado em aterros sanitários pela decomposição anaeróbia dos resíduos sólidos urbanos, discorrendo sobre suas características, potencial energético, rotas tecnológicas de conversão energética e, finalmente, a apresentação de uma análise da inserção do biogás na matriz e no mercado energético nacional.

Já no “Capítulo 3 – CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO” trata-se de delimitar a área de escopo proposta por este trabalho, de modo a caracterizá-la quanto ao comportamento demográfico, às demandas energéticas e à situação da destinação de seus resíduos sólidos urbanos.

No “Capítulo 4 – METODOLOGIA DE TRABALHO” é apresentada a metodologia utilizada para se alcançar os produtos esperados, expostos no Capítulo 1, detalhando os procedimentos e métodos que conduziram logicamente o caminho de desenvolvimento deste trabalho.

Os produtos do trabalho são expostos no “Capítulo 5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES”, onde há uma comprovação das expectativas de viabilidade técnica do potencial de recuperação e aproveitamento energético do biogás gerado em aterros sanitários no Estado de Minas Gerais. Os resultados são apresentados de forma territorial, de modo a destacar o potencial técnico de produção e aproveitamento do biogás em cada um dos Territórios de Desenvolvimento do Estado, pretendendo-

se, assim, constituir-se como ferramenta para auxílio nas tomadas de decisão de investimento público e privado na geração de energia elétrica por esta fonte, tendo-se em consideração as demais potencialidades regionais.

Por fim, no “Capítulo 6 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES” expõe-se a correspondência entre os objetivos do trabalho e os resultados obtidos, de modo a comprovar a eficiência da metodologia proposta e aplicada. Neste capítulo, exprimem-se, ainda, as recomendações e ponderações pontuais quanto aos procedimentos desenvolvidos neste trabalho, assim como as possíveis extrapolações do mesmo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo tem como objetivo apresentar um panorama sobre as demandas por energia em consonância com a geração de resíduos sólidos urbanos, ambas associadas ao crescimento populacional e à urbanização acelerada. Destaca-se o aproveitamento e recuperação energética dos RSU sob a forma de biogás gerado em aterros sanitários. Para tanto, é imprescindível que se apresente uma série de conceitos, normas e legislações, bem como as formas de tratamento e de disposição final dos RSU. Dando prosseguimento à formação da base teórica, são apresentados alguns dos modelos atualmente aplicados quanto à estimativa do potencial de produção de biogás em aterros sanitários.

2.1 O crescimento populacional urbano

De acordo com Fontana *et al.* (2015, p. 114), é de amplo conhecimento a relação existente entre os habitantes de determinada região e as condições do ambiente em que vivem. Assim, o estabelecimento de limites quanto ao tamanho ótimo de determinada população implica em diversas variáveis quanto ao fenômeno populacional. Dentro desta perspectiva, Lucci *et al.* (2005, p. 316) relata que a teoria proposta em 1798 por Thomas Robert Malthus expressa que “[...] a população tinha potencial de crescimento ilimitado, e a natureza, inversamente, recursos limitados para alimentá-la”. Ou seja, o comportamento do crescimento populacional humano seguiria um padrão de progressão geométrica, ao passo que o crescimento da produção de alimentos seguiria um padrão de progressão aritmética, claro que sob a hipótese de um sistema onde não houvesse guerras, epidemias, desastres naturais, e outros fatores externos que influenciassem drasticamente estes processos. Contudo, a teoria Malthusiana não se concretizou, uma vez que os dados usados na época eram extremamente limitados e característicos, tratando-se de uma região limitada e com população predominantemente rural, não havendo considerações quanto aos efeitos da urbanização e da industrialização.

Já no século XX, houve uma verdadeira explosão demográfica mundial, cuja maior contribuição veio dos países subdesenvolvidos, principalmente a partir da década de

1950, quando estes países passaram a registrar cada vez mais elevadas taxas de crescimento populacional (MINK, 1993, p. 14). Segundo Lucci (2005, p. 320), “[...] alguns destes países subdesenvolvidos chegaram a dobrar a sua taxa de crescimento em menos de três décadas”. Assim, neste contexto, surgiram novas teorias em uma tentativa de explicar a fome, cada vez mais alarmante, nos países subdesenvolvidos, sem se levar em conta questões econômicas e políticas, por exemplo. Estas ficaram conhecidas como neomalthusianas, devido ao seu caráter catastrófico e por apontarem como única solução o controle populacional. Desta forma, para os defensores desta teoria, o crescimento demográfico estava diretamente associado “[...] à questão do desenvolvimento e propunham soluções antinatalistas para os problemas econômicos enfrentados pelos países subdesenvolvidos” (LUCCI, 2005, p. 320). Contudo, os argumentos dos neomalthusianos foram desfeitos pela dinâmica demográfica real.

Em contrapartida, surgiram teorias denominadas reformistas, que contrárias às já citadas, entendiam que as situações de pobreza e subdesenvolvimento é que são responsáveis pelo crescimento demográfico acelerado. Assim, estes “[...] defendem a adoção de reformas socioeconômicas para superar os graves problemas” (ALMEIDA, RIGOLIN, 2002, p. 119).

Todas essas teorias são tentativas de se explicar ou iluminar a compreensão científica sobre o fenômeno do crescimento populacional. Contudo, é importante observar com cautela, uma vez que este se desenvolve influenciado por questões não apenas antropológicas e demográficas, mas também por questões sociais, culturais, econômicas e políticas. Assim, para se compreender o desenrolar e o comportamento do crescimento populacional de determinada localização, é crucial um estudo sobre seu histórico, composição, transições e susceptibilidade a mudanças em fatores externos.

É fato que, os processos de urbanização acelerada e o crescimento populacional descontrolado, principalmente nas sociedades ocidentais, se deu com maior intensidade a partir da Revolução Industrial. De acordo com Spósito (1996, p. 49), tal fenômeno se deu

a partir da intensificação da produção industrial, tornada viável tanto graças ao capital acumulado, como pelo desenvolvimento técnico-científico a que se denomina Revolução Industrial, a urbanização tomou ritmos muito acentuados.

Contextualmente, no caso do Brasil, segundo Martine e McGranahan (2010, p. 13), na época da colonização brasileira por Portugal, os colonizadores não apresentavam interesse em criar uma sociedade urbana, visto que as poucas cidades foram construídas no litoral, servindo “[...] apenas para a defesa contra a invasão de outros colonizadores e como entrepostos para a exploração do interior nos diversos ciclos extrativos e agrícolas que presenciou o país”. Neste sentido percebe-se que a formação de cidades no Brasil durante este período tinha finalidade especificamente estratégica, de modo a garantir a exploração dos recursos da colônia. Assim, sabe-se que, durante todo o período da colônia, e em grande parte do período imperial, as cidades não compunham uma rede urbana, propriamente dita, mas eram pontos isolados no litoral, e eram mais ligadas ao exterior do que entre si (MARTINE e McGRANAHAN, 2010, p.13).

Com o advento do período do ciclo do café, no último quarto do século XIX, a situação mudou consideravelmente, uma vez que este foi um período de copiosas transformações nas esferas econômica e social, tanto em nível nacional como internacional. Todavia, a lei contra o tráfico de escravos e as leis abolicionistas, culminando com a abolição da escravatura no país, constituíram um desafio à produção cafeeira que, com o respaldo do Governo, incentivou a vinda de uma grande quantidade de migrantes vindos principalmente da Europa. Assim, “[...] estima-se que entraram 4 milhões de imigrantes entre 1880 e 1930, 70% dos quais se estabeleceram no Estado de São Paulo” (MARTINE e McGRANAHAN, 2010, p.14).

A economia brasileira passou por um período de forte crescimento econômico e demográfico no final do século XIX e nas primeiras décadas do século XX. Tal situação intensificou os processos de rápida urbanização, considerada precoce, se comparada a países da África e da Ásia. De acordo com Martine e McGranahan (2010, p. 14),

A melhoria das condições de vida, aliada às iniciativas de saneamento e de saúde pública reduziram a mortalidade e começaram a aumentar as taxas de crescimento vegetativo. A criação do trabalho assalariado atraiu migrantes nacionais e internacionais, gerando mudanças significativas no perfil da mão de obra. Por sua vez, a existência de uma massa de trabalhadores assalariados deu origem a um mercado interno e à comercialização da produção de alimentos.

O período de forte crescimento econômico e urbano no Brasil, fomentado pela produção cafeeira, viu-se interrompido pela quebra da bolsa de valores dos Estados Unidos, no ano de 1929, e pela consequente crise econômica global. Desta forma, a

partir da década de 1930, reforçou-se o processo de migração de áreas rurais para áreas urbanas, devido à crise no setor agrícola internacional, aliada às melhorias nos setores de comunicação e transportes internos. Este processo se intensificou por cerca de cinco décadas (MARTINE e McGRANAHAN, 2010, p.14). No período da segunda metade do século XX, o Brasil experimentou uma das mais aceleradas transições urbanas da história mundial que “[...] transformou rapidamente um país rural e agrícola em um país urbano e metropolitano, no qual grande parte da população passou a morar em cidades grandes” (MARTINE e McGRANAHAN, 2010, p.11). Tal fenômeno pode ser comprovado por vários estudos referentes a diversas cidades e regiões brasileiras, como apresentado por Barbieri e Bilsborrow (2011), Riceto, da Silva e Guimarães (2010). De modo a ilustrar esta constatação, o gráfico da Figura 1 apresenta dados referentes aos últimos seis Censos Demográficos brasileiros.

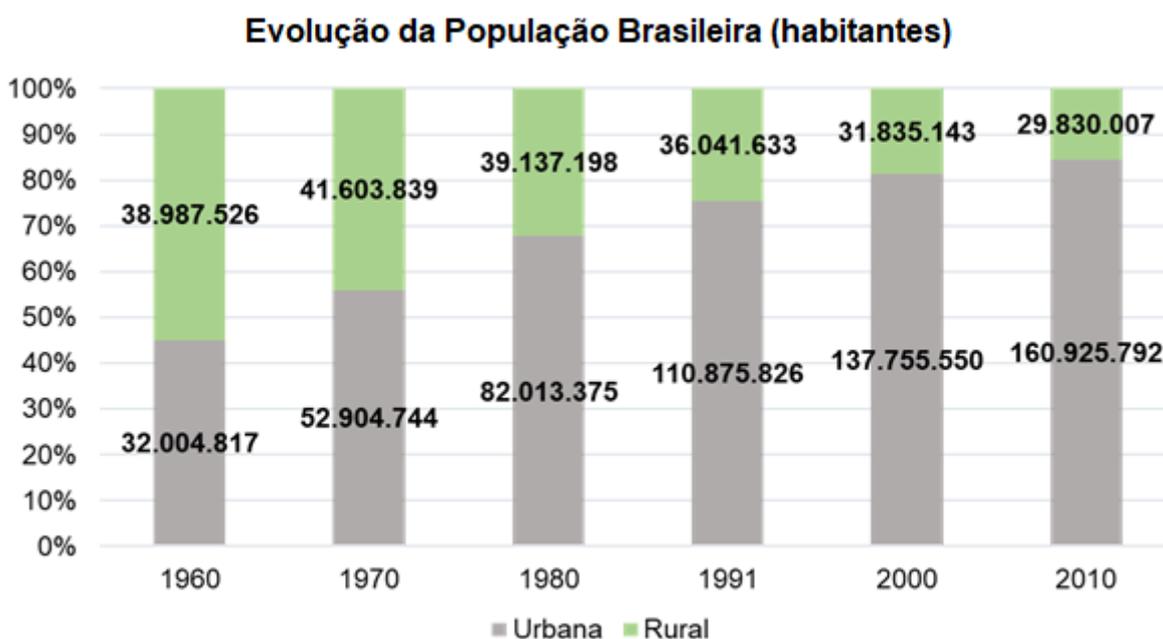


Figura 1. Evolução da população brasileira conforme situação de domicílio.
Fonte: Adaptado de IBGE (2010).

Assim, em termos do número e tamanho de cidades, bem como em relação ao seu peso na geração do Produto Interno Bruto - PIB e ao desenvolvimento da rede urbana, é possível concluir-se que a urbanização do Brasil já atingiu um grau elevado de maturidade.

Sob uma perspectiva mundial, a população não começou a crescer de forma

constante pelo menos até o século XVIII, onde iniciou-se um modesto incremento de 0,5% ao ano. Antes disso, a fome, as doenças e as guerras garantiram que a expectativa de vida permanecesse mais ou menos inalterada. A população mundial dobrou entre 1750 e 1900, quando atingiu 1,7 bilhões de habitantes. Durante a primeira metade do século XX, a taxa de crescimento populacional aumentou de cerca de 0,5 para cerca de 1%. Mas o crescimento após 1950, em particular nos países em desenvolvimento, aumentou para mais de 2%, à medida em que a mortalidade diminuiu e a expectativa de vida se estendeu, resultado de melhores padrões de vida e dos progressos médicos - particularmente, a introdução de antibióticos, pulverização de mosquitos vetores de doenças e o aumento da vacinação (MINK, 1993, p. 14). Seguindo este rumo, das tendências e previsões populacionais mundiais com uma taxa de crescimento média de 0,8% ao ano, espera-se que em 2050 a população mundial tenha um incremento de cerca de 2 bilhões de habitantes com relação ao ano de 2013, alcançando um patamar de 9,3 bilhões de pessoas (ONU, 2013, p.1). A distribuição desta população continuará com uma forte concentração populacional em alguns países, sendo que apenas oito deles contarão com 51,1% do total da população mundial, sendo eles: China e Índia (correspondendo juntas a 32,1% da população); e Estados Unidos, Nigéria, Indonésia, Paquistão, Brasil e Bangladesh (correspondendo juntos a 19,1% da população mundial) (ONU, 2013, p.3). Assim, observa-se que o Brasil se apresenta neste cenário como um desafio para os Governos, que terão que gerenciar uma série de problemas e oportunidades quanto a questões de infraestrutura e atendimento às demandas da crescente população.

Com relação ao fenômeno da urbanização, de acordo com Waldman (2016, p. 61), "há um século, existiam menos de 20 cidades no Planeta com mais de um milhão de habitantes. Em 2005 já existiam 400 delas e haverá 550 destas em 2015". Desta forma, Davis (2006) reforça que a vida e a cultura da sociedade humana se afirmam e se definem cada vez mais baseadas no meio urbano. Neste contexto, para Martine e McGranahan (2010, p. 11) um dos fatores que contribuem para o reforço das dificuldades urbanas atuais trata-se da "[...] incapacidade de prever, aceitar e planejar de forma antecipada o crescimento urbano maciço e inevitável". Tal incapacidade se reflete nas dificuldades encontradas por planejadores quanto ao atendimento às demandas por serviços de energia de qualidade, bem como por serviços de infraestrutura urbana, como coleta, tratamento e destinação final adequada para os

resíduos sólidos urbanos, sob um enfoque de aumento da demanda conforme previsão do crescimento populacional e das taxas de urbanização para os municípios.

2.1.1 Aumento da demanda energética

O aumento da produtividade aliado a um crescimento do consumo como um todo, conseqüentemente levam a um incremento no consumo de energia elétrica. É fato que um país não pode crescer sem energia disponível, bem como não se pode crescer mais rapidamente que o incremento da oferta de energia, ou ao menos de um expressivo aumento de eficiência energética. Sabe-se que, desde a chamada Revolução Industrial, a competitividade econômica entre os países e a qualidade de vida de seus cidadãos têm como forte influenciadora a questão energética. Esta influência se torna cada vez mais intensa e decisiva, frente a um mercado globalizado e às crescentes preocupações com o meio ambiente. Nesse contexto, de acordo com Tolmasquim *et al.* (2007, 47), “[...] as economias que melhor se posicionam quanto ao acesso a recursos energéticos de baixo custo e de baixo impacto ambiental obtêm importantes vantagens comparativas[...]”. Sobre esta perspectiva, de acordo com a EPE (2014a, p. 35-36), a confiabilidade da disponibilidade de energia de forma competitiva caracteriza-se como um dos condicionantes básicos de competitividade de uma economia, dentre outros como a infraestrutura adequada, os recursos para financiamento e o capital humano são outros exemplos de requisitos básicos necessários nesse sentido.

No caso do Brasil, o intenso desenvolvimento econômico vivenciado ao longo do século XX refletiu-se numa demanda crescente por energia primária. Tal crescimento alinha-se a uma expressiva expansão demográfica, acompanhada de um rápido aumento da taxa de urbanização, dentre outros fatores (TOLMASQUIM, *et al.*, 2007, p. 48; BARBOSA FILHO, FERREIRA E SILVA, 2015, p. 2). Segundo Tolmasquim *et al.* (2007, 48), comparando-se o período de 1970 a 2000, a população brasileira quase dobrou, passando de 93 milhões para 170 milhões de habitantes, ao passo que a demanda energética primária passou de menos de 70 milhões de tep (toneladas equivalentes de petróleo) para 190 milhões de tep, quase triplicando-se neste período. Assim, observa-se que a demanda por energia apresentou um comportamento de crescimento superior àquele ocorrido na expansão demográfica. Seguindo esta

tendência histórica, tendo como base o crescimento populacional positivo para as próximas décadas, é imprescindível ter-se em consideração alternativas e políticas que favoreçam o aprimoramento e diversificação da matriz energética nacional, no intuito de garantir uma oferta de energia e de serviços de energia de qualidade que atendam às necessidades e demandas da população ao longo dos anos que virão.

Em uma ótica de alinhamento econômico, a EPE (2008, p. 9) expressa que o consumo de energia tem uma relação muito próxima com o crescimento do PIB, que se torna mais pronunciada à medida que a participação do setor industrial aumenta, seja na economia ou no consumo de energia elétrica. Segundo Tolmasquim *et al.* (2007, p. 48), ao longo dos anos, no Brasil

[...] sempre se verificou significativa expansão do consumo de energia nos intervalos em que houve uma expansão mais vigorosa da economia. Isso indica que em um ambiente de maior crescimento econômico deve-se esperar maior crescimento da demanda de energia.

Neste sentido, Goldemberg e Lucon (2007, p. 10) expressam que se tem observado que no Brasil, no final do século XX e início do século XXI, o aumento da produção de energia primária tem acompanhado contiguamente o crescimento do PIB. Por outro lado, o consumo de eletricidade tem aumentado de forma mais rápida, principalmente em razão da crescente eletrificação do país, por meio de programas de Governo e políticas públicas de incentivo e promoção do acesso à energia a toda a população, e da instalação de indústrias energointensivas, como as de alumínio. Corroborando com este pensamento, a *International Energy Agency* – IEA, em seu relatório “*Energy Efficiency 2017*”, demonstra que enquanto o mundo está usando cada vez menos energia para produzir bens e serviços, o Brasil está ampliando o consumo para gerar o mesmo crescimento econômico. Os dados mostram que, em termos mundiais, a intensidade energética¹ caiu, em 2016, 1,8%, ao passo que, no Brasil, esse indicador subiu cerca de 2%, para o mesmo período; já a China apresentou uma queda de 5,2%, nos EUA a queda foi de 2,9% e, na União Europeia, de 1,3%. (IEA, 2017, p. 16-17), conforme apresentado no gráfico da Figura 2. É importante salientar que os dados levam em conta toda a energia primária e não apenas a energia elétrica.

¹ Medida que representa a energia usada para produzir um dólar de PIB.

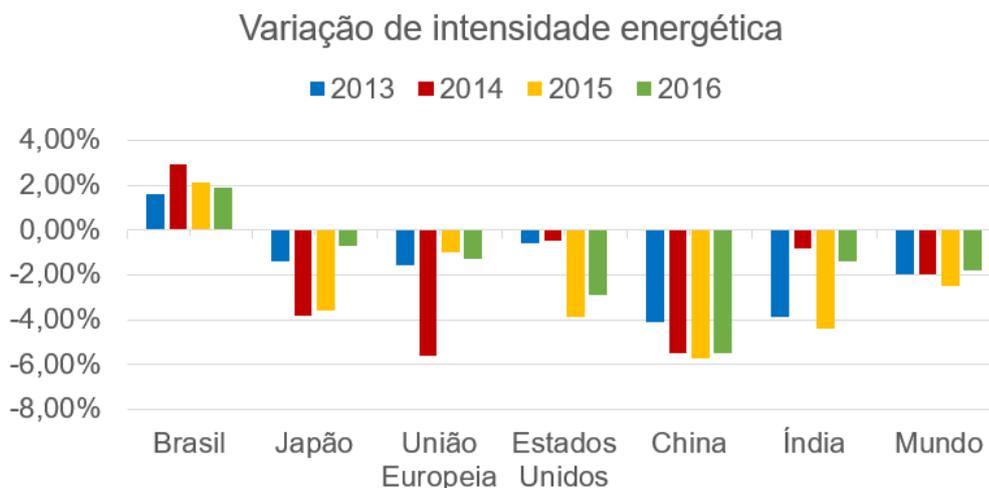


Figura 2. Comparação da variação da intensidade energética anual para alguns países (em %).
 Fonte: Adaptado de IEA (2017, p. 17).

De acordo com a IEA (2017, p. 16-17), ao crescer consumindo proporcionalmente menos energia, os países se tornam também mais produtivos. Assim, conforme os dados apresentados pela agência, houve um bônus de produtividade decorrente da maior eficiência energética em 2016, sendo de US\$ 1,1 trilhão na China, US\$ 532 bilhões nos EUA, US\$ 260 bilhões na União Europeia e US\$ 2 trilhões no mundo. Contudo, o Brasil não aparece nessa lista, uma vez que não houve queda em sua intensidade energética.

Dentro deste contexto, verifica-se que o sistema elétrico, conforme os moldes que atualmente vigoram e prevalecem no Brasil, é projetado para o atendimento de uma dada potência: a potência de ponta, conforme representado pelo gráfico da Figura 3, que apresenta uma curva de carga diária genérica, com intervalo de demanda não nulo.

Destaca-se que, se a demanda representa potência ativa, a área abaixo da curva corresponde à energia consumida diariamente. Desta forma, paga-se um alto preço para a utilização de energia elétrica por um curto período de tempo. Em comparação, uma fração do investimento feito no sistema seria capaz de atender as necessidades dos consumidores durante todo o tempo do período fora de ponta.

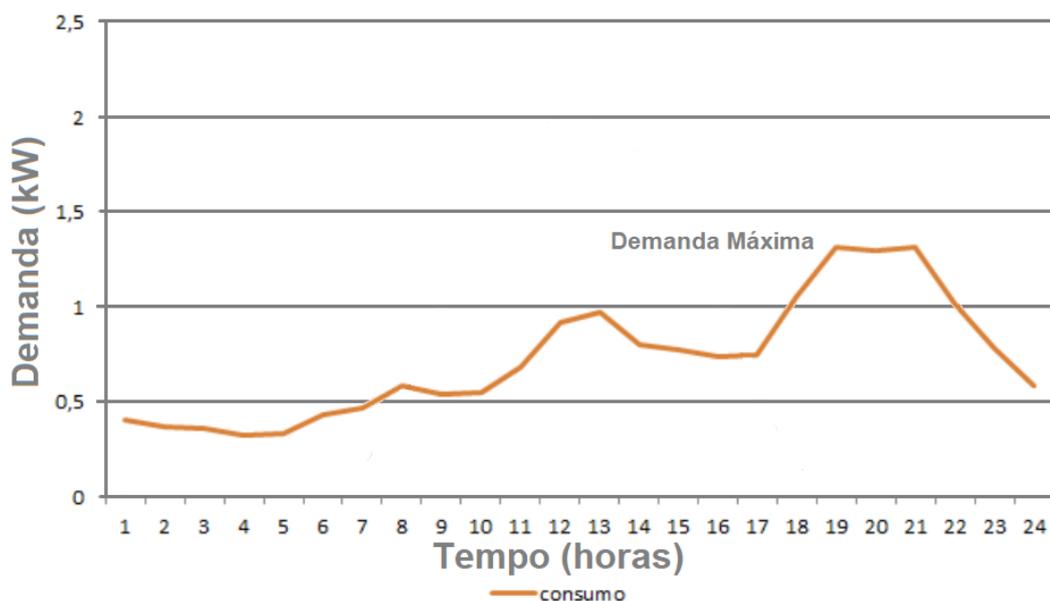


Figura 3. Curva de carga típica residencial.

Fonte: Adaptado de ANEEL (2017, p. 19).

Uma solução seria a subtração do consumo de energia na ponta, atenuando o pico de consumo e distanciando-o da potência máxima do projeto, o que significaria uma melhor utilização das instalações e até mesmo a postergação de novos e voluptuosos investimentos, bem como diversos problemas relacionados aos impactos ambientais. Assim, esta possibilidade poderia ser revertida em menores custos de energia para o consumidor final (HERMSDORFF, 2000, p.3).

Na Figura 4 é apresentado um gráfico de uma situação teórica de maior participação do consumidor sobre a oferta de energia elétrica ao longo do tempo. Percebe-se que a tendência é que, assegurados por políticas públicas existentes e outras adicionais, e por decisões finais por parte dos consumidores sem vínculo direto com tais políticas, a demanda energética cada vez mais será atendida não apenas pela geração centralizada, mas também pela geração distribuída - GD, a autoprodução e a eficiência energética (EPE, 2014a, p. 11).

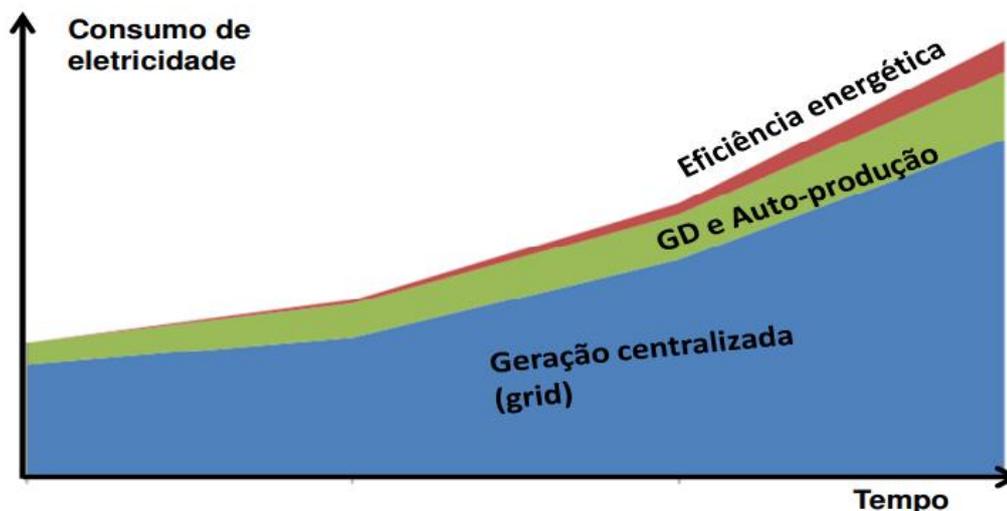


Figura 4. Curva típica diária de demanda.

Fonte: EPE (2014a, p. 11).

Sobre esta perspectiva, deve-se evidenciar que em um país em desenvolvimento, como o Brasil, torna-se inevitável que o consumo de energia cresça de modo a promover e alavancar o desenvolvimento. Todavia, conforme Barbosa Filho, Ferreira e Silva (2015, p. 4), “[...] nada impede que o uso de tecnologias modernas e mais eficientes seja introduzido logo no início do processo de desenvolvimento, acelerando, com isso, o uso de tecnologias eficientes[...]”, como representado na Figura 5.

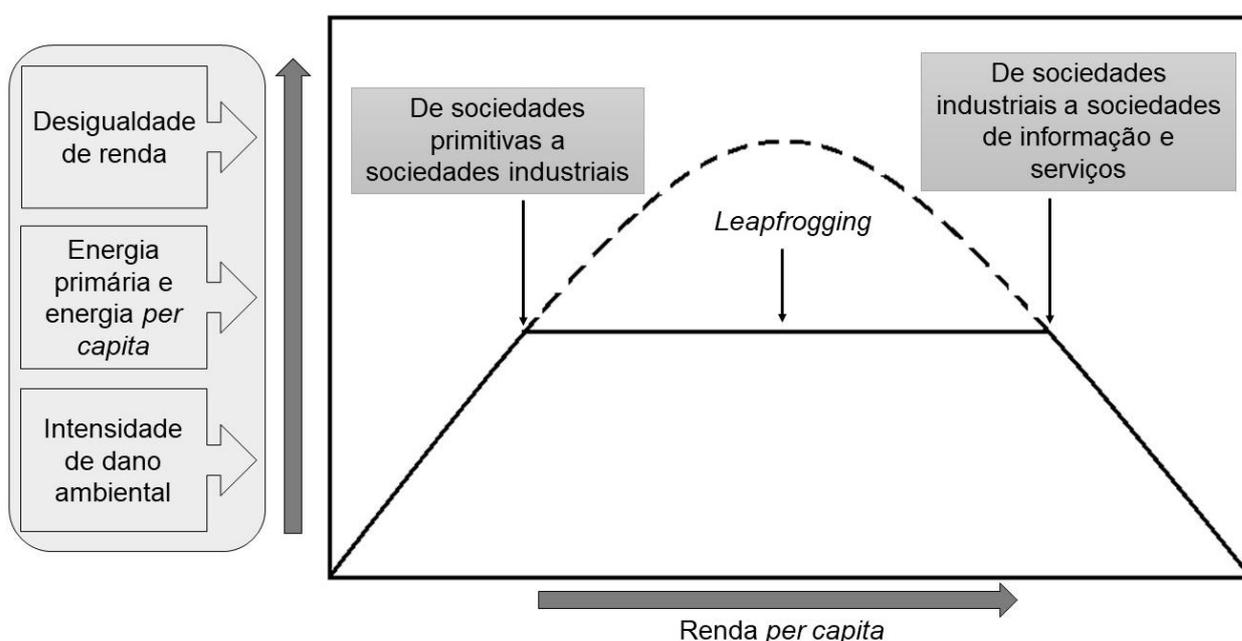


Figura 5. A curva de Kuznets para os impactos ambientais e estágios de desenvolvimento.

Fonte: Adaptado de Goldemberg e Lucon (2007 p. 18).

Neste contexto, a geração de energia por meio de fontes renováveis vem se apresentando como uma tendência mundial, difundida também no Brasil, principalmente devido à crescente demanda energética e também às preocupações ambientais, não apenas para pesquisadores e cientistas, mas mesmo entre os consumidores finais e governos. Tal tendência pode ser observada pelos gráficos da Figura 6 e da Figura 7, que apresentam a evolução mundial da oferta e do consumo de energia, respectivamente, estratificados por fonte de geração.

De acordo com os dados apresentados no Balanço Energético Nacional 2017 – Ano base 2016 (EPE, 2017a), a oferta mundial total de energia passou de 6.100×10^6 tep² para 13.541×10^6 tep, ao passo que o consumo final de energia passou de 4.667×10^6 tep para 9.301×10^6 tep.

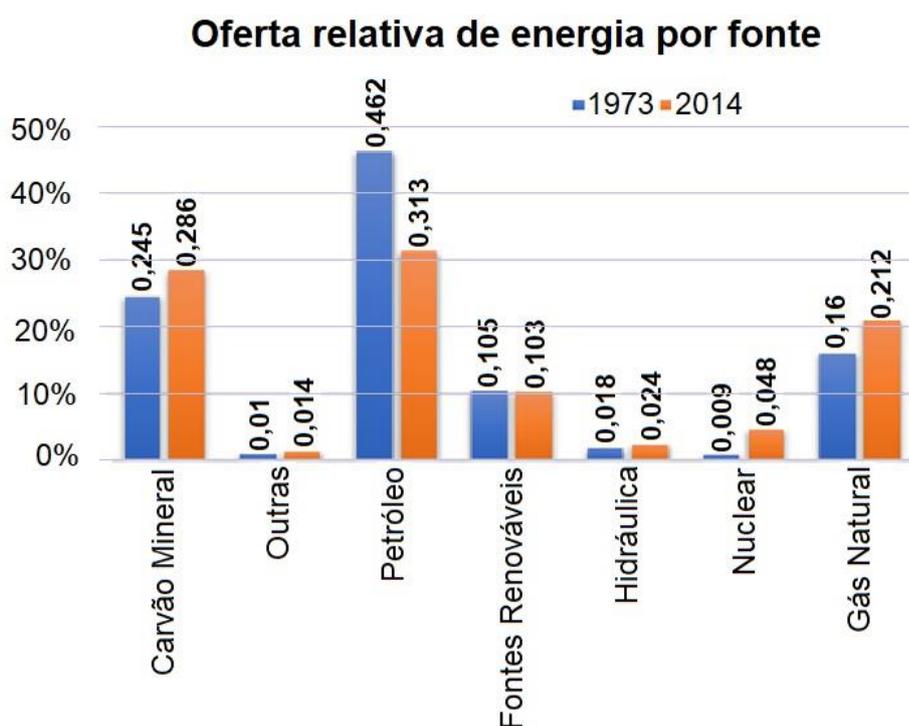


Figura 6. Evolução da oferta relativa de energia por fonte de geração, de 1973 a 2014.

Fonte: EPE (2017a, p. 188).

² tep: tonelada equivalente de petróleo (do inglês toe - *tonne of oil equivalent*). É uma unidade de energia, utilizada na comparação do poder calorífico de diferentes formas de energia com o petróleo. Uma tep corresponde à energia que se pode obter a partir de uma tonelada de petróleo padrão. Comparativamente, 1 tep corresponde a $41,87 \times 10^9$ J e $11,63 \times 10^3$ kWh (ANEEL, 2008, p. 143-144).

Consumo relativo final de energia por fonte

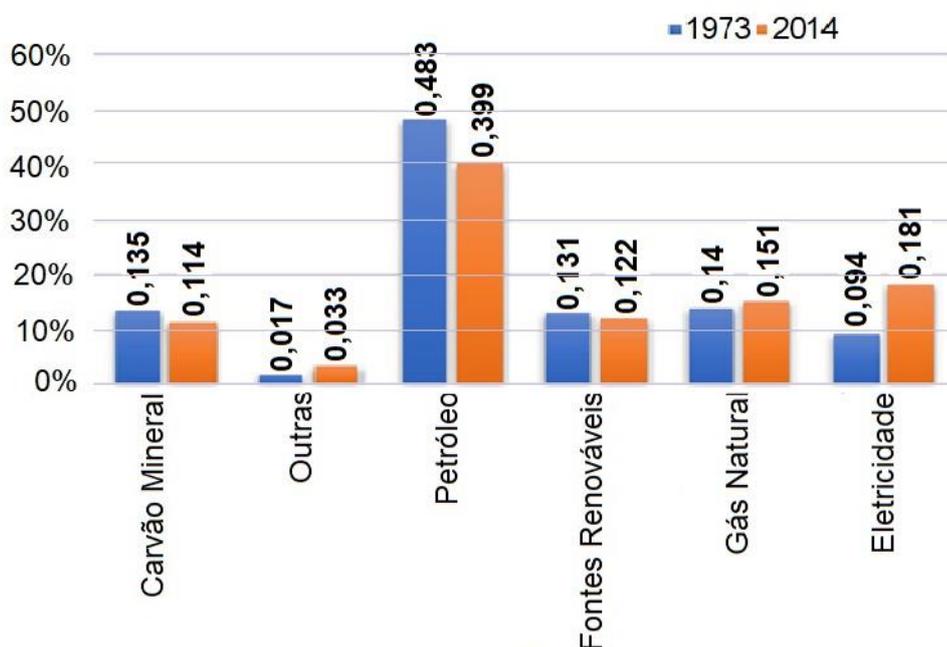


Figura 7. Evolução do consumo relativo de energia por fonte de geração, de 1973 a 2014.

Fonte: EPE (2017a, p. 190).

No Brasil, segundo a ANEEL (2017), a principal fonte geradora de energia elétrica é a hídrica, que produz pouco mais de 61% da potência a ser consumida, seguida pelas fontes de origem fóssil, que correspondem a quase 16,5% da energia gerada, revelando um vasto campo para pesquisas que possam solidificar e assegurar o uso de fontes renováveis que propiciem maior diversificação da matriz elétrica, bem como a redução cada vez mais significativa das fontes fósseis em detrimento das não fósseis. Segundo o Banco de Informações de Geração – BIG (ANEEL, 2017) e o Balanço Energético Nacional – BEN (EPE, 2017a, p. 15-16) é crescente no cenário brasileiro a utilização de energias renováveis na oferta interna de energia elétrica, correspondendo a 81,7% do total ofertado (EPE, 2017a, p. 17), como pode ser observado nos gráficos da Figura 8 e da Figura 9.

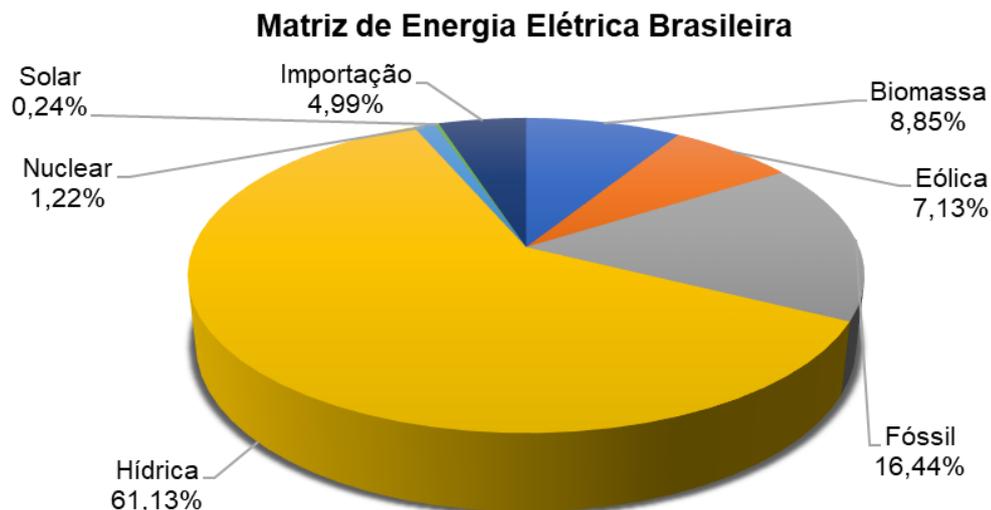


Figura 8. Composição da matriz de energia elétrica brasileira – novembro de 2017.
Fonte: ANEEL (2017).

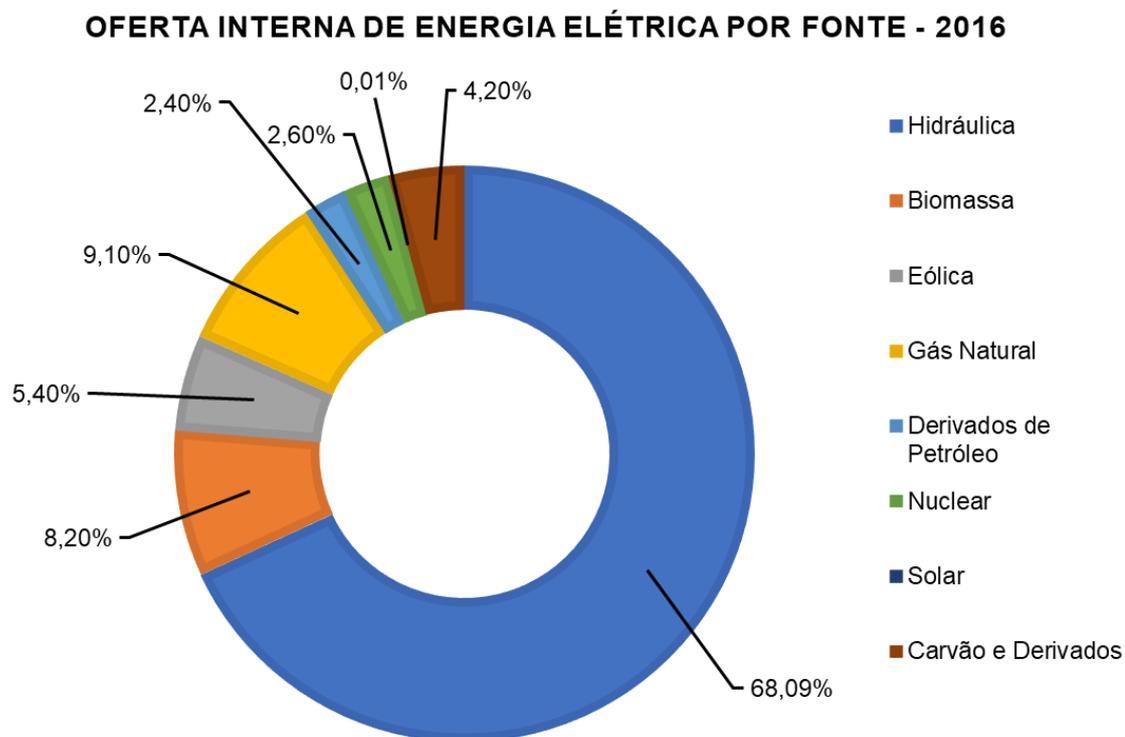


Figura 9. Oferta interna de energia elétrica por fonte em 2016.
Fonte: Adaptado de EPE (2017a, p. 16).

A EPE apresenta em seu documento intitulado “Demanda de Energia 2050”, uma série de projeções de fatores que influenciam a composição da demanda energética. De acordo com dados apresentados pela EPE (2014a, p. 29), o consumo brasileiro per capita de eletricidade, quando comparado a países com níveis de renda per capita semelhantes àqueles estimados para o Brasil no ano de 2050, mostra-se em patamares relativamente reduzidos. Expressa ainda que é imprescindível a inferência

de fatores relacionados a hábitos de consumo sobre o nível de solicitação que se será necessário ser atendido pelo sistema energético brasileiro futuro (EPE, 2014a, p.30).

É sabido que o nível de preços da energia define a atratividade da expansão de determinadas atividades industriais, em especial, os denominados energointensivos, por exemplo. Caso o patamar de preços da energia não se constituir em restrição para atividade econômica, por sua vez, os preços relativos influenciarão, por certo, a matriz energética resultante no longo prazo. Desta forma, “[...] a depender da trajetória de preços relativos a ser seguida, o futuro do setor energético brasileiro poderá ocorrer de formas bastante distintas[...]” (EPE, 2014a, p. 35-36).

Conforme pode ser observado na Figura 10, no período de 2013 a 2050, a EPE (2014a, p. 39) estima que poderá haver um aumento superior a duas vezes da demanda brasileira total de energia, quando comparada com o ano base de 2013.

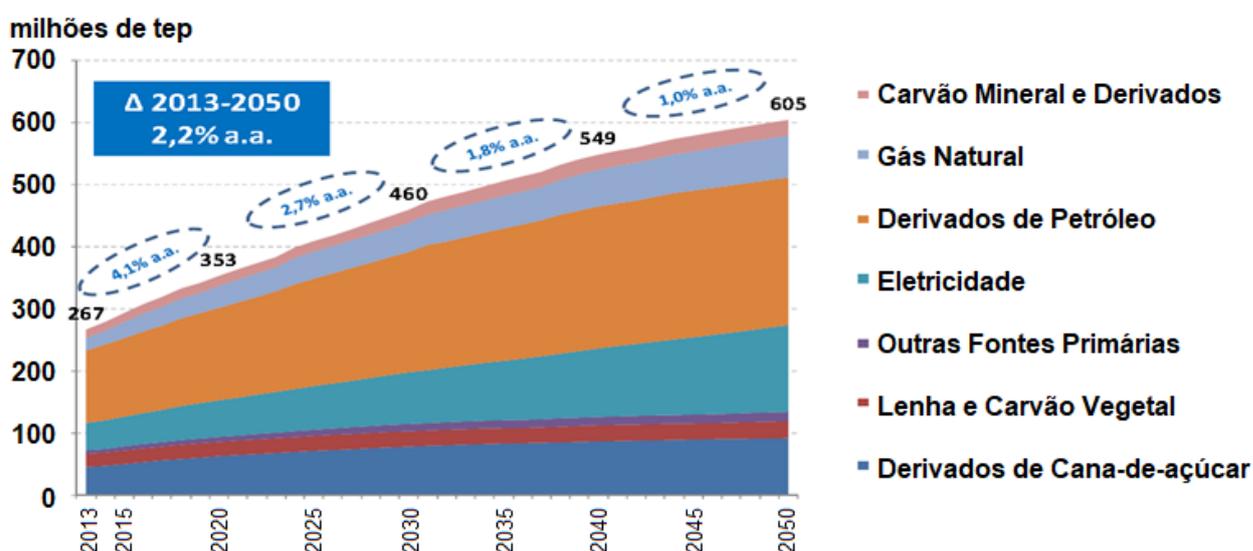


Figura 10. Evolução da demanda total de energia por fonte até 2050.

Fonte: (EPE, 2014a, p. 39).

Na Figura 11 é mostrado que, para o horizonte de 2050, as fontes com maior crescimento quanto à demanda são o gás natural e a eletricidade (EPE, 2014a, p. 39). Já na Figura 12, é apresentada a projeção da evolução do consumo total de energia elétrica de 2013 a 2050, onde a parcela de autoprodução cresce a uma taxa média de 2,6% ao ano, ao passo que o consumo na rede, isto é, a demanda de eletricidade a ser atendida pelo Sistema Elétrico Nacional, aumenta 3,2% ao ano (EPE, 2014a, p. 143).

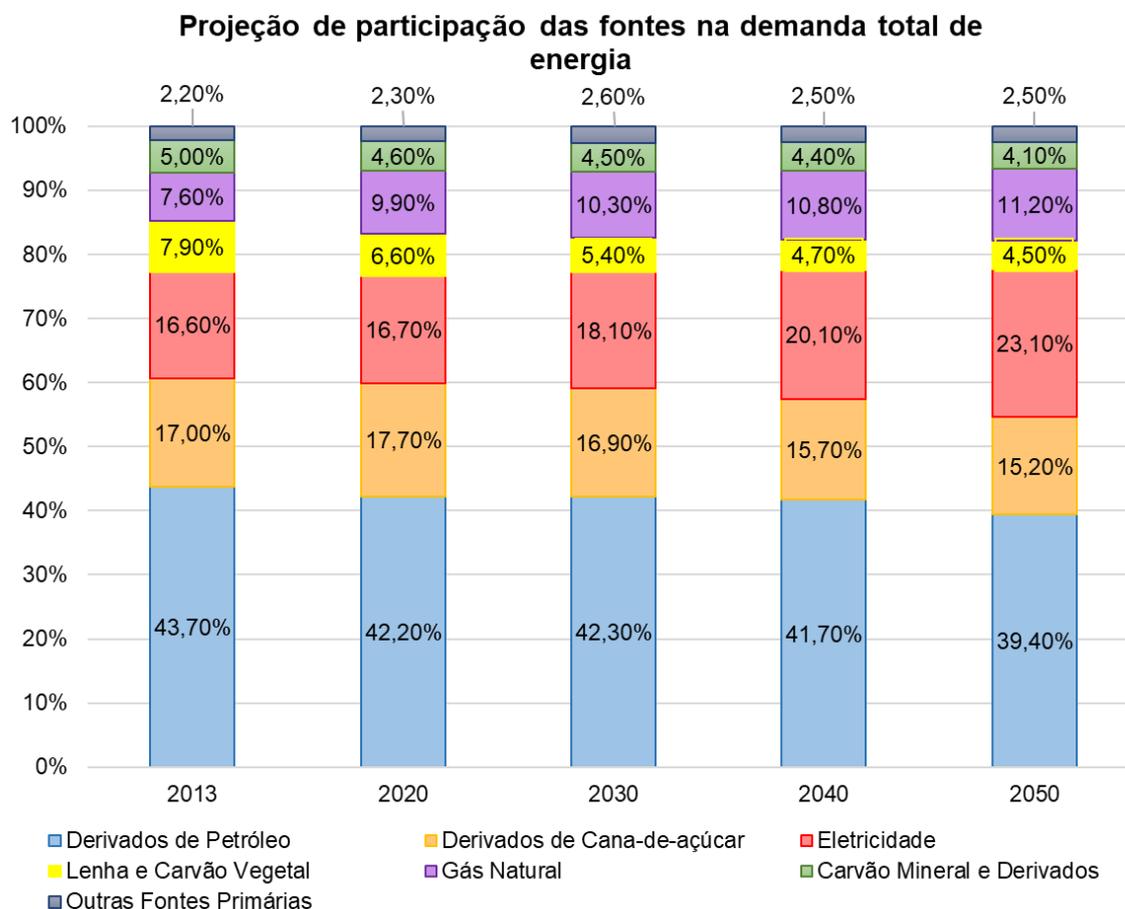
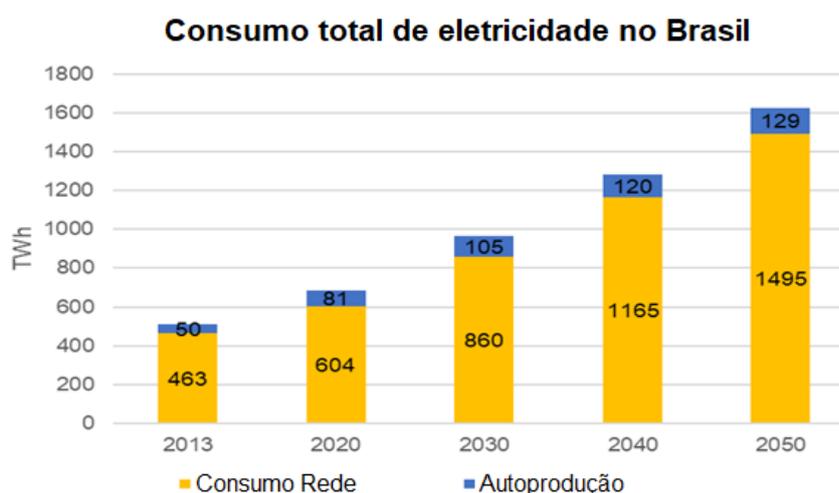


Figura 11. Evolução da participação das fontes na demanda total de energia até 2050.

Fonte: Adaptado de EPE (2014a, p. 39).



Nota: Para o ano de 2013, a estimativa foi preliminar à época.

Figura 12. Projeção do consumo total de eletricidade no Brasil, de 2013 a 2050 (TWh).

Fonte: Adaptado de EPE (2014a, p. 143).

Assim, percebe-se que para o horizonte de 2050, proposto para este estudo, haverá um aumento considerável da demanda por energia elétrica em todo o Brasil, fato atrelado ao aumento da população e ao crescimento econômico esperado para o país

neste período, conforme dados de estudos oficiais, como o apresentado pela EPE (2014a).

2.1.2 Aumento da geração de resíduos sólidos

Sabe-se que o crescimento populacional mundial frequentemente é responsabilizado pela destruição do meio ambiente, esgotamento e exaustão dos recursos naturais e as mudanças climáticas. Assim, segundo Fontana *et al.* (2015, p. 120)

[...] é importante enfatizar que num mundo em que o consumo tornou-se meta para a construção da sociedade, e a aspiração e o acesso aos objetos de serviços do mundo moderno se transformaram em modo de vida, a dilapidação dos recursos naturais têm sido inevitável. O avanço tecnológico e científico, ao mesmo tempo em que possibilita a popularização do consumo, torna produtos obsoletos num espaço de tempo cada vez menor.

De acordo com Silva (2006, p. 5), o elevado adensamento populacional e a industrialização trazem consigo sérios riscos ao meio ambiente, seja ele urbano ou rural, que interferem diretamente no equilíbrio do intercâmbio orgânico entre o homem e a natureza, “[...] impedindo principalmente a volta à terra dos resíduos da produção e do consumo que poderiam reconstruir a fertilidade, gerando todo o tipo de poluição” (SILVA, 2006, p. 5). Desta forma, Hoornweg e Bhada-Tata (2012, p. 2) reforçam que os resíduos sólidos estão intrinsecamente ligados à urbanização e ao desenvolvimento econômico. Corroborando com esta linha de pensamento, no fim do século XX James (1997, p.11) já expressava que o aumento da população urbana exige aumento no abastecimento de alimentos e bens nas cidades. Todavia, esses produtos são utilizados e posteriormente descartados rapidamente, devido à sua obsolescência, o que ocasiona geração de resíduos. Contudo, deve-se considerar que as taxas reais de geração de RSU *per capita* são altamente variáveis, pois existem diferenças consideráveis entre países, entre cidades e até mesmo entre bairros.

Neste contexto, nossa sociedade contemporânea está inserida no modelo social capitalista, onde, respaldada por inovações tecnológicas, visa sempre o lucro e o aumento contínuo dos níveis de consumo. Sob este enfoque, percebe-se que tanto a mobilidade social quanto o aumento do poder aquisitivo dos indivíduos constituem-se como a base para a consolidação de uma sociedade do consumo, que, por sua vez, mantém uma rotatividade cíclica entre a compra de produtos e o descarte de resíduos.

Volpi (2007, p. 45) identifica que a relação entre produção e consumo se intensificou a partir da Revolução Industrial, onde houve maior aproximação entre as duas pontas do relacionamento de consumo. Assim, Volpi (2007, p. 51) identifica que, já ao final do século XIX, em todo o mundo a sociedade capitalista passou a receber estímulos consumistas, de forma contínua e gradual, ao passo em que o próprio mercado ajustava o foco na produção. Corroborando com este pensamento, Featherstone (1995, p. 32) explica que

A expansão da produção capitalista, especialmente depois do impulso recebido da gerência científica e do 'fordismo', por volta da virada do século³, necessitou da construção de novos mercados e da 'educação' de novos públicos consumidores por meio da publicidade e da mídia.

Segundo Bauman (2008, p. 76), condicionados por um momento do capitalismo em que o consumo desponta como parte central da valorização do capital, os diversos empreendimentos comerciais que surgem no século XX propiciam a fundamentação de uma sociedade direcionada a consumir compulsivamente, podendo ser denominada de "Sociedade do Consumo"⁴. Assim, nesta sociedade de consumo, o que se busca é se apoderar dos produtos disponíveis e acumular o máximo de bens possíveis, fazendo com que os indivíduos estejam continuamente em busca dos melhores produtos, uma vez que acreditam que estes podem satisfazer suas pseudonecessidades. Em contraponto, esta mesma sociedade parece não permitir a durabilidade dos produtos, sendo que estes precisam ser descartados de forma cada vez mais rápida, para que novas mercadorias possam ser consumidas. Ou seja, "o que está sendo vendido não é apenas o valor de um produto, mas sua importância simbólica, como um bloco da construção de um estilo específico de vida" (BAUMAN e MAY, 2010, p. 247).

Dentro desta realidade, as cidades estão crescendo de forma desordenada e os limites da sua estrutura foram excedidos, levando eventualmente a problemas econômicos, sociais e ambientais, como os altos níveis de geração de resíduos sólidos urbanos e sua destinação inadequada (VIEIRA, CUNHA, 2001, p. 130-131; ALMEIDA, 2002, p.39; COELHO, 2001, p. 35). Conforme expressado por Bauman

³ Refere-se à passagem do século XIX para o XX.

⁴ Para Rodrigues (1998, p. 8) a expressão "Sociedade de Consumo" refere-se a uma sociedade que vive a intensificação do moderno, onde o mercado tem produtos e padrões de consumo que se renovam a uma velocidade exagerada.

(2008, p. 45), a maioria dos bens “[...] perde seu brilho e sua atração com rapidez, e se houver atraso eles podem se tornar adequados apenas para o depósito de lixo, antes mesmo de terem sido desfrutados” (BAUMAN, 2008, p. 45).

Para Paiva (1999, p. 11)

A partir do século XVIII ocorreram na sociedade transformações mais profundas, especificamente nos modos de produção. Estas transformações introduzidas pelo sistema capitalista ao longo da Revolução Industrial modificaram sobremaneira os hábitos da humanidade, conduzindo-a a um novo padrão de consumo que, como consequência originou um novo padrão de geração de resíduos, principalmente através do consumo em massa dos bens produzidos por este novo modelo econômico.

De modo a se entender os processos do consumo humano, este se dá por dois principais motivos: ou para suprir as necessidades básicas, denominadas primárias, como alimentação, saúde, educação, moradia, vestuário, dentre outras; ou para suprir necessidades supérfluas, denominadas secundárias. Percebe-se que no mundo contemporâneo, da sociedade de consumo, os indivíduos são levados a uma certa urgência em obter produtos cada vez mais modernos, respaldados no capitalismo e no aumento do poder aquisitivo, gerando um ciclo interminável de descarte, onde o tempo de vida útil dos produtos acaba se tornando cada vez mais curto. Além disso, destaca-se o fato de que a vida moderna é regida pela questão do tempo e, sob o véu de um discurso de dar mais comodidade e praticidade às nossas vidas, a indústria oferece cada vez mais produtos descartáveis. Desta forma é fácil perceber que:

O agravamento da questão da disposição de resíduos sólidos, além de estar associado ao aspecto sanitário e de contaminação do meio, também relaciona-se ao problema da escala de produção e do padrão de consumo, baseados em produtos descartáveis. Estes são responsáveis pela escassez de matérias primas e de energia, e pela quantidade de lixo gerado. Essas características da sociedade moderna impõe a necessidade de se aumentar a produtividade dos recursos extraídos e de evitar-se o consumo desregado de matérias primas e de energia. No outro extremo do ciclo produtivo, coloca-se o problema de escassez de espaços disponíveis para a disposição dos restos da produção de do consumo (COELHO, 1994 p. 18).

Sob esta perspectiva, nota-se que o consumo desenfreado por parte da população contemporânea associado a pseudonecessidade dos indivíduos em acompanhar as tendências e os modismos, resulta em uma geração desmedida de resíduos, causando uma degradação sobremaneira do meio ambiente. Segundo Figueiredo (1995, p. 68), a estreita dependência da geração de resíduos com o consumo sugere uma investigação nos espaços onde as atividades humanas se dão de forma mais

intensa, tanto do ponto de vista da concentração dos atores, quanto das diversidades de suas atuações. Neste sentido, as concentrações urbanas representam um papel importante, não apenas pela significativa parcela da população mundial inserida neste contexto, mas também pelas peculiaridades dos problemas relacionados aos resíduos decorrentes da dinâmica urbana.

Segundo Ross (2003, p. 180), os resíduos domiciliares têm se tornado cada vez mais uma grande preocupação para o poder público, uma vez que constitui grande desperdício de matéria-prima e energia, além dos inúmeros impactos ambientais causados pela disposição inadequada dos mesmos. Para o autor, duas questões são fatores agravantes desta situação: a crescente evolução da população e os processos produtivos que geram cada vez mais resíduos que a natureza por si só não consegue degradar. Contudo, de acordo com Hoornweg e Bhada-Tata (2012, p. 3), a questão dos resíduos sólidos geralmente é considerada como um problema "urbano", visto que as taxas de geração de resíduos tendem a ser muito mais baixas nas áreas rurais, pois, em média, os residentes geralmente são mais pobres, compram menos itens comercializados e industrializados (o que resulta em menor quantidade de embalagens) e apresentam maiores níveis de reutilização e reciclagem. Para reforçar esta ideia, os autores ainda expressam que, atualmente, mais de 50% da população mundial vive em cidades e a taxa de urbanização está aumentando rapidamente, de modo que em 2050, tantas pessoas viverão em cidades como a população do mundo inteiro em 2000. Araújo e Nora (2014, p. 4) dizem que "o crescimento da geração dos resíduos sólidos urbanos – em uma taxa superior ao crescimento populacional – faz com que, nos grandes centros urbanos, milhares de toneladas de resíduos sejam despejados diariamente nos lixões ou em aterros sanitários

Dados do relatório "*What a Waste: A Global Review of Solid Waste Management*" do Banco Mundial (HOORNWEG e BHADA-TATA, 2012, p. 2), demonstram que em 2012, ano de sua publicação, eram gerados nas cidades do planeta cerca de 1,3 bilhão de toneladas de resíduos sólidos por ano, com uma perspectiva de aumento deste volume para 2,2 bilhões de toneladas até 2025. O documento alerta para a possibilidade de que as taxas de geração de resíduos aumentem mais que o dobro em países de baixa renda até 2030. Aliado a este fato, os custos globais de gerenciamento de resíduos sólidos aumentarão dos US\$ 205,4 bilhões anuais para cerca de US\$ 375,5 bilhões em 2025 sendo mais severos nos países de baixa renda

(mais de 5 vezes).

Por fim, é possível concluir-se que a quantidade de resíduos produzidos pelas atividades antrópicas mantém uma proporção direta com o aumento da população, aliado ao crescimento industrial. Relacionado a esta questão está a queda da qualidade de vida dos indivíduos que compõem a sociedade, devido principalmente ao aumento da poluição, seja do solo, das águas ou do ar (JARDIM, D'ALMEIDA e PRANDINI, 1995).

2.1.3 Aumento das emissões de gases de efeito estufa

Em todo o mundo, as concentrações de dióxido de carbono (CO₂) aumentaram cerca de 35% em comparação com os seus níveis em tempos pré-industriais, ao passo que os níveis de concentração de metano (CH₄) aumentaram em 145% e os de óxido nitroso (N₂O) em 18%. Além disso, várias substâncias novas como os clorofluorcarbonos (CFC), perfluorcarbonos (PFC), hidrofluorcarbonos (HFC) e hexafluoreto de enxofre (SF₆) entraram na atmosfera, sendo que quase nunca ocorrem na natureza, sendo geradas quase que exclusivamente por seres humanos (FOLBERTH *et al.*, 2015, p. 1).

O aumento do dióxido de carbono atmosférico (CO₂) e outros gases de efeito estufa durante a era industrial são causados por atividades antropogênicas. De fato, o aumento observado nas concentrações atmosféricas de dióxido de carbono não revela a extensão total das emissões humanas, pois representa apenas 55% do CO₂ liberado pela atividade humana desde 1959, conforme dados apresentados por Le Treut *et al.* (2007). O restante foi ocupado por plantas em terra e pelos oceanos. Em todos os casos, as concentrações atmosféricas de gases de efeito estufa e seus aumentos são determinados pelo equilíbrio entre fontes (emissões do gás de atividades humanas e sistemas naturais) e sumidouros (a remoção do gás da atmosfera por conversão para um produto químico diferente).

A combustão de combustíveis fósseis, aliada a uma contribuição menor da indústria cimenteira, é responsável por mais de 75% das emissões de CO₂ causadas pelo homem. A mudança de uso da terra (principalmente o desmatamento) é responsável pelo restante (LE TREUT *et al.*, 2007). Para o metano (CH₄), outro importante gás de

efeito estufa, as emissões geradas pelas atividades humanas excederam as emissões naturais nos últimos 25 anos. Para o óxido nitroso, as emissões geradas pelas atividades humanas são iguais às emissões naturais para a atmosfera. Em contraponto, a maioria dos gases contendo halogênio de longa duração (como os clorofluoretos) são fabricados por seres humanos, ou seja, não estavam presentes na atmosfera naturalmente antes da era industrial. Em média, o ozônio troposférico atual aumentou 38% desde os tempos pré-industriais, e o aumento resulta das reações atmosféricas de poluentes de curta duração emitidos pela atividade humana (LE TREUT *et al.*, 2007).

Neste contexto, a concentração atual de CO₂ é de 403,3 (± 0,1) partes por milhão (ppm) e a de CH₄ é maior do que 1.853 (± 2) partes por bilhão (ppb) (WMO, 2017, p.3), ambos muito provavelmente muito maiores do que em qualquer momento em pelo menos 650 mil anos, período durante o qual o CO₂ permaneceu entre 180 e 300 ppm e o CH₄ entre 320 e 790 ppb. Com relação à era pré-industrial, estes valores atuais correspondem a um crescimento de 145% (CO₂) e 257% (CH₄). Desta forma, pode-se concluir que a taxa recente de mudança é dramática e sem precedentes na história do planeta, desde o surgimento da humanidade, uma vez que os aumentos de CO₂ nunca excederam 30 ppm em mil anos, ao passo em que aumentou em 30 ppm apenas entre os anos de 1990 e 2007 (LE TREUT *et al.*, 2007). Corroborando com essa ideia, o *Intergovernmental Panel on Climate Change* – IPCC relata que a quantidade anual emitida mundialmente, calculada entre os anos 1980 até 1990, foi de 375 milhões de toneladas, o que corresponde a uma porcentagem de efeito estufa antropogênico de aproximadamente 20% (IPCC, 1996b). Segundo Le Treut *et al.* (2007), com relação ao gás metano, a geração por fontes de atividades humanas excede as fontes de sistemas naturais. Apenas no período entre 1960 e 1999, as concentrações de CH₄ cresceram em média pelo menos seis vezes mais rápido do que em qualquer período de quarenta anos dos dois milênios antecedentes ao ano de 1800. O gráfico da Figura 13 apresenta uma evolução das emissões antropogênicas globais de GEE.

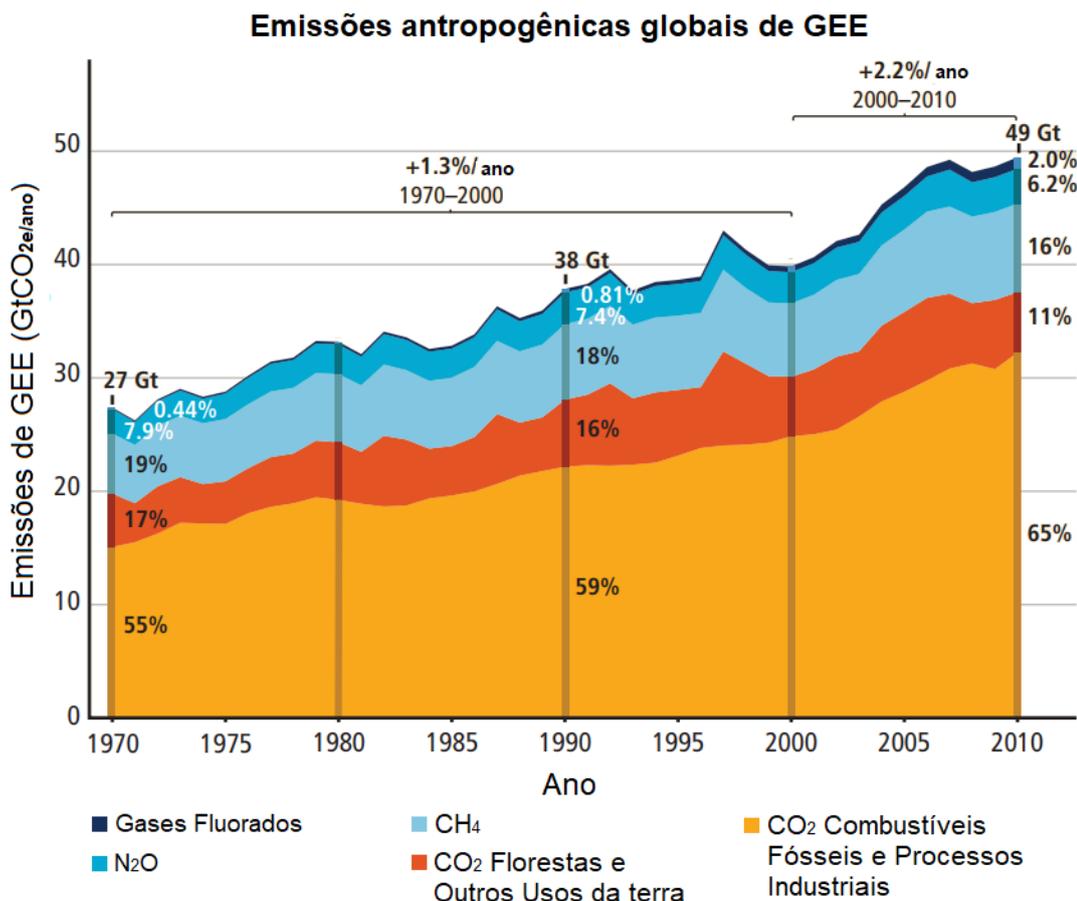


Figura 13. Emissões anuais globais de GEE antropogênicos de 1970 a 2010 (Gt de CO₂-eq/ano).
 Fonte: Adaptado de IPCC (2014, p. 7).

Para o caso do Brasil, em 2014, de acordo com dados fornecidos pelo *World Resources Institute* - WRI, o país ocupava a 7ª posição no ranking mundial de emissões de GEE, liderado por China e Estados Unidos. Em 2014 foram emitidos 1,357 GtCO_{2e}, o que corresponde à 2,8% das emissões globais (WRI, 2014). Para o período entre 1990 e 2014 as emissões brutas de GEE brasileiras aumentaram cerca de 14%. Apenas entre os anos de 2013 e 2014 houve uma queda de 3,8% das emissões (SEEG, 2016, p. 12). Para uma melhor análise dos dados é preciso uma estratificação destes por setores, o que permite observar dois comportamentos distintos: para o caso de mudanças de uso da terra as emissões apresentam diversas oscilações ao longo do tempo, acompanhando principalmente a dinâmica dos processos de desmatamento; já para os casos dos setores de energia, agropecuária, processos industriais e resíduos as emissões revelam um crescimento contínuo desde os anos 1970, como pode ser observado no gráfico da Figura 14.

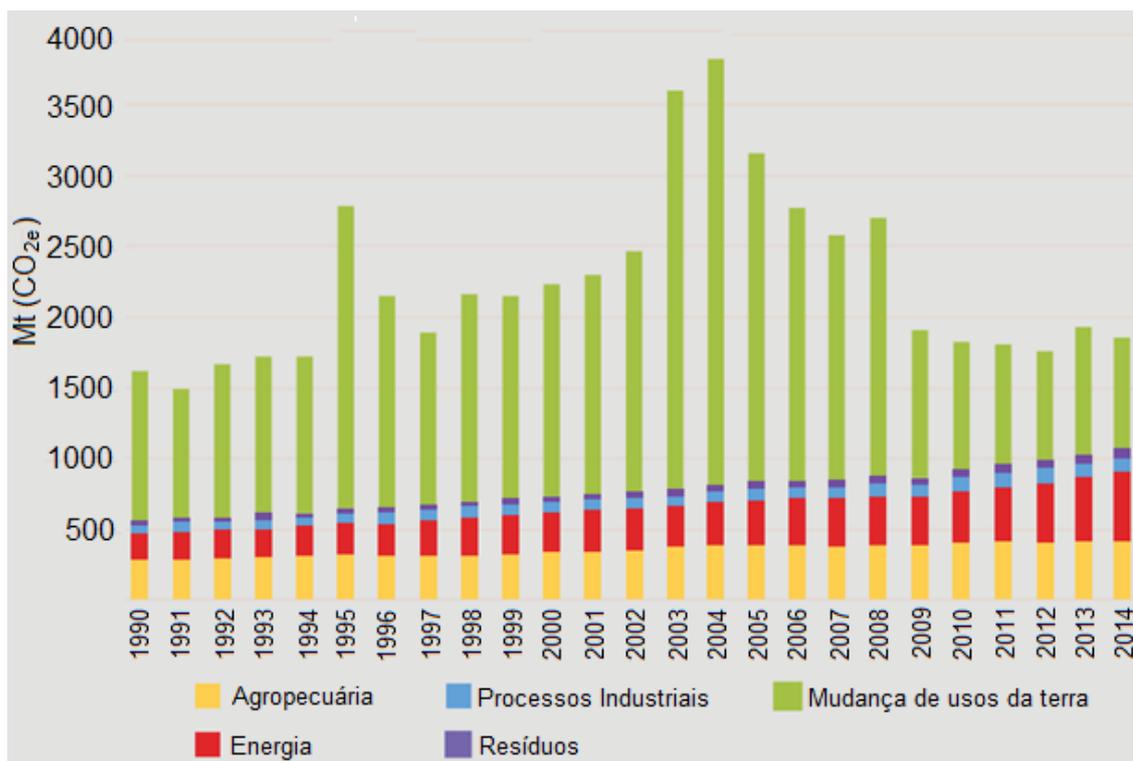


Figura 14. Evolução das emissões brutas de GEE no Brasil entre 1990 e 2014 (Mt CO_{2e}).

Fonte: SEEG (2016, p. 12).

Tratando com especificidade o setor de resíduos, este corresponde à menor parcela de emissões no Brasil, apresentando em 2014 cerca de 68,4 milhões de tCO_{2e}, o que representa um crescimento de 500% desde 1970, sendo de 80% apenas entre os anos 2000 e 2014 (SEEG, 2016, p. 28). Neste cenário, reforça-se a ideia de que o tratamento de esgoto doméstico e a disposição de resíduos têm uma relação direta com a população urbana do país.

Três gases – dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O) – perfazem 99% das emissões brasileiras em CO_{2e}. Apenas o CH₄ representa 20% das emissões totais brutas e 28% das emissões líquidas, tendo como principais fontes a produção pecuária e o tratamento de resíduos. Na Figura 15 é mostrada a evolução da participação dos gases nas emissões de GEE brasileiras.

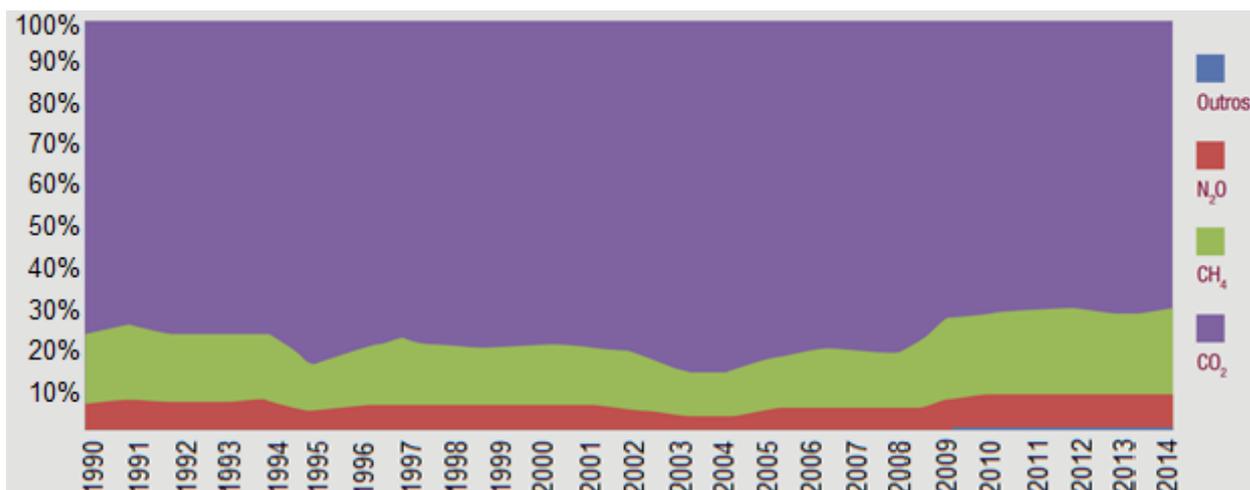


Figura 15. Evolução da participação dos diferentes GEE nas emissões brasileiras entre 1990-2014 (% total em CO_{2e}).

Fonte: SEEG (2016, p. 32).

Dados do SEEG (2014, p. 5) destacam que a disposição de resíduos em aterros e lixões, correspondeu, no ano de 2012, a cerca de 56% das emissões totais do setor de resíduos, ou seja, 26,1 MtCO_{2e}. Este ranking foi seguido pelo tratamento de efluentes domésticos, responsável por 31% das emissões (14,7 MtCO_{2e}). Desta forma é importante frisar que o tratamento adequado dos resíduos apresenta uma tendência inicial de acelerar as emissões de GEE, uma vez que envolve processos anaeróbios que são potencializadores das descargas de metano, o que se observa na transição de lixão para aterro controlado, por exemplo. Todavia, em uma perspectiva de longo prazo, a implementação de sistemas de tratamento mais completos tende a reduzir as emissões, como é o caso de aterros sanitários com queima e recuperação do metano emitido (SEEG, 2016, p. 28). Contudo, apesar das perspectivas de melhorias dos sistemas de tratamento de resíduos ao longo dos próximos anos, a proporção de coleta e tratamento de esgoto e resíduos sólidos ainda é baixa no Brasil. Portanto, a trajetória de emissões ainda será de subida por alguns anos, seguindo as tendências históricas apresentadas no gráfico da Figura 16.

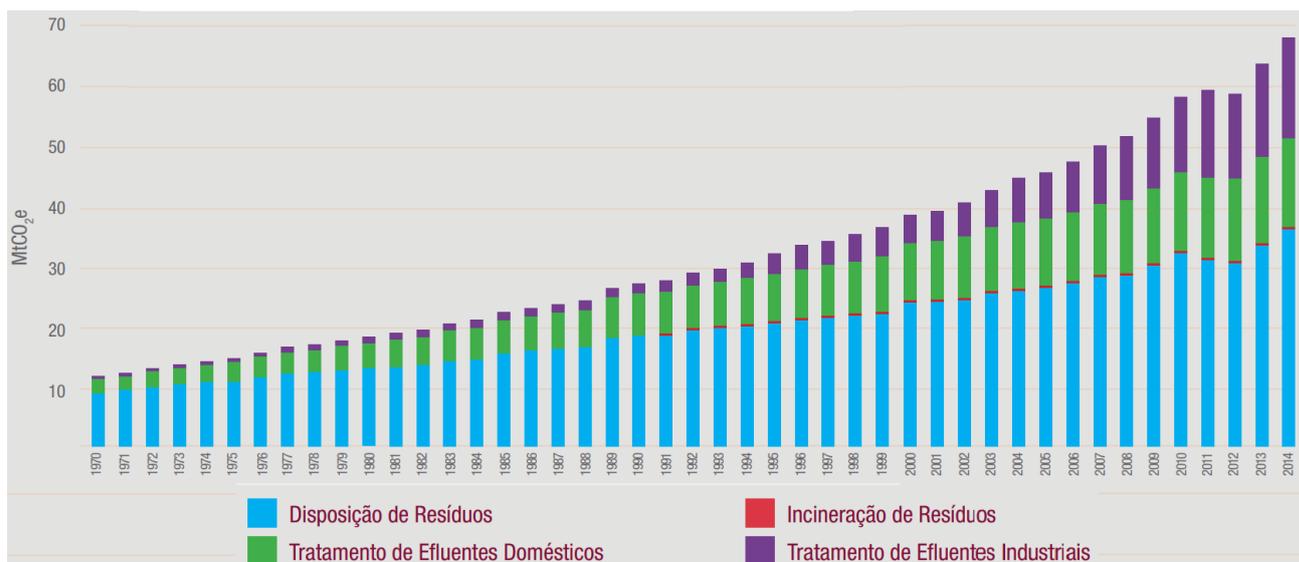


Figura 16. Emissões de GEE por tratamento de resíduos entre 1970 e 2014 (tCO_{2e}).

Fonte: SEEG (2016, p. 28).

Assim, diante deste contexto e perspectivas brasileiras, que seguem o ritmo mundial, no ano de 2015, como resultado da Conferência Mundial do Clima – COP21, 195 países firmaram o chamado Acordo de Paris sobre a redução de emissões de gases de efeito estufa, onde os governos destes países reconheceram de forma conjunta os riscos que estão associados ao aquecimento global. A proposta do Acordo de Paris seria de limitar o aquecimento global a no máximo 2 °C. Todavia, dois anos após a COP21, a Organização das Nações Unidas – ONU alerta que o cumprimento deste acordo está em risco de fracassar, pois, de acordo com o relatório *Emissions Gap Report*, mesmo que todos os compromissos assumidos pelos países fossem cumpridos, isso corresponderia a apenas um terço do que se necessita para a redução dos piores impactos das mudanças climáticas até 2030 (UNEP, 2017, p. XIII). De acordo com o relatório é preciso que tanto os governos quanto os demais atores não estatais aumentem urgentemente sua ambição quanto às medidas propostas, de modo a garantir que os objetivos do Acordo de Paris ainda possam ser alcançados (UNEP, 2017, p. XIII).

A principal fonte natural de metano para a atmosfera é composta por zonas úmidas, como pântanos, mangues e alagados. Outras fontes naturais incluem oceanos, vegetação e hidratos de CH₄. As atividades antrópicas que produzem metano incluem a produção de energia a partir de carvão e gás natural, disposição de resíduos em aterros sanitários, criação de animais ruminantes (por exemplo, gado e ovelha), agricultura de arroz e queima de biomassa. Uma vez emitido, o CH₄ permanece na

atmosfera por aproximadamente 8,4 anos antes de sua remoção, que ocorre principalmente por meio de oxidação química na troposfera, ou ainda, mas em proporções muito menores, por absorção dos solos e sua eventual destruição natural na estratosfera (LE TREUT *et al.*, 2007).

As alternativas de redução das emissões de metano, que possui, atualmente, cerca de 28 vezes maior potencial de efeito estufa do que o dióxido de carbono, configuram-se como um tema atual e crucial diante da realidade das mudanças climáticas.

2.1.4 Projeção populacional

Conforme Waldvogel e Ferreira (2003, p. 55), os estudos populacionais podem enriquecer as análises dos planejadores, bem como fornecer subsídios para a orientação do processo de planejamento, seja nos seus diversos estágios e nas variadas áreas. Por outro lado, as informações demográficas indicam as necessidades atuais e futuras de uma população quanto à demanda por habitação, segurança, mão-de-obra, saneamento básico, dentre outros setores sociais. Assim, torna-se conveniente realizar um estudo acerca dos diferentes métodos de projeção populacional que podem ser aplicados aos municípios do Estado de Minas Gerais.

As diversidades das características da população brasileira, decorrente da vasta dimensão territorial do país e de suas nuances climáticas e geográficas, acarreta em aglomerados populacionais concentrados em determinadas regiões que passam a necessitar de investimentos em infraestrutura nas diversas áreas e setores gerenciados pelo Poder Público.

Segundo Borges *et al.* (2006, p. 2), a estimativa de uma população futura é de extrema importância, na medida em que serve de base para qualquer projeto na área de políticas públicas, bem como na prospecção de novos padrões de consumo ou novas demandas no setor privado. Além da população final do horizonte do projeto, permite-se conhecer a evolução da população ao longo do tempo, o que possibilita uma análise do projeto ao longo do seu período de implantação e operação.

Desta forma, Alem e Tsutiya (1999, p. 39) expressam que, de posse de dados dos censos populacionais, a projeção da população para o horizonte de projeto deve ser feita utilizando-se o método matemático que melhor se ajustar aos dados da série

histórica levantada. Os principais métodos utilizados para as projeções populacionais são: crescimento aritmético; crescimento geométrico; curva logística; e taxa decrescente de crescimento (ALEM e TSUIYA, 1999, p. 41). Sabe-se que se pode utilizar análise de regressão linear ou não linear para resolver todos estes métodos, o que permite a incorporação de mais dados de uma série histórica (HELLER e PÁDUA, 2006, p. 111).

Independentemente do método usado, a estimativa populacional deve ser constantemente reavaliada, uma vez que fatores como a instalação de grandes empreendimentos nos municípios e regiões podem causar uma completa mudança na dinâmica da evolução populacional, podendo aumentar significativamente a população urbana, seja por migração da população rural ou de outros municípios, por exemplo. Outros fatores como as mudanças climáticas podem causar um êxodo rural. Desta forma, para um estudo mais aprofundado, destaca-se que é importante avaliar quais são as tendências de desenvolvimento dos municípios e regiões para que as projeções tenham maior correspondência com a realidade.

Todavia, segundo Heller e Pádua (2006, p. 111), os resultados da projeção populacional devem ser coerentes com a densidade populacional da área em questão, seja ela atual, futura ou de saturação. Assim, é crucial para os processos de planejamento urbano, seja para setor energético ou para o de resíduos sólidos, que se tenha em consideração a densidade populacional dos municípios e/ou regiões em estudo, que se trata da relação entre o número de habitantes e a área do território (VEIGA; VEIGA; e MATTA, 2011, p. 1).

Assim, o documento do Ministério do Meio Ambiente – MMA, intitulado “Plano Simplificado de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos – PSGIRS – Manual de orientação”, apresenta, como sugestões, os modelos aritmético, geométrico e dos mínimos quadrados MMA (2016, p. 24)], conforme descritos a seguir.

2.1.4.1 Método aritmético

O método aritmético consiste em, em um mesmo período de tempo, somar sempre o mesmo número de habitantes à população atual. Para tanto, tal crescimento é expresso pela Equação 1.

$$P = P_2 + \left[\left(\frac{P_2 - P_1}{t_2 - t_1} \right) \cdot (t - t_2) \right] \quad (1)$$

Onde:

P: População futura no ano t;

P₂: População do último censo;

P₁: População do penúltimo censo;

t: Ano da população futura;

t₂: Ano do último censo;

t₁: Ano do penúltimo censo.

A curva típica que representa esta equação é uma reta.

2.1.4.2 Método da progressão geométrica

O método geométrico, ou da projeção geométrica, consiste em uma progressão geométrica, que é uma sequência numérica que cresce (ou decresce) pelo produto por uma taxa (k) constante, de modo que os seus termos, a partir do segundo, são iguais ao produto do termo anterior pela constante k. Assim, o crescimento pelo método geométrico é expresso pela Equação 2.

$$P_2 = P_1 \cdot (1 + k)^{(t_2 - t_1)} \quad (2)$$

Onde:

P₂: População no ano 2;

P₁: População no ano 1;

k: Taxa de crescimento médio anual;

t₂: Ano 2;

t₁: Ano 1.

A curva típica que representa esta equação é uma parábola.

A taxa de crescimento populacional (% / ano) corresponde à variação percentual da população em um determinado período, no caso anual. Para este estudo, considerou-se a metodologia apresentada pelo MMA (2016, p. 23), onde utiliza-se a Equação 3 para obter-se a taxa média de crescimento populacional anual.

$$k = \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\left(\frac{1}{t_2 - t_1} \right)} \right] - 1 \quad (3)$$

Onde:

P_2 : População no final do período considerado;

P_1 : População no início do período considerado;

t_2 : Ano final do período considerado;

t_1 : Ano inicial do período considerado;

k : Taxa média de crescimento anual.

2.1.4.3 Método dos mínimos quadrados

O método dos mínimos quadrados “[...] resume-se ao cálculo da equação da reta dos mínimos quadrados para os valores obtidos em censos anteriores e a sua extrapolação para anos futuros” (MMA, 2016, p. 25). Tal método é dado pela Equação 4, cujos parâmetro são calculados pela Equação 5 e Equação 6.

$$P_n = (a \cdot t_n) + b \quad (4)$$

$$a = \frac{[(\sum t_i) \cdot (\sum P_i)] - \{M \cdot [\sum (t_i \cdot P_i)]\}}{(\sum t_i)^2 - \{M \cdot \sum [(t_i)^2]\}} \quad (5)$$

$$b = \frac{\{(\sum t_i) \cdot [\sum (t_i \cdot P_i)]\} - \{(\sum P_i) \cdot \sum [(t_i)^2]\}}{(\sum t_i)^2 - \{M \cdot \sum [(t_i)^2]\}} \quad (6)$$

Onde:

P_n : População no ano “n”;

P_i : População apurada no ano “i”;

t_n : Ano “n”;

t_i : Ano em que se apurou a população;

M : Número de censos demográficos disponíveis.

2.2 Os Resíduos Sólidos Urbanos

Sabe-se que os primeiros homens eram nômades e seus hábitos eram muito peculiares, quando comparados à maior parte da população mundial de hoje. Eles

moravam em cavernas, sobreviviam da caça e coleta, vestiam-se de peles e formavam uma população minoritária sobre a terra. Ao perceberem que a comida começava a escassear-se, eles se movimentavam para outra região e os seus "lixos", deixados sobre o meio ambiente, eram logo decompostos pela ação do tempo. Contudo, à medida em que foram evoluindo e se organizando em sociedades mais complexas, o ser humano passou a produzir peças para promover seu conforto como vasilhames de cerâmica e madeira, instrumentos e equipamentos rudimentares para o plantio, vestuário mais apropriado e adaptado às novas exigências de estilo de vida. Ao mesmo tempo, iniciou-se o processo de mudanças de hábitos como construção de moradias, pecuária, agricultura, favorecendo a fixação permanente em um local. A produção de lixo conseqüentemente foi aumentando, mas ainda não havia se constituído em um problema mundial. Assim, historicamente, de acordo com Dias (2000) *apud* Junkes (2002, p. 24), o lixo, como resíduo das atividades antrópicas, surgiu quando os homens passaram a viver em grupos, fixando-se em determinados lugares e abandonando os hábitos de nomadismo, tornando-se sedentários. Desde então os processos para eliminação dos resíduos passaram a ser motivo de preocupação, embora as soluções visassem unicamente transferir os resíduos produzidos para locais afastados das aglomerações humanas primitivas. Como exemplo, no Brasil como registro de épocas pré-históricas são encontrados sambaquis (montes de lixo grandiosos que são provenientes da ocupação do litoral brasileiro muito antes do descobrimento pelos europeus) e o lançamento de detritos em locais desabitados a céu aberto ou em rios e córregos (PEIXOTO, CAMPOS e D'AGOSTO, 2005, p. 2).

Conforme Peixoto, Campos e D'Agosto (2005, p.3), até o advento da Revolução Industrial o lixo era produzido em pequena quantidade e constituído essencialmente de sobras de alimentos. A partir de meados do século XVII, com o surgimento das primeiras indústrias na Europa, objetos de consumo em larga escala começaram a ser produzidos, bem como houve a inserção de novas embalagens no mercado, aumentando consideravelmente o volume e a diversidade de resíduos gerados nas áreas urbanas. O homem passou a viver então a era dos descartáveis, em que grande parte dos produtos é inutilizada e jogada fora com enorme rapidez.

A geração de resíduos é em parte determinada pelas opções de consumo de produtos e de serviços (no caso do cidadão comum), pelas opções de produção (no caso do empresário industrial), pelas opções de oferecimento

de serviços (no caso dos empresários de serviço) (LOGAREZZI, 2004, p. 237).

A geração crescente e diversificada de resíduos sólidos nos meios urbanos e a necessidade de disposição final alinham-se entre os mais sérios problemas ambientais enfrentados indistintamente por países ricos e industrializados e pelas sociedades em desenvolvimento. No Brasil, a destinação inapropriada leva os resíduos ao estado de putrefação ao ar livre, gerando gases de fortes odores fétidos, bem como a produção de chorume, que contamina o solo e as águas. Todavia, diante desta realidade, observa-se que nas últimas décadas, os RSU têm se tornado foco de estudos e pesquisas que visam o desenvolvimento de técnicas mais eficientes e seguras de disposição final, além de reuso e reciclagem, como pode ser observado no trabalho de Homma (2000). Neste sentido, busca-se atender às questões levantadas pela II Conferência das Nações Unidas sobre Ambiente e Desenvolvimento, conhecida como Rio-92, onde no capítulo 21 da Agenda 21, intitulado “Manejo ambientalmente saudável dos resíduos sólidos e questões relacionadas com os esgotos”, propõe-se que os padrões não sustentáveis de produção e consumo das sociedades contemporâneas devem ser modificados. Neste sentido, foram hierarquizados quatro principais programas relacionados aos resíduos, sendo eles:

- a) redução ao mínimo dos resíduos;
- b) aumento ao máximo da reutilização e reciclagem ambientalmente saudáveis dos resíduos;
- c) promoção do depósito e tratamento ambientalmente saudável dos resíduos;
- d) ampliação do alcance dos serviços que se ocupam dos resíduos (II UNCED. AGENDA 21, p.1, 1992).

2.2.1 Definição

No tocante à definição de resíduos sólidos urbanos, vulgarmente conhecidos como lixo, é difícil de ser conceituada, de acordo com Lima (1991, p. 11), uma vez que sua origem e formação estão relacionadas a vários fatores. Segundo Magera (2012, p. 58), o vocábulo lixo origina-se do latim *lix*, que significa cinzas ou lixívia, tornando-se então um subproduto das atividades humanas, conforme conclui Marques Neto (2009, p. 13). O autor expressa que este termo foi substituído gradativamente pelo termo resíduo, considerado mais técnico, desde a década de 1960. A palavra “resíduo”,

também originada do latim *residuum*, significa aquilo que resta, que remanesce, ou seja, o que sobra de qualquer substância (HOUAISS e VILLAR, 2009). Marques Neto (2009, p. 13) diz que “o substantivo resíduo, tão logo fez parte do linguajar técnico, foi seguido do adjetivo sólido, para que resíduo sólido ficasse diferenciado tanto dos restos líquidos lançados com os esgotos sanitários, como das emissões gasosas das chaminés”.

Na literatura pesquisada, vários autores concordam que é difícil definir resíduos sólidos urbanos, como pode-se exemplificar quando Lima (1991 p. 11), diz:

Não é uma tarefa fácil definir lixo urbano, pois sua origem e formação estão ligadas a inúmeros fatores, tais como: variações sazonais, condições climáticas, hábitos e costumes, variações na economia etc. Assim, a identificação destes fatores é uma tarefa muito complexa e somente um intenso estudo, ao longo de muitos anos, poderia revelar informações mais precisas no que se refere à origem e formação do lixo no meio urbano. Entretanto, é comum definir como lixo todo e qualquer resíduo que resulte das atividades diárias do homem na sociedade. Estes resíduos compõem-se basicamente de sobras de alimentos, papéis, trapos, couros, madeira, latas, vidros, gases, vapores, poeiras, sabões, detergentes e outras substâncias descartadas pelo homem no meio ambiente.

De acordo com IBAM (2001, p. 25), os termos lixo e resíduo são utilizados, muitas vezes, equivocadamente de forma indistinta. Contudo,

Há de se destacar, no entanto, a relatividade da característica inservível do lixo, pois aquilo que já não apresenta nenhuma serventia para quem o descarta, para outro pode se tornar matéria-prima para um novo produto ou processo. Nesse sentido, a ideia do reaproveitamento do lixo é um convite à reflexão do próprio conceito clássico de resíduos sólidos. É como se o lixo pudesse ser conceituado como tal somente quando da inexistência de mais alguém para reivindicar uma nova utilização dos elementos então descartados.

A literatura técnica se serve da terminologia “resíduos sólidos” para designar o produto de descarte gerado pelas atividades antrópicas, sejam elas industriais, comerciais e/ou de serviços da sociedade em geral, seja urbana, rural, privada ou pública (KRELING, 2006, p. 20). Cherubini (2008, p. 7) diz que os RSU são resultantes da atividade doméstica e comercial das povoações, apresentando grande diversidade e complexidade. Já a Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010 (BRASIL, 2010, p. 3), em seu artigo 3º, inciso XVI, traz a seguinte definição:

Material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação 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 técnicas ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível.

Pensando em um *neo* paradigma com relação à questão ambiental, Pereira Neto (2007, p. 13) define o lixo como “uma massa heterogênea de resíduos sólidos, resultantes das atividades humanas, os quais podem ser reciclados e parcialmente utilizados, gerando entre outros benefícios, proteção à saúde pública e economia de energia e de recursos naturais”.

Para Demajorovic (1995, p.89), o termo lixo foi substituído por resíduos sólidos e assim mudando seu conceito nas últimas décadas. Portanto, o que antes era visto apenas como um subproduto do sistema produtivo, sem utilidade e responsável por causar degradações ao meio ambiente, hoje apresenta valor econômico agregado, sendo geralmente reaproveitados como material reciclável. Para o autor, “estas novas características contribuíram para tornar prioritária, dentro do setor público nos países desenvolvidos, a política de gestão de resíduos sólidos, demandando um comportamento diferente dentro dos setores público, produtivo e de consumo” (DEMAJOROVIC, 1995, p.89).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, em sua norma NBR 10.004 de 2004, define os resíduos sólidos como:

[...] resíduos nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamentos de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas peculiaridades tornem inviável seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível [...] (ABNT, 2004, p. 1)

De acordo com Qian, Koerner e Gray (2001, p. 5), as propriedades químicas e físicas dos resíduos gerados pelos diversos setores da sociedade são drasticamente diferentes entre si. Para o autor, os resíduos podem ser classificados em nove grandes grupos, a saber:

- Municipais (ou urbanos);
- Perigoso;
- Industriais;
- Médicos;

- Universais;
- De construção e demolição;
- Radioativos;
- De Mineração;
- Agrícolas (ou rurais).

As principais classificações dos resíduos sólidos usadas no Brasil, são as apresentadas pela ABNT (2004), que classifica os resíduos sólidos em função de sua periculosidade (Quadro 1), e Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS, que classifica os resíduos sólidos quanto a sua origem e sua periculosidade (Quadro 2).

Quadro 1. Classificação de resíduos sólidos segundo NBR 10.004.

Classificação	Características
Classe I Perigosos	Apresentam riscos à saúde pública ou ao meio ambiente, ou possuem uma ou mais das seguintes propriedades: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade.
Classe IIA Não Perigosos Não Inertes	Não se enquadram na definição de resíduos classe I, tampouco na classe IIB. Podem ter propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.
Classe IIB Não Perigosos Inertes	Quaisquer resíduos que, quando amostrados de uma forma representativa e submetidos a um contato dinâmico e estático com a água destilada ou desionizada, à temperatura ambiente, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor, conforme padrões.

Fonte: ABNT (2004, p. 3-5).

De acordo com a NBR 10.004,

a classificação de resíduos sólidos envolve a identificação do processo ou atividade que lhes deu origem, de seus constituintes e características, e a comparação destes constituintes com listagens de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido. A segregação dos resíduos na fonte geradora e a identificação da sua origem são partes integrantes dos laudos de classificação, onde a descrição de matérias-primas, de insumos e do processo no qual o resíduo foi gerado devem ser explicitados (ABNT, 2004, p. 1).

Quadro 2. Classificação de resíduos sólidos segundo PNRS.

I – quanto à origem	<p>a) resíduos domiciliares: os originários de atividades domésticas em residências urbanas;</p> <p>b) resíduos de limpeza urbana: os originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana;</p> <p>c) resíduos sólidos urbanos: os englobados nas alíneas a e b;</p> <p>d) resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos nas alíneas b, e, g, h e j;</p> <p>e) resíduos dos serviços públicos de saneamento básico: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos na alínea c;</p> <p>f) resíduos industriais: os gerados nos processos produtivos e instalações industriais;</p> <p>g) resíduos de serviços de saúde: os gerados nos serviços de saúde, conforme definido em regulamento ou em normas estabelecidas pelos órgãos do Sisnama e do SNVS;</p> <p>h) resíduos da construção civil: os gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis;</p> <p>i) resíduos agrossilvopastoris: os gerados nas atividades agropecuárias e silviculturais, incluídos os relacionados a insumos utilizados nessas atividades;</p> <p>j) resíduos de serviços de transportes: os originários de portos, aeroportos, terminais alfandegários, rodoviários e ferroviários e passagens de fronteira;</p> <p>k) resíduos de mineração: os gerados na atividade de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios;</p>
II – quanto à periculosidade	<p>a) resíduos perigosos: aqueles que, em razão de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade, carcinogenicidade, teratogenicidade e mutagenicidade, apresentam significativo risco à saúde pública ou à qualidade ambiental, de acordo com lei, regulamento ou norma técnica;</p> <p>b) resíduos não perigosos: aqueles não enquadrados na alínea a.</p>

Fonte: BRASIL (2010).

Em função da fonte de geração, Tchobanoglus, Theisen e Vigil (1993) apresentam uma classificação dos resíduos como residenciais, comerciais, municipais, industriais, áreas abertas, estações de tratamento e agrícolas. De acordo com Lajolo (2003, p. 14), com relação a esta classificação dos RSU, é importante ter conhecimento sobre sua origem, uma vez que

[...] a origem do lixo determina a responsabilidade pelo seu gerenciamento, cabendo às prefeituras a coleta dos resíduos de origem domiciliar, comercial

e pública. Os demais são de responsabilidade dos respectivos geradores, que costumam contratar empresas particulares para removê-los (LAJOLO, 2003, p. 14).

A Lei nº 11.445/2007, que estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico, em seu Artigo 6º diz que “o lixo originário de atividades comerciais, industriais e de serviços cuja responsabilidade pelo manejo não seja atribuída ao gerador pode, por decisão do poder público, ser considerado resíduo sólido urbano” (BRASIL, 2007).

2.2.2 Caracterização dos resíduos sólidos urbanos

A caracterização física dos resíduos sólidos urbanos é de grande importância para os estudos de levantamento de potencial teórico de produção de biogás de aterro, uma vez que a composição dos resíduos aterrados altera a composição final do biogás. Tal importância é constatada por diversos autores como Mancini (2001, p. 11), Gomes (1989, p. 46) e Castro (1996, p. 35), sendo que este último descreve a determinação da composição gravimétrica dos resíduos como “[...] a primeira e mais importante etapa para qualquer trabalho referente a tais resíduos [...]”, incluindo a “[...] orientação e determinação do sistema mais adequado para o tratamento e disposição” (CASTRO, 1996, p. 35).

Neste contexto, a ABNT, em sua norma NBR 10.007 de 2004, diz que a caracterização se trata da “[...] determinação dos constituintes e de suas respectivas porcentagens em peso e volume, em uma amostra de resíduos sólidos, podendo ser física, química ou biológica” (ABNT, 2004).

Assim, Zanta *et al.* (2006) *apud* Santos *et al.* (2013, p. 49) aponta que as características físicas, químicas e biológicas dos RSU variam de acordo com sua fonte ou atividade geradora, nas quais, vários fatores como sociais, econômicos, geográficos, educacionais, culturais, tecnológicos e legais, afetam processo de geração tanto em quantidade como em composição qualitativa. Além disso, para ILPES (1998), as características dos RSU são influenciadas por fatores como: densidade populacional; grau de desenvolvimento econômico do local; hábitos de consumo, principalmente alimentício; variações sazonais e condições.

De acordo com Cherubini (2008, p. 7), os principais fatores que influenciam a origem

e formação dos RSU são:

- variações sazonais;
- condições climáticas;
- área relativa de produção;
- número de habitantes do local;
- nível educacional;
- poder aquisitivo;
- hábitos e costumes da população;
- segregação na origem;
- sistematização na origem;
- tipo de equipamento de coleta;
- leis e regulamentação específicas.

Estudos da *Japan International Cooperation Agency* – JICA mostraram uma relação entre o poder econômico dos países e a geração per capita diária de RSU (JICA, 2005, p. 3-1):

- países de baixa renda produzem de 0,4 a 0,6 kg /hab /dia;
- países de média renda produzem entre 0,5 a 0,9 kg/hab/dia;
- países de alta renda produzem de 0,7 a 1,8 kg/hab/dia.

Os resíduos sólidos urbanos são produzidos como resultado da produtividade econômica e do consumo, conforme já apresentado. Os países com maiores rendimentos produzem mais resíduos per capita, caracterizados por porções mais altas de materiais de embalagem e resíduos recicláveis. Já nos países de baixa renda, há menos atividade comercial e industrial, além de menor atividade institucional, resultando em menores taxas de geração de resíduos. Em países onde os rendimentos individuais são baixos, há, por necessidade, reciclagem extensiva na fonte (COINTREAU, 2006, p. 3-4). Dados do IBGE (2010) apontam para a média de produção diária de resíduos nos municípios brasileiros conforme estratificação referente à faixa populacional. Estes dados podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1. Produção per capita de RSU em kg/dia – conforme extratos populacionais dos municípios brasileiros

População (hab)	Produção de RSU (kg/hab/dia)
Até 9.999	0,46
De 10.000 a 19.999	0,42
De 20.000 a 49.999	0,48
De 50.000 a 99.999	0,56
De 100.000 a 199.999	0,69
De 200.000 a 499.999	0,78
De 500.000 a 999.999	1,29
A partir de 1.000.000	1,16

Fonte: IBGE (2010).

Ressalta-se que existem algumas limitações nas informações existentes nesta tabela, pois há municípios em que não há coleta regular de RSU e alguns não têm equipamento de pesagem dos resíduos. Portanto, trata-se de estimativas por falta de dados mais concretos e consistentes.

Assim, para que se conheçam detalhadamente as características do RSU, esta análise deve ser realizada para cada município, determinando-se os diferentes componentes e a participação destes na composição total dos resíduos (FRÉSCA, 2007, p. 40). Segundo Gomes (1989, p. 47), os dados da caracterização física dos RSU variam conforme diversos fatores, sendo específicos para determinados contextos locais, por isso deve-se evitar a generalização de dados de uma determinada localização para outra. Corroborando com este pensamento, Sartori (1995, p. 28) reporta que a geração de RSU é típica da comunidade que a gera e Soares (2011, p. 8) reforça que as características dos resíduos sólidos urbanos se modificam com o decorrer do tempo, principalmente em função do número de habitantes de cada cidade. Contudo, em caso de escassez de dados ou de confiabilidade dos mesmos, como é o caso da maioria dos municípios brasileiros, é possível usar dados típicos de determinada região ou município.

As principais características dos RSU são apresentadas nos Quadros 3 e 4 e agrupadas em dois grupos principais: características químicas e físicas, respectivamente.

Quadro 3. Principais características químicas dos RSU.

Características Químicas	
Poder calorífico	Indica a capacidade potencial de um material desprender determinada quantidade de calor, quando submetido à queima.
Composição química	Consiste na determinação dos teores de cinzas, carbono, nitrogênio, potássio, cálcio, fósforo, enxofre, matéria orgânica, resíduo mineral total e resíduo mineral solúvel.
Relação Carbono/Nitrogênio (C/N)	Indica o grau de decomposição da matéria orgânica dos RSU nos processos de tratamento e disposição final.
Potencial hidrogeniônico (pH)	Indica o teor de alcalinidade ou acidez da massa de RSU e está relacionado com a velocidade de degradação e estabilização da matéria orgânica nos resíduos.
Teor de sólidos totais e voláteis	Pela determinação do teor de sólidos totais voláteis determina-se a porcentagem de cinzas e a quantidade de matéria orgânica existente nos RSU., podendo indicar a degradabilidade dos RSU ao longo do tempo.

Fonte: Adaptado de Soares (2011, p. 9-17) e IBAM (2001, p. 36)

Quadro 4. Principais características físicas dos RSU.

Características Físicas	
Composição gravimétrica	Trata-se da determinação dos constituintes dos RSU e de suas respectivas porcentagens em peso e volume, permitindo uma avaliação preliminar da degradabilidade, do poder de contaminação ambiental, das possibilidades de reutilização, reciclagem, valorização energética e orgânica dos RSU.
Distribuição do tamanho das partículas	É comumente realizada utilizando-se a análise granulométrica clássica da mecânica dos solos, sendo que o percentual de materiais com granulação mais fina tende a aumentar com o aumento da idade do RSU, como resultado da biodegradação.
Distribuição dos grupos de materiais	Consiste na separação das amostras de RSU, sendo escolhidos de tal maneira que cada grupo de material isolado apresente características de materiais similares com referência ao comportamento mecânico e estabilidade bioquímica.
Caracterização morfológica	Tem o intuito de classificar os resíduos quanto à forma e medida no tocante às características relevantes para a mecânica dos resíduos, consistindo na separação dos RSU conforme a sua dimensão geométrica.

Teor de umidade	Este fator tem influência direta sobre a velocidade de decomposição da matéria orgânica e depende da composição inicial do material, das condições climáticas locais, do processo de operação dos aterros, da taxa de decomposição biológica, da capacidade de funcionamento dos sistemas de coleta de lixiviado e do sistema de <i>liner</i> de recobrimento; sendo que o teor pode variar de um ponto a outro em um mesmo aterro.
Peso específico	É a relação entre o peso e volume unitário na massa de resíduos, podendo variar de acordo com a etapa considerada e ao longo do tempo; tal parâmetro está diretamente relacionado à composição gravimétrica e ao grau de compactação dos RSU.
Permeabilidade	É um importante parâmetro de projeto e operação de aterros, sendo altamente dependente do grau de compactação, pressão de sobrecarga, idade e composição dos RSU.
Compressividade	É a densidade ou a redução do volume que uma massa de lixo pode sofrer quando compactada. Submetido a uma pressão de 4kg/cm ² , o volume do lixo pode ser reduzido de um terço (1/3) a um quarto (1/4) do seu volume original.
Temperatura	As temperaturas no interior da massa de RSU são de grande importância principalmente no que se refere à atividade de microrganismos que promovem a degradação dos diversos componentes do RSU.

Fonte: Adaptado de Soares (2011, p. 9-17) e IBAM (2001, p. 35)

Quanto às características biológicas dos RSU, estas são

[...] determinadas pela população microbiana e dos agentes patogênicos presentes no lixo que, ao lado das suas características químicas, permitem que sejam selecionados os métodos de tratamento e disposição final mais adequados [...] O conhecimento das características biológicas dos resíduos tem sido muito utilizado no desenvolvimento de inibidores de cheiro e de retardadores/aceleradores da decomposição da matéria orgânica, normalmente aplicados no interior de veículos de coleta para evitar ou minimizar problemas com a população ao longo do percurso dos veículos (IBAM, 2001, p. 36).

Uma questão importante que deve ser observada quanto a composição dos RSU é o teor de carbono orgânico degradável em cada componente dos resíduos (Britto, 2006, p. 27). A composição dos resíduos é um dos principais fatores que influenciam as emissões de gases de efeito estufa – GEE no tratamento de RSU, pois diferentes tipos de resíduos contêm diferentes quantidades de carbono orgânico degradável (DOC) e carbono fóssil. As composições de resíduos, bem como as classificações utilizadas

para coletar dados sobre a composição de resíduos em RSU têm grandes variações, dependendo das diferentes regiões e países (IPCC, 2006, p. 2.11).

O IPCC (2006, p. 2.11) apresenta dados padrão sobre a composição de RSU, todos conforme os seguintes tipos de resíduos:

- 1) resíduos alimentares;
- 2) jardim (jardim) e parque de resíduos;
- 3) papel e cartão;
- 4) madeira;
- 5) têxteis;
- 6) fraldas (fraldas descartáveis);
- 7) borracha e couro;
- 8) plásticos;
- 9) metal;
- 10) vidro (e cerâmica e porcelana);
- 11) outro (por exemplo, cinzas, sujeira, poeira, solo, resíduos eletrônicos).

As tipologias de resíduos de (1) a (6) contêm a maioria do DOC em RSU. Cinzas, poeira, borracha e couro também contêm certas quantidades de carbono não fóssil. Alguns têxteis, plásticos (incluindo plásticos em fraldas descartáveis), borracha e resíduos eletrônicos contêm a maior parte do carbono fóssil em RSU. O papel (com revestimentos) e o couro (sintético) também podem incluir pequenas quantidades de carbono fóssil (IPCC, 2006, p. 2.11).

A Tabela 2 apresenta uma visão de como a composição dos RSU varia de acordo com os níveis de renda de cada país.

Percebe-se que há menos vegetais e outros orgânicos putrescíveis nos RSU de países de alta renda, o que faz com que o teor de umidade resultante dos resíduos seja baixo e o valor calorífico seja relativamente alto. Por outro lado, as menores taxas de geração de RSU em países em desenvolvimento não têm poder calorífico suficiente que viabilize a incineração autossustentável, a menos que haja segregação dos resíduos, separando-se os orgânicos dos não-orgânicos.

Tabela 2. Perspectivas globais da composição de Resíduos Sólidos Urbanos

Composição dos resíduos (em base úmida):	Países de baixa renda	Países de renda média	Países de alta renda
Vegetais/Putrescíveis [%]	40 a 85	20 a 65	7 a 55
Papel e Papelão [%]	1 a 10	15 a 40	15 a 50
Metal [%]	1 a 5	1 a 5	3 a 13
Vidro [%]	1 a 10	1 a 10	4 a 10
Borracha [%]	1 a 3	1 a 5	2 a 12
Granulados [%] (areia, cinzas, vidro quebrado)	15 a 50	15 a 40	5 a 20
Outras Características:			
Umidade [%]	40 a 80	40 a 60	20 a 35
Densidade em caminhões [kg/m ³]	250 a 500	170 a 330	120 a 200
Poder Calorífico Inferior [kcal/kg]	800 a 1100	1000 a 1500	1500 a 2700

Fonte: Adaptado de Cointreau (2006, p. 5),

No caso do Brasil, o MMA (2011, p. 9) apresenta no gráfico da Figura 17 uma expectativa de composição gravimétrica dos RSU.

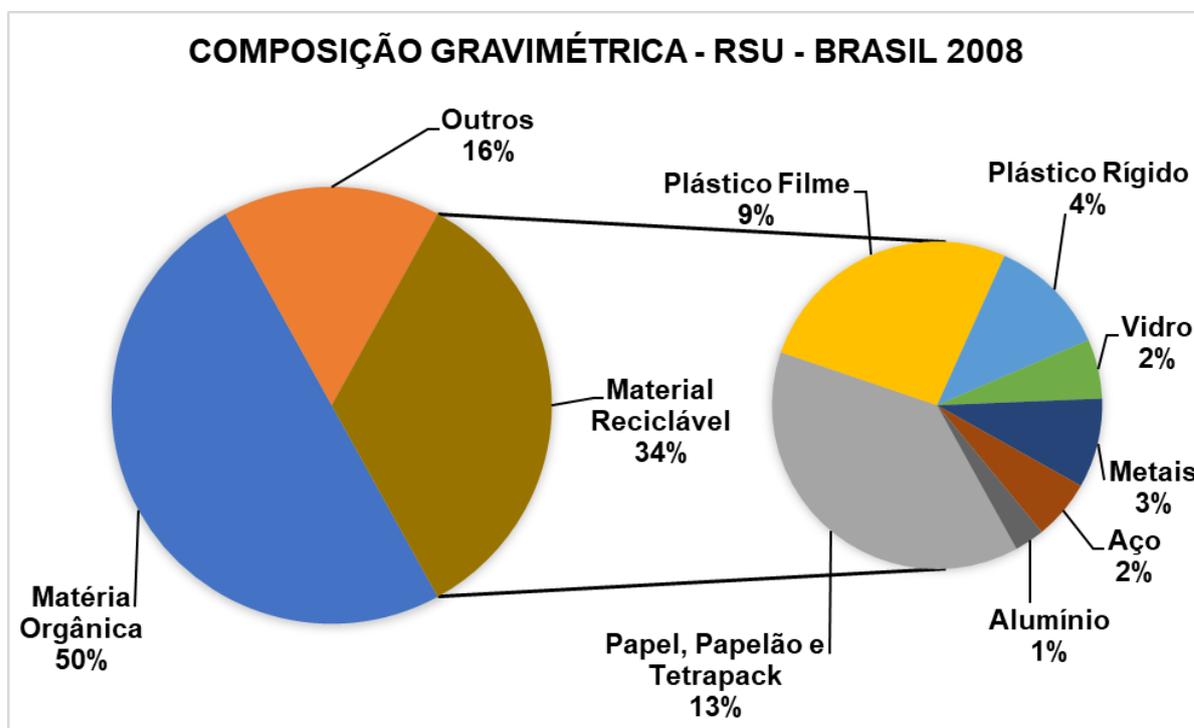


Figura 17. Estimativa da composição gravimétrica considerando a base de dados coletada em 2008.

Fonte: Adaptado de MMA (2011, p. 9).

2.2.3 O tratamento de resíduos sólidos urbanos e sua destinação final

O volume de resíduos sólidos urbanos está aumentando devido ao crescimento da população e à cultura "do descartável", que persiste em grande parte do mundo. O resíduo domiciliar representa 60% do total de resíduo produzido (domiciliar, hospitalar, industrial, comercial, entulho, resíduo público), é impossível encontrar uma efetiva solução sem a cooperação da população (HOMMA, 2000, p. 138). Conforme Gug, Cacciola e Sobkowicz (2015, p. 1), a capacidade dos aterros para atender às demandas de nossos resíduos é limitada, devido ao espaço necessário e à poluição do solo, da água e do ar, resultantes de aterros mal gerenciados e não normatizados.

De acordo com Dias (2000) *apud* Junkes (2002, p. 28-29) a geração de resíduos sólidos urbanos é proporcional ao aumento da população, ao passo em que é desproporcional à disponibilidade de soluções para o gerenciamento dos detritos, resultando em sérias defasagens na prestação de serviços, tais como a diminuição gradativa da qualidade do atendimento, a redução dos índices de atendimento à população quanto à coleta e o descarte inadequado em locais inapropriados. Fato é que equilibrar o incremento de resíduos e as escassas possibilidades de dispô-los corretamente, ainda sem agredir a saúde humana e sem causar riscos ao meio ambiente, é o grande desafio que se impõe segundo o mesmo autor.

Conforme já exposto, a hierarquia da gestão de resíduos sólidos passa pela prevenção à poluição, que é definido por Duncan (1994, p.4) como

Qualquer prática que reduz a quantidade ou impacto ambiental e na saúde de qualquer poluente antes da sua reciclagem, tratamento ou disposição final, incluindo modificação de equipamentos ou tecnologias, reformulação ou design de produtos, substituição de matérias-primas e melhoria organizacional (*housekeeping*), treinamento ou controle de inventário.

Assim, deve-se adotar uma estratégia de controle da poluição que vise evitar que a mesma seja gerada ao invés de se buscar soluções dos problemas de poluição após os mesmos terem sido criados. Na Figura 18, Braga *et al.* (2005, p. 297) apresenta uma hierarquia a ser considerada no gerenciamento de resíduos sólidos urbanos, dentro do conceito de Prevenção da Poluição.

Assim, o tratamento dos resíduos e sua disposição final constituem-se como as duas últimas etapas desta hierarquia de gestão de RSU.

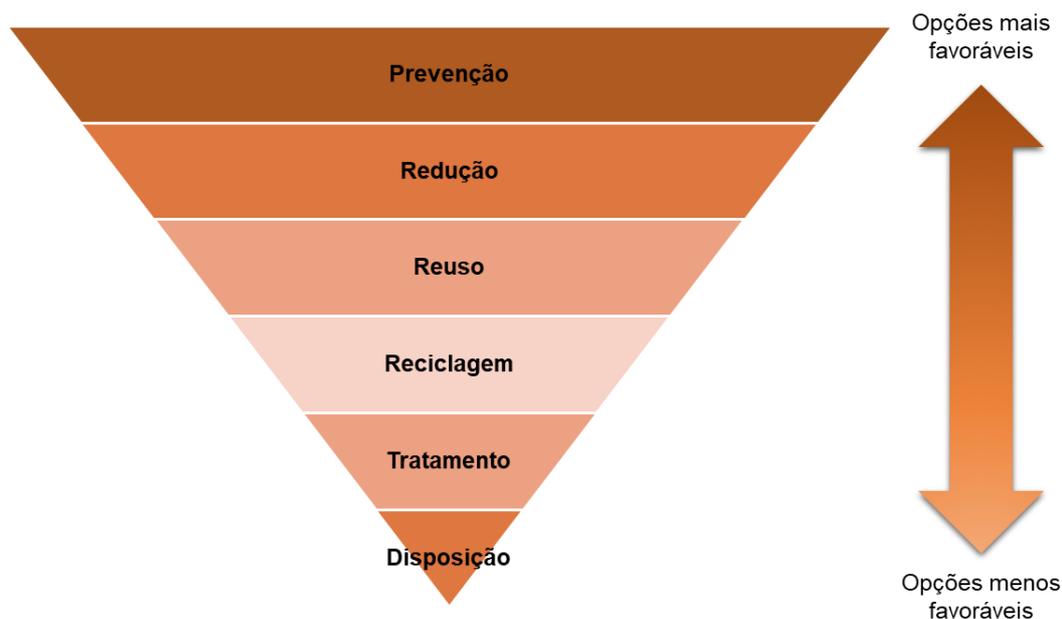


Figura 18. Hierarquia para o gerenciamento de RSU com a introdução do conceito de Prevenção da Poluição.

Fonte: Adaptado de Braga *et al.* (2005, p. 297) e WEC (2017, p. 33).

Segundo Bahr *et al.* (2006, p. 1),

[...] em países emergentes e em desenvolvimento, a disposição aberta de resíduos em aterros (sem contenção de gases e chorume) apresenta-se como prática comum de disposição de resíduos. A margem financeira não permite, na maioria das vezes, a realização de uma tecnologia viável para um melhor tratamento e disposição de resíduos, como é realizado na Alemanha. A introdução posterior da captura e aproveitamento de gás se tornará trabalhosa e cara, mostrando-se inviável no futuro.

O tratamento de resíduos sólidos não é uma questão fácil e não pode ser reduzido a soluções simplistas, sem uma visão holística e profunda. As complexidades do sistema e a natureza integrada dos materiais e da poluição são evidenciadas rapidamente em todos os métodos conhecidos e aplicáveis atualmente, como pode ser observado na Figura 19. Por exemplo, a incineração de resíduos é dispendiosa e representa desafios quanto à poluição do ar e disposição das cinzas, exigindo-se que os resíduos sejam armazenados de tal forma a permanecerem secos, sendo que grande parte do fluxo de resíduos nem é combustível. Já os aterros requerem disponibilidade de terra, e a localização geralmente é contrariada por potenciais residentes vizinhos. Assim, como expressam Hoornweg e Bhada-Tata (2012, p. 4), resolver um problema muitas vezes introduz um novo, e se não for bem executado, o novo problema geralmente é de maior custo e complexidade.

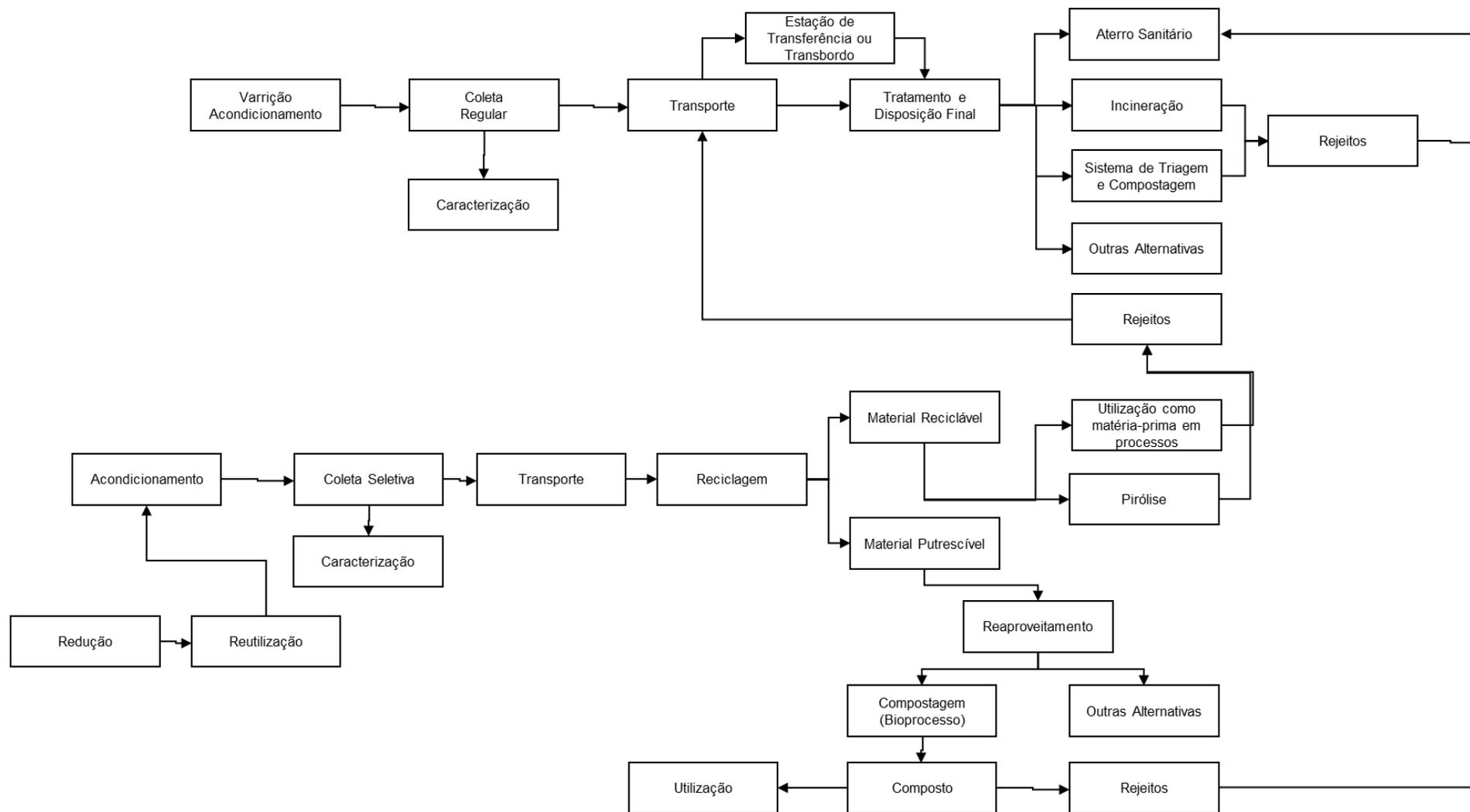


Figura 19. Operações efetuadas na área de resíduos sólidos domiciliares.

Fonte: Schalch *et al.* (2002, p. 75).

Em todo o mundo já há algumas técnicas de tratamento ou beneficiamento dos resíduos sólidos urbanos que têm se apresentado como muito importantes na busca de soluções para esse problema. Pode-se citar os métodos de reciclagem e de compostagem dos resíduos, uma vez que segundo Bley Jr. (2001) *apud* Junkes (2002, p. 17), os resíduos sólidos domiciliares são compostos por uma fração orgânica significativa, em média 50% do peso total no Brasil, cerca de 35% por resíduos industrialmente recicláveis e o restante, cerca de 15%, é efetivamente rejeitado, devendo ser descartado em aterro licenciado.

Dentro deste contexto, a Alemanha se destaca mundialmente como líder mundial em tecnologias e políticas de resíduos sólidos, sendo detentora atual dos mais elevados índices de reaproveitamento do mundo. Dentro das ferramentas usadas no país, está a reeducação e sensibilização da população, o que gerou resultados positivos, como a redução do total de resíduos domésticos produzidos no país, passando de 52,8 milhões de toneladas, em 2002, para 49,2 milhões de toneladas, em 2010. Contudo, o grande destaque do país está no tratamento e destinação de seus resíduos. Assim, de acordo com dados do Eurostat, órgão de estatísticas da União Europeia, em 2011, 63% de todos os RSU foram reciclados neste país (46% por reciclagem e 17% por compostagem), contra uma média continental de 25%. Quanto aos aterros sanitários, a média europeia é de que cerca de 38% dos RSU são aterrados, ao passo que na Alemanha a taxa é virtualmente zero, graças, em grande parte, ao fato de que 8 em cada 10 kg do lixo não reaproveitado são incinerados, gerando energia térmica e elétrica.

Cabe destacar que o sucesso da Alemanha em liderar mundialmente o gerenciamento de resíduos sólidos parte do cumprimento de leis e normas ousadas e bastante rígidas. De acordo com Eigenheer (2009, p. 77), em 1957, com a promulgação da Lei de Manejo de Águas (*Wasserhaushaltgesetz*), já havia indicações explícitas sobre o armazenamento e disposição dos RSU. Contudo, ainda sim, na década de 1960 parte dos resíduos urbanos ainda era depositada em locais inadequados, onde apenas a Alemanha Ocidental dispunha de mais de cinquenta mil vazadouros de lixo. Assim, em 1972, entrou em vigor a Lei de Tratamento de Resíduos (*Abfallbeseitigungsgesetz*), que regulamentava os aterros sanitários e transferia parte dos custos do tratamento e destinação dos RSU aos cidadãos. Assim, Eigenheer (2009, p. 77) expressa que

A partir daí, leis e normas foram estabelecidas sucessivamente e de forma escalonada, dotando a Alemanha de uma sofisticada gestão de resíduos sólidos, agora não só voltada para a coleta do lixo e limpeza das ruas, mas também para a destinação final e recuperação dos resíduos sólidos.

Portanto, em 1991 estabeleceu-se um sistema de recolhimento e reaproveitamento de embalagens e já em 1993 foram estabelecidos diferentes tipos de aterros sanitários, processo seguido pela União Europeia anos mais tarde. Já no fim da primeira década do século XXI, com eficientes sistemas de coleta seletiva espalhados por todo o país, “a proposta é primeiramente compostar, reciclar e incinerar. Só então o que resta segue para um aterro de inertes” (EIGENHEER, 2009, p. 77).

A União Europeia aprovou em 1999 a Diretiva 1999/31/EC sobre aterros sanitários de resíduos, onde já estava prevista a redução de resíduos destinados a aterros sanitários, bem como restrições à abertura de novos aterros sanitários. De acordo com a hierarquia de gerenciamento de resíduos⁵, o aterro é a opção menos preferível e deve ser limitado ao mínimo necessário, conforme a Diretiva prescreve. As limitações são apresentadas no Artigo 5º, § 2, em que se estabelecia o prazo de 5 anos para a redução de disposição de resíduos biodegradáveis em aterros sanitários para 75% em peso; 8 anos para reduzir a 50% em peso; e 15 anos para reduzir a 35% em peso, sempre com referência às quantidades apresentadas no ano de 1995 (CONSELHO DA UNIÃO EUROPEIA, 1999, p. 5). Entretanto, a Comissão Europeia (2014, p. 1) demonstra que, após quinze anos da implantação da Diretiva 1999/31/EC, o cenário dos países membros não só não era homogêneo, como também não havia atingido as expectativas, discorrendo assim que

a atividade económica da UE desperdiça atualmente uma grande quantidade de matérias-primas secundárias potenciais contidas no fluxo de resíduos. No total, em 2011, a EU produziu cerca de 2,5 mil milhões de toneladas de resíduos. A título de exemplo, refira-se que apenas uma percentagem limitada dos resíduos sólidos urbanos produzidos na União foi reciclada (40%), tendo os restantes sido depositados em aterro (37%) ou incinerados (23%), sendo que, destes, cerca de 500 milhões de toneladas poderiam ter sido reciclados ou reutilizados [...] Em 2011, enquanto seis Estados-Membros depositavam menos de 3% dos seus resíduos urbanos em aterro, dezoito dentre eles desbaratavam [desperdiçavam] recursos depositando mais de 50% em aterro, ultrapassando nalguns casos os 90%. Esta situação revela grandes diferenças em termos de desempenho na gestão dos resíduos, um problema que urge resolver.

⁵ “A hierarquia da gestão dos resíduos dá preferência, em primeiro lugar, à prevenção, seguida da reutilização e da reciclagem, antes da valorização energética e da eliminação, que inclui a deposição em aterro e a incineração sem recuperação energética” (COMISSÃO EUROPEIA, 2014, p. 1).

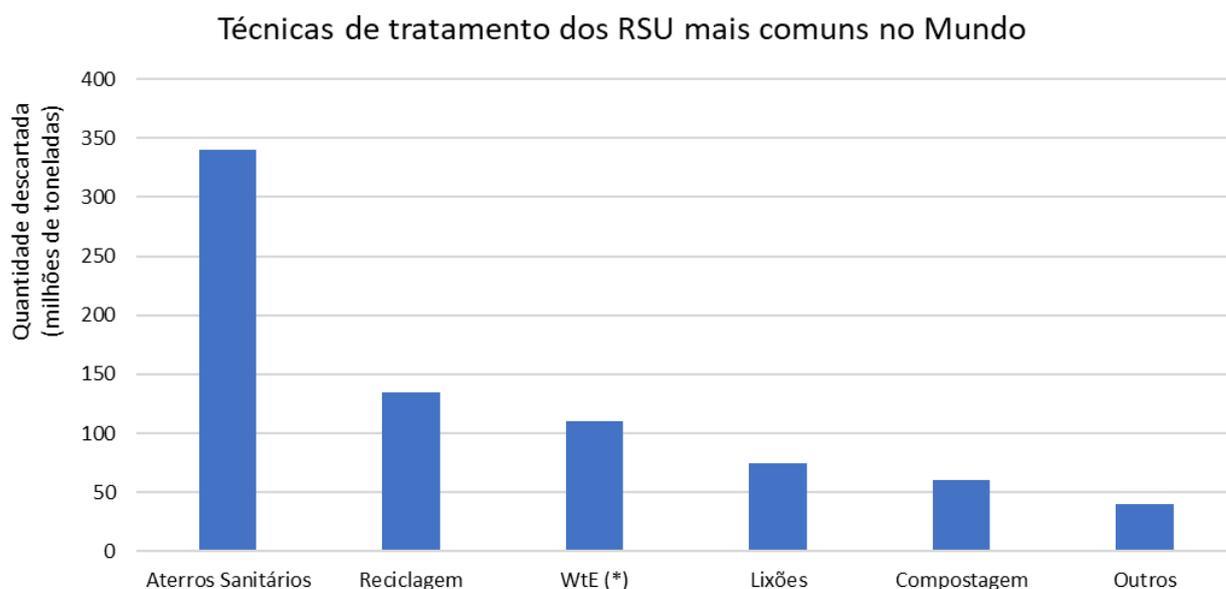
Em 2014, a Comissão Europeia aprovou uma legislação que visa restringir ainda mais o uso de aterros sanitários até 2025. Estas medidas só foram possíveis graças ao grau de desenvolvimento tecnológico dos países da União Europeia e aos altos níveis de educação e conscientização da população, que constituem parte importante no processo de tratamento dos RSU (COMISSÃO EUROPEIA, 2014, p. 7).

Já no Brasil, a Lei Nacional de Resíduos Sólidos, Lei nº 12.305/2010, em seu Artigo 3º, considera que a destinação final ambientalmente adequada de resíduos é aquela que inclui a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético, preferencialmente, mas também inclui a disposição final ambientalmente adequada. Quanto a esta, a lei define que se trata da distribuição ordenada de rejeitos em aterros, fazendo-se necessária a observação de normas operacionais específicas de modo a evitarem-se danos ou riscos à saúde pública e à segurança, possibilitando a minimização de impactos ambientais adversos. Assim, observa-se que antes da disposição em aterros sanitários, é preferível medidas de tratamento dos resíduos, seguindo também a mesma filosofia da legislação europeia. A Lei estabelecia, também, o ano de 2014 como limite para que, a partir deste, sejam depositados em aterros sanitários apenas os rejeitos sem viabilidade econômica para a recuperação, ou seja, materiais cujas possibilidades técnicas e econômicas de utilização e tratamento disponíveis já estejam esgotadas. Determina-se ainda que lixões, ou vazadouros a céu aberto, e aterros controlados fossem fechados (BRASIL 2010). Todavia, no Brasil não se pode dizer que os aterros sanitários – locais de disposição ambientalmente adequada – recebam apenas rejeitos. Como pode-se observar em consultas aos órgãos competentes estaduais e municipais, a realidade é que o que ocorre ainda é a disposição final de quaisquer resíduos em solo, sendo que apenas 27,7% das unidades de destino final de resíduos sólidos são classificadas como aterro sanitário, 50,8% são vazadouros a céu aberto e 22,5% são aterros controlados (IBGE, 2008, p. 58).

Embora este quadro venha se alterando nos últimos 20 anos, sobretudo nas Regiões Sudeste e Sul do País, tal situação se configura como um cenário de destinação reconhecidamente inadequado, que exige soluções urgente e estrutural para o setor. Contudo, independente das soluções e/ou combinações de soluções a serem pactuadas, isso certamente irá requerer mudanças social, econômica e cultural da sociedade [...]

No mundo, os aterros sanitários correspondem à mais utilizada rota tecnológica de tratamento e destinação final dos RSU, de acordo com WEC (2017), conforme pode-

se observar no gráfico da Figura 20. Da mesma forma, Simões e Catapreta (2013, p. 420) expressam que, muitos autores concordam que os aterros sanitários se constituem relevantes dentro dos sistemas de gestão de RSU, sendo que, em muitos países, eles se constituem como o único meio econômico para tratamento e disposição final dos resíduos.



(*) WtE: "Waste to Energy", corresponde a tecnologias de geração de eletricidade a partir de RSU, geralmente incineração.

Figura 20. Principais técnicas de tratamento e destinação final de RSU no Mundo (em 2012).

Fonte: Adaptado de WEC (2017, p. 34).

Dados do IBGE (2008) mostram que, de 1989 a 2008, houve uma redução na alocação de RSU em lixões e vazadouros a céu aberto, enquanto a destinação dos resíduos para aterros aumentou, como pode ser visto na Tabela 3.

Tabela 3. Histórico da destinação final de RSU no Brasil.

Ano	Destinação final dos RSU (%) no Brasil		
	Lixões	Aterros Controlados	Aterros Sanitários
1989	88,2	9,6	1,1
2000	72,3	22,3	17,3
2008	50,8	22,5	27,7

Fonte: Adaptado de IBGE (2008, p. 60),

Com as exigências da Lei nº 12.305/2010, espera-se que a quantidade de resíduos destinados a aterros sanitários tenha aumentado, principalmente desde agosto de 2014, data limite para o encerramento dos lixões e aterros controlados no Brasil.

Este trabalho considera os cinco principais modelos tratamento e disposição final de RSU: Lixão, aterro controlado, aterro sanitário, usina de triagem e compostagem – UTC, incineração e metanização.

O Lixão ou vazadouro a céu aberto é considerado uma rota tecnológica inadequada, uma vez que não possui nenhuma medida de proteção ao meio ambiente e à saúde. Essa forma de disposição final de RSU consiste no lançamento dos resíduos a céu aberto, no solo, sem nenhum critério técnico. Assim,

[...] o não recobrimento dos resíduos de acordo com a frequência mínima exigida pela DN COPAM 118/2008, a atividade de catação de materiais recicláveis e a queima ou vestígio de queima de RSU são pontos decisivos na classificação da disposição final do município como lixão (FEAM, 2017, p. 7).

O aterro controlado era tido como uma solução paliativa até agosto de 2014, preferível ao lixão e aceitável para os municípios com menos de 20.000 habitantes até que se providenciasse a implantação de sistema adequado de tratamento e/ou disposição final de RSU, os aterros controlados apresentam uma mínima medida de proteção ao meio ambiente e à saúde, que corresponde à frequência de cobertura controlada dos resíduos. Trata-se, pois, de “[...] uma técnica de confinamento de RSU sem poluir o ambiente externo, mas sem a implementação de elementos de proteção ambiental, como impermeabilização da base, sistema de tratamento de lixiviados ou mesmo extração e queima controlada do biogás gerados” (FEAM, 2016b, p. 105). Era considerada como uma tecnologia de transição dos lixões para os aterros sanitários. Com a Lei nº 12.305/2010, que estabeleceu prazo até agosto de 2014 para que os municípios passassem a realizar a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, após agosto de 2014, devido ao vencimento do prazo estabelecido pela lei, a forma de disposição em aterro controlado é considerada inadequada, independente da faixa populacional em que o município se enquadre.

Um aterro controlado causa menor impacto ambiental que um lixão, mas apresenta qualidade inferior à de um aterro sanitário. Nesse tipo de disposição há o emprego de critérios de engenharia conforme NBR 8849:1985 e são adotadas apenas medidas mínimas necessárias para minimizar o impacto sobre a saúde pública e o meio ambiente, tais como as descritas no artigo 2º da Deliberação Normativa COPAM nº 52/2001, alterada

pela Deliberação Normativa COPAM nº 118/2008. Essas medidas mínimas se referem à localização, isolamento e identificação da área do aterro controlado, frequência de recobrimento dos resíduos, implantação de sistema de drenagem pluvial e afastamento de pessoas e animais (FEAM, 2017, p. 6).

Já o aterro sanitário é considerado uma modalidade de disposição final dos RSU adequada, tendo suas medidas de proteção ao meio ambiente e à saúde garantidas por meio de lei que define a obrigatoriedade de sistema impermeabilizante na base e nas laterais, bem como a coleta e tratamento do lixiviado, sistema de coleta e tratamento dos gases, sistema de drenagem superficial e sistema de monitoramento dentre outras. De acordo com FEAM (2016b, p. 106), este método “é relativamente simples, mas exige cuidados próprios, bem como procedimentos e metodologias característicos, incluindo sempre uma rigorosa avaliação de impactos ambientais”. Assim, de acordo com a NBR 8.419 (ABNT, 1992, p.1) é uma forma de

[...] disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais. Este método utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos na menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada trabalho, ou intervalos menores, se necessário.

Um fator importante a ser observado com relação aos aterros sanitários está no fato de que, após seu fechamento, ao término de sua vida útil e posterior paralização da geração de subprodutos (biogás, chorume e lixívia), estes podem ser utilizados para outras finalidades, como parte dos processos de reabilitação de áreas degradadas⁶. Todavia, é importante que seja feita uma análise do recalque do aterro, que geralmente tem seu volume reduzido devido, principalmente, à decomposição de resíduos orgânicos (SIMÕES e CATAPRETA, 2013, p. 420).

Outra forma de disposição final de RSU considerada adequada é a usina de triagem e compostagem (UTC), uma vez que desde sua concepção, possibilita a separação dos resíduos em três frações: os materiais recicláveis, as matérias orgânicas que serão compostadas e os resíduos finais (materiais não recicláveis ou não passíveis de compostagem), que correspondem às suas medidas de proteção ao meio ambiente e à saúde. Neste tipo de empreendimento os processos para os materiais recicláveis

⁶ Reabilitação é um recurso utilizado quando a solução mais viável é o desenvolvimento de atividades alternativas que se adequem ao uso humano e não aquela de reconstruir a vegetação original, mas desde que seja planejada de modo a não causar impactos negativos no ambiente (BITAR, 1997, *apud* FEAM, 2016a, p. 112)

correspondem à separação dos mesmos, seguida pela prensagem, enfardamento e armazenamento para posterior comercialização; quanto à matéria orgânica, esta é tratada por meio do processo de compostagem, de acordo com a NBR 13591 (ABNT, 1996); por fim, os rejeitos são dispostos em valas escavadas em áreas contíguas à UTC, em aterros sanitários, ou ainda em aterros sanitários de pequeno porte.

O processo de compostagem é um método de tratamento que envolve a conversão biológica da matéria orgânica e tem como produto final o composto orgânico. Esse material é rico em húmus e nutrientes minerais e pode ser utilizado em paisagismo e recuperação de áreas degradadas, dentre outras finalidades, desde que devidamente atestado por profissional da área de agronomia (FEAM, 2017, p. 6).

A incineração consiste na queima dos detritos em um incinerador ou usina de incineração, a temperaturas superiores a 900° C, onde, como vantagens, podem-se citar a redução significativa do volume dos RSU, a diminuição do potencial tóxico dos resíduos e a possibilidade de utilização da energia liberada com a queima. Já as desvantagens residem no potencial de transferência da poluição do resíduo incinerado à atmosfera, com a emissão de gases e material particulado, devido principalmente à inadequação dos sistemas de controle e monitoramento dos equipamentos. O uso desta técnica no Brasil é bastante incipiente, uma vez que apresenta alto custo, devido às exigências ambientais (MAGALHÃES, 2008, p. 22). O processo de incineração, com o intuito de recuperação energética, é eficaz somente para resíduos combustíveis, não apresentando vantagens para outros materiais como vidros e metais, exigindo-se um pré-processamento com a triagem dos RSU.

Há ainda o processo de metanização dos resíduos orgânicos, que envolve um processo biológico complexo que deve digerir todo material orgânico, geralmente, em um único estágio de metanização (BANKS; 2011). Trata-se, portanto, de um processo digestão anaeróbia controlada de resíduos orgânicos, distinguindo-se, contudo, dos biodigestores pelo controle dos parâmetros operacionais e ambientais no reator, a saber

[...] a caracterização físico-química e a biodegradabilidade do substrato utilizado, o controle da temperatura interna do sistema, os mecanismos de mistura no reator, o número de estágios de metanização, o controle do teor de umidade do reator, dentre outros fatores operacionais (FERREIRA, 2015, p. 30).

A metanização também tem se apresentado como uma importante rota alternativa de

tratamento de resíduos, principalmente pelo seu potencial em converter fontes de biomassa com elevada biodegradabilidade em biogás, passível de recuperação energética (CHEN e CHEN, 2013).

2.2.4 Os resíduos sólidos urbanos como fonte de energia renovável

Atualmente as fontes fósseis constituem-se como as principais fontes de geração de energia no mundo. Todavia, estas fontes, além de muito agressivas ao meio ambiente, também tendem a uma redução rápida de sua disponibilidade no meio natural e é claro que a humanidade sempre quererá continuar construindo enormes estoques de energia, de modo a manter seus padrões de conforto e desenvolvimento. Com a diminuição da quantidade de combustíveis fósseis, é fundamental que hoje se concentre no uso econômico sustentado dos recursos limitados existentes, bem como na identificação de novas tecnologias e recursos renováveis, por exemplo, biomassa, para o futuro fornecimento de energia (DEUBLEIN e STEINHAUSER, 2008, p. 1).

Neste contexto, a biomassa geralmente é considerada uma importante fonte potencial de combustível e energia renovável para o futuro. Sob o enfoque das questões de proteção ambiental e mudanças climáticas, a biomassa apresenta-se como uma fonte energética muito favorável devido ao círculo fechado de dióxido de carbono (JANKES *et al.*, 2012, p. S115-116).

Segundo Staiss e Pereira (2001, p. 22), em geral, pode-se designar biomassa como a “[...] massa total de matéria orgânica que se acumula em um espaço vital”. Desta forma, todos os vegetais e todos os animais, incluindo os seus resíduos, bem como, em um sentido mais amplo, as matérias orgânicas transformadas como resíduos de indústria transformadora da madeira e indústria alimentar, podem ser consideradas biomassa. Por meio de diversas rotas tecnológicas de conversão energética estes elementos primários de biomassa podem ser transformados em biocombustíveis sólidos, líquidos ou gasosos e, finalmente, em energia térmica, mecânica e/ou elétrica. Corroborando com este pensamento, Carioca e Arora (1984, p. 72) afirmam que o termo biomassa refere-se a toda matéria orgânica proveniente dos reinos animal e vegetal.

Num sentido energético, conforme expressam Souza *et al.* (2004, p.3) há que se

estabelecer uma distinção entre a biomassa que é cultivada com a finalidade de produção de energia (plantas energéticas) e a biomassa que abrange todos os resíduos orgânicos provenientes de outras atividades. Desta forma, Carioca e Arora (1984, p. 72) expressam que, considerando-se a utilização da biomassa para fins energéticos, a classificação desses recursos pode ser feita da seguinte forma:

- Recursos florestais: representados pelas florestas naturais e plantadas (lenha e florestas energéticas, por exemplo);
- Culturas energéticas: envolvem espécies sacarídeas (cana-de-açúcar, sorgo sacarino, beterraba e etc.), amiláceas (mandioca, sorgo granífero, babaçu, milho e etc.) e oleaginosas (soja, dendê, girassol, mamona e etc.);
- Fitomassa aquática: representada pelos aguapés e algas;
- Resíduos agropastoris: são aqueles resultantes da colheita e do processamento de alguns vegetais e os dejetos animais;
- Resíduos orgânicos industriais: originados do processamento industrial de matéria-prima de origem animal ou vegetal (produção de álcool, matadores e frigoríficos, laticínios, cervejarias, cortumes, beneficiamento de madeira e etc.);
- Resíduos urbanos sólidos e líquidos: são aqueles gerados pelas populações urbanas e se caracterizam pelas grandes quantidades produzidas e a variedade de componentes (o lixo residencial, comercial e público, os esgotos e etc.).

No caso do Brasil, o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia - Proinfa, criado com base na Lei nº 10.438/02 (MME, 2005), tem como objetivo o aumento da participação da energia elétrica gerada por Produtores Independentes Autônomos a partir de fontes eólica, pequenas centrais hidrelétricas (PCH's) e biomassa no sistema interligado nacional. Desta forma, o Proinfa apresentou uma janela de oportunidade para a utilização de biogás como fonte de energia em sistemas de geração de energia elétrica, promovendo, com isso, uma participação dessa fonte renovável alternativa de energia na matriz energética nacional, contribuindo para a diversificação da matriz.

O potencial energético das biomassas no Brasil, apresentado na Nota Técnica - NT "Recursos Energéticos 2050", está entre 450 e 460 milhões de tep em 2050, saindo de aproximadamente 210 milhões de tep em 2013. Do total, a biomassa residual, que

responde por 56% em 2013, passa para 61% no final do período, considerando como biomassa residual as biomassas residuais agrícolas, incluindo as palhas e pontas da cultura da cana-de-açúcar, a biomassa residual da pecuária, a biomassa residual urbana e a vinhaça (EPE, 2014a, p. 214).

Os chamados resíduos de biomassa são considerados fonte de energia renovável disponível, embora possam causar grave degradação ambiental. Existem, atualmente, várias tecnologias, chamadas “*waste-to-energy* - WtE”, para converter o RSU em combustível, calor e eletricidade, tais como combustão, gaseificação e pirólise (AL-SALEM *et al.*, 2009, p. 2627; ARENA, 2012, p. 637; SEKITO *et al.*, 2014, p. 1-2; VAN DER WALT, JANSEN e CROUSE, 2017, p. 1-2.).

Alvarez e Gunnar (2008, p. 726), corroborando com Mata-Alvarez; Macé e Llabrés (2000, p. 3), expressam que a biodigestão anaeróbia pode ser usada como tratamento de resíduos sólidos orgânicos, reduzindo o poder de poluição e gerando subprodutos como o biogás. De acordo com Qian, Koerner e Gray (2011, p. 3315), diferentes tipos de resíduo têm potencial de produção de biogás, tais como: dejetos de origem animal (bovinos, suínos, galináceos e etc.), lodo de esgoto, resíduos de frutas e vegetais, entre outros. Portanto, a recuperação energética do biogás é vista como uma das principais formas de tratamento de resíduos sólidos orgânicos (MONTEIRO, 1996, p.1).

Segundo Souza *et al.* (2004, p. 132) uma das vantagens no aproveitamento do biogás recuperado da digestão de resíduos sólidos está no fato do gás metano (CH₄), um dos principais constituintes do biogás, ser um gás com alto poder de contribuição para o efeito estufa e sua queima para a geração de energia contribuir expressivamente para a redução de seu efeito como tal.

2.3 O biogás de aterros sanitários

Desde o início da industrialização, mudanças significativas globais no balanço da substância da atmosfera foram observadas como consequência das atividades humanas (antropogênicas). O Quarto Relatório de Avaliação do IPCC mostra que a influência humana sobre o clima é um fato científico (LE TREUT *et al.*, 2007).

A Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP, em sua Resolução Normativa nº 8 de 2015, no Artigo 3º, define o biogás como “gás bruto obtido da decomposição biológica de produtos ou resíduos orgânicos” (ANP, 2015). Esta normativa define ainda o biometano, derivado do biogás, como sendo um “biocombustível gasoso constituído essencialmente de metano, derivado da purificação do biogás” (ANP, 2015). O Regulamento Técnico ANP nº 1 de 2015 diz também que o biometano

[...] é intercambiável com o gás natural entregue à distribuição nas regiões nordeste, centro oeste, sudeste e sul. Requer os mesmos cuidados, na compressão, distribuição e revenda, dispensados ao gás natural (ANP, 2015).

O Programa RenovaBio foi lançado pelo governo em dezembro de 2016, sendo uma política de Estado que objetiva traçar uma estratégia conjunta para reconhecer o papel estratégico de todos os tipos de biocombustíveis na matriz energética brasileira, dentre eles o biogás, tanto para a segurança energética quanto para mitigação de redução de emissões de gases causadores do efeito estufa. Dentre as diretrizes estratégicas norteadoras da Política Nacional de Biocombustíveis, estabelecidas pelo RenovaBio, encontra-se “[...] assegurar previsibilidade para participação competitiva dos diversos biocombustíveis na matriz energética brasileira, com ênfase na segurança do abastecimento [...]” (MME, 2017, p.7), bem como criar mecanismos para acelerar o aproveitamento racional do biogás e do biometano.

De acordo com esta política do RenovaBio, tanto o biogás quanto o biometano

[...] são considerados combustíveis que atendem os requisitos de qualidade e disponibilidade firme prescritos nas regulações ANEEL RN 687/15, na ANP RN 08/2015 e o descrito na EPE NT 13/2015. Regulações essas que deverão ser aprimoradas ao longo do tempo, mas que já constituem pontos de partidas bem definidos para salvaguardar os interesses dos potenciais investidores e consumidores (SEBIGAS, 2016, p. 3).

O gás metano (CH₄) é um dos principais componentes do biogás, sendo considerado o responsável pela capacidade calorífica do biogás (BILOTTA e ROSS, 2016, p. 276). Sua produção é proveniente da degradação biológica anaeróbia da matéria orgânica, processo que também gera amônia, dióxido de carbono, hidrogênio, monóxido de carbono, nitrogênio, compostos orgânicos voláteis, sulfetos e fosfatos (COSTA, 2006, p. 36; PECORA *et al.*, 2008, p. 2).

Com relação às emissões antropogênicas do gás metano, destacam-se como fontes

mais significativas a agricultura de arroz, a criação de animais (especialmente ruminantes), exploração e queima de petróleo e gás natural (inclui vazamentos do gás), resíduos (principalmente em aterros), mineração de carvão e queima de biomassa (BARH *et al.*, 2006, p. 1).

Para se ter uma ideia, Barh *et al.* (2006, p. 1) reporta que como consequência da liberação de CH₄ o teor de metano atmosférico aumentou mais do que o seu dobro desde o início da industrialização, reforçando a ideia de que o aumento das emissões de metano está diretamente relacionado às atividades humanas. Assim, de acordo com o autor, o atual aumento é de em média cerca de 1% ao ano (de 0,62 ppm para 1,75 ppm).

Conforme nos informa *Umweltbundesamt* - UBA (Agência Federal do Meio Ambiente da Alemanha), o metano é um gás inodoro e incolor, altamente inflamável. Embora sua permanência na atmosfera seja muito inferior à do dióxido de carbono, o CH₄ é responsável por uma parte substancial do efeito estufa produzido pelo homem, visto que seu potencial de aquecimento global (*Global Warming Potential – GWP*)⁷ é de 28 vezes maior do que o do CO₂, para um período de 100 anos, conforme dados atualizados pelo IPCC em seu *Fifth Assessment Report - AR5* (IPCC, 2015, p. 87). O metano sempre ocorre onde a matéria orgânica é decomposta na ausência de oxigênio (decomposição anaeróbia) (UMWELTBUNDESAMT, 2017).

A respeito do GWP cabe destacar alguns parâmetros estabelecidos par os principais gases de efeito estufa (USEPA, 2018):

- O dióxido de carbono (CO₂), por definição, tem um GWP de 1, independentemente do período de tempo usado, uma vez que se trata do gás que é usado como referência, atualmente. Ele permanece no sistema climático por muito tempo, ou seja, suas emissões proporcionam incrementos em suas concentrações atmosféricas que irão durar milhares de anos.

⁷ O Potencial de Aquecimento Global (*Global Warming Potential – GWP*) é um fator desenvolvido para permitir a realização de comparações dos impactos do aquecimento global de diferentes gases. Trata-se, pois, de uma medida da quantidade de energia que as emissões de 1 tonelada de gás absorverão durante um determinado período de tempo (normalmente 100 anos), em relação às emissões de 1 tonelada de dióxido de carbono (CO₂) para o mesmo período. Assim, quanto maior o GWP, maior as contribuições de um determinado gás para o aquecimento da Terra em comparação com o CO₂. Cabe destacar que os GWPs são apresentados em uma unidade de medida comum, permitindo diferentes análises de cenários de emissões de GEE, bem como as oportunidades de redução das mesmas (USEPA, 2018).

- O metano (CH_4) tem um GWP estimado de 28 a 36 ao longo de 100 anos, sendo que, o metano emitido hoje, dura, em média, cerca de uma década no sistema climático, o que é muito menos tempo do que o CO_2 . Todavia, o CH_4 também absorve muito mais energia que o dióxido de carbono. O efeito líquido da vida útil mais curta e maior absorção de energia é refletido no GWP.
- O óxido nitroso (N_2O) tem um GWP de 265 a 298 vezes o de CO_2 para uma escala de tempo de 100 anos, considerando que o N_2O , após ser emitido, permanece na atmosfera por mais de 100 anos, em média.
- Os clorofluorocarbonos (CFCs), os hidrofluorocarbonos (HFCs), os hidroclorofluorocarbonos (HCFCs), os perfluorocarbonos (PFCs) e o hexafluoreto de enxofre (SF_6) são conhecidos como gases de GWP elevados, uma vez que, para uma determinada quantidade de massa, eles retêm consideravelmente muito mais calor do que o CO_2 . Assim, os GWPs para estes gases podem ser na base de milhares ou dezenas de milhares.

A disposição final de resíduos sólidos urbanos produz emissões de gases causadores do efeito estufa. Com o aumento da população e do grau de urbanização, torna-se clara a necessidade de um correto gerenciamento da disposição final de resíduos sólidos urbanos. Corroborando com esta constatação, em nível mundial, as políticas recentes para combater as mudanças climáticas e ampliar a conservação de recursos naturais, como o Protocolo de Quioto, as deliberações de Copenhague em 2009 e a Diretiva de Aterros Sanitários da União Europeia, estimularam o desenvolvimento de tecnologias de energia renovável referentes à recuperação energética de RSU (ARENA, 2012, p. 637), fazendo com que o aproveitamento do biogás se configure, ainda hoje na segunda década do século XXI, como uma proposta factível e atrativa, ocupando um lugar de destaque no cenário das fontes alternativas de energia nos países em desenvolvimento e também nos países desenvolvidos (CARIOCA e ARORA, 1984, p. 333).

Sabe-se que, nas últimas décadas, muitas empresas criaram plantas de biogás em todo o mundo, com os mais diversos substratos. Assim, adquiriu-se muita experiência, levando a uma otimização contínua do processo de fermentação anaeróbia e ao desenvolvimento de novas e mais eficientes aplicações. Em geral, o conhecimento básico da produção de biogás, dos micro-organismos envolvidos e dos processos bioquímicos foi amplamente ampliado. Desta forma, Carioca e Arora (1984, p. 333)

salientam que, em geral, ainda hoje observa-se “um grande esforço no sentido de se conhecer melhor o processo e avançar na tecnologia de produção e uso do biogás, de forma a aumentar ainda mais a sua viabilidade e aplicação”. Assim, o aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos pode fornecer quantidades de biogás significativas que pode ser usado para a geração de energia elétrica e de calor. Dentro deste contexto global, o RenovaBio vai ao encontro do compromisso assumido pelo Brasil na 21ª Conferência das Partes (COP21) das Nações Unidas sobre Mudança Climática, em Paris, onde

o Brasil assumiu pelo acordo o compromisso de implantar medidas e ações que apoiem o cumprimento da meta de redução de 37% das emissões de gases de efeito estufa em 2025 tendo como referência o ano de 2005. Para tanto, entre outras medidas possíveis, o país se compromete a aumentar a participação de bioenergia sustentável na sua matriz energética para aproximadamente 18% até 2030. Esse compromisso assumido na COP21 oferece à sociedade brasileira uma oportunidade de utilizar os biocombustíveis como um vetor de desenvolvimento, que contribui para redução das emissões, entre outras externalidades positivas (MME, 2017, p. 39).

De acordo com dados da FGV (2017, p. 99), o Brasil possui potencial de produzir cerca de 7 milhões de m³ diários de biogás e biometano provenientes dos sistemas de saneamento básico.

Para estimar-se a composição e o quantitativo do biogás a ser produzido em aterros sanitários, podem ser utilizados modelos matemáticos, cujos parâmetros de entrada correspondem a basicamente a quantidade de resíduos, modelos tais como o do *Intergovernmental Panel on Climate Change -IPCC - Waste Model* (IPCC, 1996a; 1996b; 2006).

2.3.1 Descoberta do biogás

Em 1630 Jan Baptiste van Helmont registrou a emanção de um gás inflamável a partir de matéria orgânica em decomposição, tendo ele listado entre 15 tipos diferentes de gases, um gás inflamável que evolui durante a putrefação e também faz parte dos gases intestinais (KHOIYANGBAM, GUPTA e KUMAR, 2011, p. 8). Em 1667 Thomas Shirley confirmou que, na cidade de Wigan, seguindo os relatos populares, em determinada área pantanosa ao aproximarem uma vela acesa da água, surgiu

uma grande chama que queimava de forma vigorosa (PHILOSOPHICAL TRANSACTIONS, 1666). Todavia, o histórico documental de pesquisas envolvendo o biogás apresenta o início dos estudos no ano de 1776, quando Alessandro Volta, um físico italiano, descobriu o que ele chamou de “ar combustível”, formado em sedimentos no fundo de lagos e rios. Posteriormente, somente cerca de oitenta anos mais tarde foi que Reiset detectou a formação de metano em estrumeiras, o que o motivou a propor o estudo desse tipo de manejo de resíduos para explicar o processo de decomposição anaeróbia. Já no século XIX, Ulysse Gayon fez experimentos na área da fermentação anaeróbia, onde com uma mistura de estrume e água, a 35°C, obteve cerca de 100 litros de gás por metro cúbico de substrato (EEA, 2005, *apud* HIRANO, 2015, p. 5).

Em 1868, Bechamp concluiu que a formação do gás metano se dá pela ação de microrganismos, sendo que, em 1875, Popoff pesquisou a formação de metano a partir de vários substratos. No ano de 1890, Van Senus concluiu que a decomposição anaeróbia era realizada por diversos microrganismos, dando embasamento para Omelianski que chegou a isolar microrganismos que produziam hidrogênio, ácido acético e ácido butírico, a partir da celulose. Ele também deduziu que o gás metano seria produzido a partir da redução do gás carbônico por hidrogênio (EEA, 2005, *apud* HIRANO, 2015, p. 5).

Em 1910, Sohngen, em seus estudos, verificou que a fermentação de materiais orgânicos gera compostos reduzidos como o hidrogênio, o ácido acético e o gás carbônico, demonstrou, ainda, a ocorrência de redução de CO₂ para a formação de CH₄, assumindo que o ácido acético é descarbonizado para que haja a formação de gás metano, hipótese que permaneceu em controvérsia por muitos anos, embora hoje seja considerada correta. No ano de 1914, Thum e Reichle concluíram que o processo de formação do metano se dava em duas fases que, dois anos mais tarde, foram denominadas de digestão ácida e digestão metânica por Imhoff (EEA, 2005, *apud* HIRANO, 2015, p. 5).

No ano de 1940, Barker isolou a bactéria *Methano Bacterium Omelianski* que oxida o etanol, o acetato e o metano. Oito anos depois, Buswell e Sollo, utilizando carbono-14 comprovaram que o metano proveniente do acetato não ocorre por meio de redução de CO₂. Em 1956, Jerris verificou que cerca de 70% do metano produzido tinha sua origem do acetato. Anos mais tarde, em 1967, Briant publicou os resultados

de suas pesquisas apresentando a existência de dois grupos de bactérias que convertem a metano: um pela via do acetato e outro pela via do hidrogênio (EEA, 2014, *apud* HIRANO, 2015, p. 6).

2.3.2 Caracterização do biogás

O biogás se assemelha ao gás natural com um elevado poder calorífico, apresentando, assim, uma possibilidade de substituí-lo em diversas de suas aplicações. A principal vantagem do biogás com relação do gás natural talvez seja o fato de ser renovável e produzido em todos os locais onde haja biomassa. Todavia, dentre as desvantagens está seu menor poder calorífico e a presença de sulfeto de hidrogênio e umidade em sua composição (SALOMON, 2007, p. 53).

O biogás de aterro é composto por vários gases, alguns presentes em grandes quantidades como o metano e o dióxido de carbono e outros em quantidades traços. A composição típica do biogás (%v/v)⁸ é de 30-60% de CH₄ (metano), 15-30% de CO₂ (dióxido de carbono), 1-10% de O₂ (oxigênio), 5-20% de N₂ (nitrogênio) e quantidades pequenas e variáveis de outros compostos como H₂S (sulfureto de hidrogênio), NH₃ (amônia) e muitos compostos orgânicos voláteis – COV (NARROS *et al.*, 2009, p. 1). A distribuição exata do percentual de gases variará conforme a idade do aterro.

O biogás refere-se tipicamente a um gás produzido pela digestão anaeróbia ou fermentação de matéria orgânica, incluindo estrume, lodo de esgoto, resíduos sólidos municipais, resíduos biodegradáveis ou qualquer outro material de alimentação biodegradável, em condições anaeróbias. Embora as quantidades de traços sejam baixas em comparação com o metano, elas podem ter impactos ambientais. Muitos COV prejudiciais ao meio ambiente ou aos seres humanos podem ocorrer no biogás de diversas fontes, pois apresentam alta pressão de vapor e baixa solubilidade.

⁸ %v/v trata-se da concentração química de uma solução ou mistura, ou seja, o percentual de determinada substância em um total de uma solução.

2.3.3 Formação do biogás de aterro sanitário

Segundo Kunz e Oliveira (2006, p.29),

o entendimento do processo de obtenção do biogás é de grande importância para o sucesso da tecnologia de aproveitamento do biogás, haja vista que são complementares e, caso não se tenham os devidos cuidados na geração, a utilização estará seriamente prejudicada.

Este processo é denominado biodigestão, o qual acontece de forma natural com toda matéria orgânica. No caso dos aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos pode-se considerar que estes são como um tipo de reator biológico, que tem como principais entradas os resíduos e a água e as principais saídas o biogás e o chorume. De acordo com informações apresentadas pelo MMA (2017) a decomposição da matéria orgânica ocorre por meio de dois processos distintos:

- a decomposição aeróbia: ocorre normalmente no período de deposição do resíduo;
- a decomposição anaeróbia: ocorre após o período da decomposição aeróbia, uma vez que há a redução do O₂ presente nos resíduos.

Os aterros sanitários de resíduos sólidos consolidam-se como ecossistemas únicos, onde está presente uma diversidade de espécies de microrganismos. No que tange aos decompositores da matéria orgânica presente na massa de resíduo destacam-se as bactérias, e, em menor escala, fungos e protozoários.

Os principais fatores influenciadores no processo de produção de biogás em aterros sanitários são a composição dos resíduos dispostos, a umidade, o tamanho das partículas, a temperatura, o pH, a idade dos resíduos, dentre outros. A decomposição dos resíduos é um dos principais fatores que influenciam a geração de biogás. Segundo Tchobanoglous, Theisen e Vigil (1993, p. 385), corroborando com ESMAP (2004, p. 16), a geração do biogás ocorre em cinco fases, como ilustrado na Figura 21 e descrito na Tabela 4.

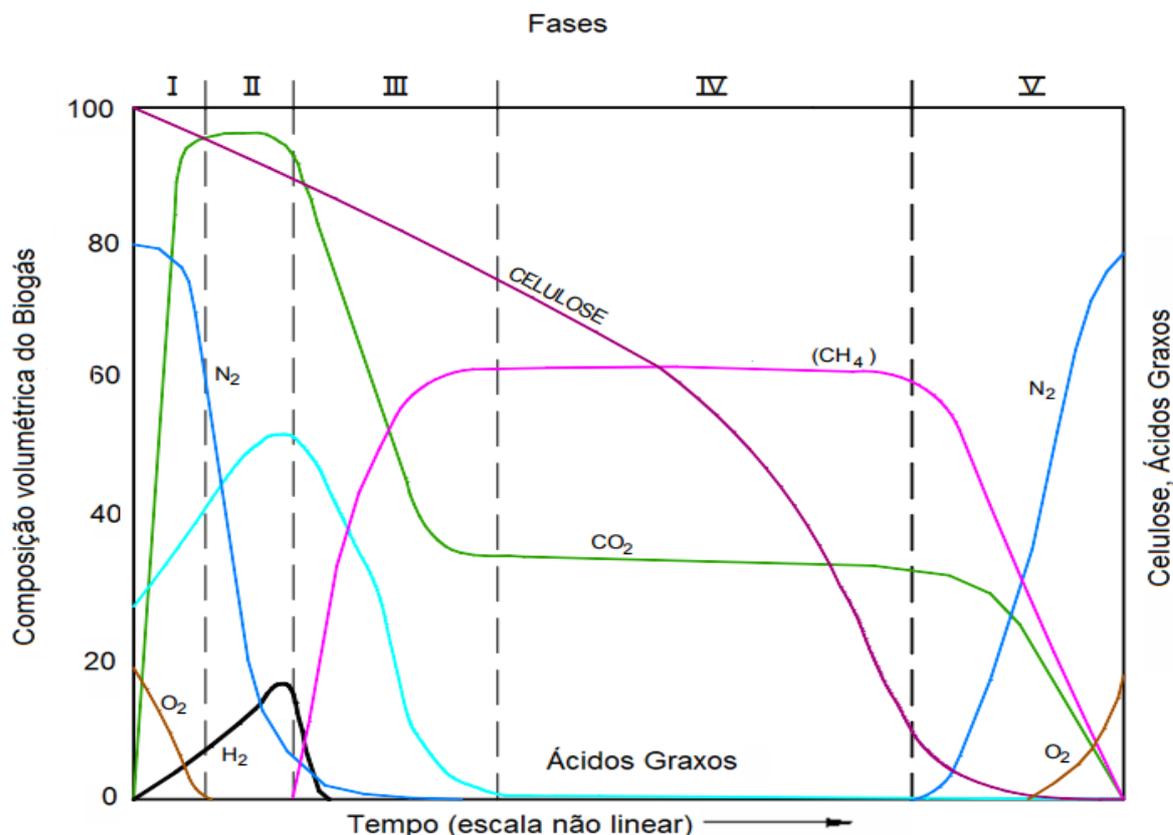


Figura 21. Análise qualitativa típica da geração dos principais gases ao longo das fases de degradação em um aterro sanitário.

Fonte: Adaptado de ESMAP (2004, p. 17).

Tabela 4. Fases típicas de produção do biogás em um aterro sanitário.

Fase	Condição	Período Típico
I	Aeróbia	Horas a 1 semana
II	Anóxica	3 meses a 3 anos
III	Anaeróbia, metanogênica, instável	8 a 40 anos
IV	Anaeróbia, metanogênica, estável	1 a 40 anos
V	Anaeróbia, metanogênica, declinante	10 a 80 anos

Fonte: Adaptado de ESMAP (2004, p. 17).

Segundo Castilhos Júnior *et al.* (2009, p. 12), o processo de degradação dos resíduos sólidos trata-se de um fenômeno constituído pela intercessão e inter-relação de mecanismos biológicos e físico-químicos. O autor expressa que logo após a cobertura dos RSU depositados em aterros sanitários ainda há oxigênio presente. Assim, nesta fase, os microrganismos aeróbios iniciam a primeira fase da decomposição, que é

relativamente curta, tendo sua duração por volta de um mês, uma vez que o pouco oxigênio existente é consumido sem reposição (CASTILHOS JÚNIOR *et al.*, 2009, p. 15-16).

Castilhos Júnior *et al.* (2009, p. 16) explica as fases do processo de decomposição anaeróbia dos RSU em aterros sanitários elencando-as em quatro momentos distintos. A primeira fase anaeróbia inicia-se com a redução dos níveis de oxigênio presentes, quando começam a predominar os chamados microrganismos anaeróbios facultativos, que atuam na conversão da matéria orgânica degradada (pelo processo aeróbio) em compostos dissolvidos por meio de processos de hidrólise e liquefação. Segue-se, pois à chamada segunda fase anaeróbia, onde a matéria orgânica hidrolisada é transformada, por meio de ação bioquímica das bactérias presentes, em compostos orgânicos simples e de alta solubilidade (ácidos graxos voláteis, dentre outros). A terceira fase transcorre de modo que os ácidos já formados se misturam com o líquido proveniente da matéria orgânica, reduzindo seu pH e formando de forma definitiva os compostos orgânicos simples. Por fim, na quarta fase anaeróbia, bactérias metanogênicas consomem os compostos orgânicos simples, gerando metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂).

Observa-se que o gás metano pode ser produzido por meio de duas rotas principais: a primeira envolve o uso de acetato e caracteriza-se como a mais importante, pois produz cerca de 70% do metano, derivado do grupo metil do acetato; a segunda, apresenta a formação de metano a partir da redução do dióxido de carbono pelo hidrogênio proveniente da desidrogenação acetogênica (CARIOCA e ARORA, 1984, p. 337). O esquema torna ainda evidente a complexidade do processo, que envolve uma série de estágios que, por sua vez, formam diversos produtos intermediários. Segundo Carioca e Arora (1984, p. 337), um grande número de espécies de bactérias fermentativas participa do processo, além da eventual ocorrência de protozoários e fungos.

Na Figura 22 é apresentado um esquema detalhado do processo de formação do biogás, descrevendo, de forma simplificada, a ação por quatro grupos de bactérias.

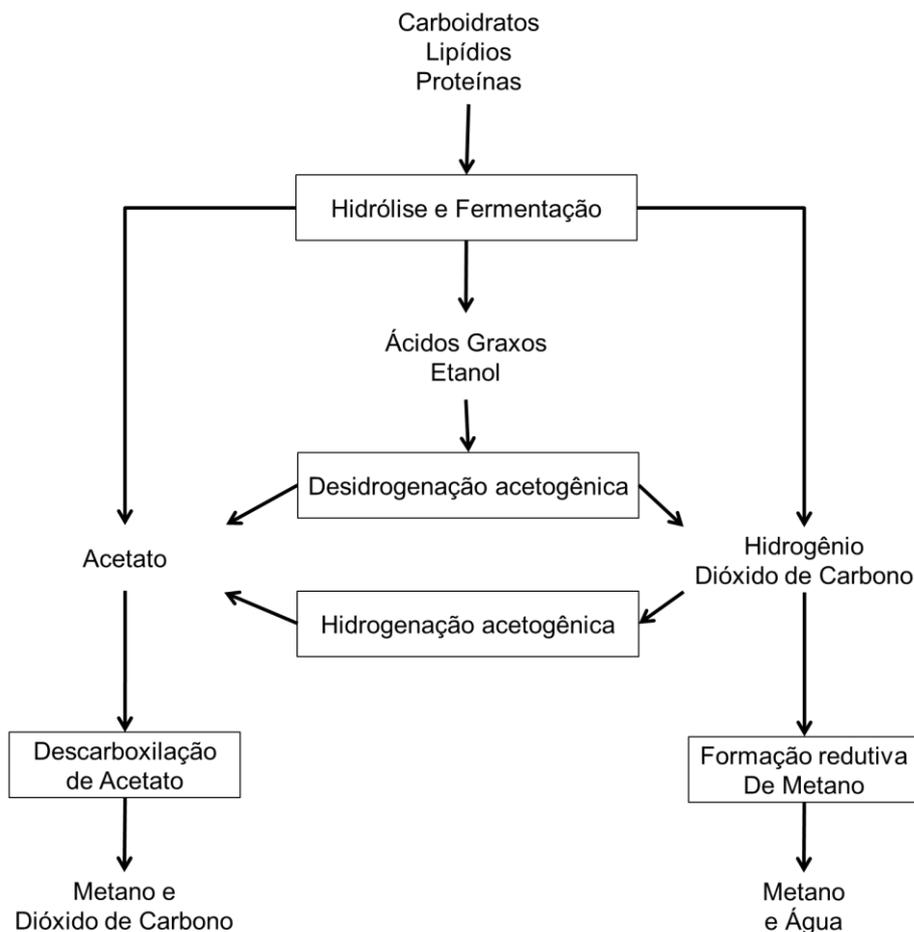


Figura 22. Processo de formação do biogás em aterro sanitário.

Fonte: Carioca e Arora (1984, p. 338)

De acordo com informações apresentadas pelo MMA (2017), a geração de biogás inicia-se, *de praxe*, logo

[...] após a disposição dos resíduos sólidos, encontrando-se, registros de metano ainda nos primeiros três meses após a disposição, podendo continuar por um período de 20, 30 ou até mais anos depois do encerramento do aterro. O gás proveniente dos aterros contribui consideravelmente para o aumento das emissões globais de metano.

Segundo Borba (2006, p. 11), a duração de cada uma das fases de geração do biogás pode variar conforme a distribuição dos componentes orgânicos no aterro sanitário, a disponibilidade de nutrientes e matéria orgânica, a umidade dos resíduos, a passagem de umidade pelo aterro e o grau de compactação ou densidade inicial. O autor diz que, considerando-se condições ditas normais ou típicas, a velocidade de decomposição (mensurada por meio da taxa de produção de biogás) chega ao seu pico máximo nos dois primeiros anos e logo decresce de forma mais lenta por cerca de vinte e cinco anos ou mais. Contudo, as fases de um aterro não podem ser

claramente definidas, uma vez que novos RSU são dispostos diariamente no mesmo. Assim, enquanto alguns locais com resíduos novos estão passando pela fase aeróbia, outros locais com resíduos mais antigos estão passando por fases de geração de metano (BORBA, 2006, p. 11).

2.3.4 Potencial energético do biogás

A biomassa residual possui uma natureza distribuída territorialmente, o que leva conseqüentemente à análise da geração distribuída a partir de seu aproveitamento energético. Tal aproveitamento pode ocorrer por meio de diversas tecnologias de conversão. Entretanto, de acordo com a EPE (2014a, p. 214), algumas tecnologias apresentam certa preferência quanto a outras, dependendo da especificação e tipo de biomassa, do nível de desenvolvimento tecnológico e da relação das escalas e custos. Isso posto, aliado a outros fatores como a flexibilidade do uso e de armazenamento do biogás, as iniciativas de promoção de produção e uso do biogás, e o cenário traçado para a geração distribuída - GD, a inserção do biogás no mercado de energia apresenta-se fortemente promissora (EPE, 2014a, p. 214).

Diversas são as possibilidades de uso do biogás para a geração de energia, seja elétrica, térmica, como combustível veicular ou mesmo iluminação a gás. Todavia, é de suma importância conhecer os parâmetros característicos do biogás gerado, como a vazão, a composição química e o poder calorífico, uma vez que são justamente estes parâmetros que são determinantes do real potencial energético do biogás.

Silva (2009, p. 29) diz que o principal componente do biogás é o metano (CH₄), podendo compor de 50% a 80% do total desta mistura, conforme já mencionado anteriormente.

O poder calorífico do biogás varia conforme a quantidade de metano presente na mistura, ou seja, quanto maior a concentração volumétrica de metano no biogás maior será o seu poder calorífico, influenciando também no peso específico (ROSSETTO, 2014, p. 10). Em função desta concentração de metano na composição do biogás, o poder calorífico deste pode variar de 5.000 a 7.000 kcal/m³, podendo, ainda, alcançar o patamar de 12.000 kcal/m³ caso sejam eliminados da mistura o dióxido de carbono e outros contaminantes. Em [kWh/m³], o poder calorífico inferior do biogás pode variar

de 4,95 a 7,92 [kWh/m³] (COLDEBELLA *et al.*, 2006, p. 4), dependendo da concentração de metano em sua composição. O poder calorífico bruto do biogás pode ser considerado aproximadamente de 6 kWh/m³, sendo que para o gás purificado este valor sobe para 9,5 kWh/m³ (BARRERA, 2003). A Tabela 5 apresenta a variação de peso específico e poder calorífico inferior do biogás de acordo com as quantidades de metano e dióxido de carbono presentes no mesmo.

Tabela 5. Peso específico e Poder Calorífico Inferior do biogás de acordo com a concentração volumétrica de metano e dióxido de carbono.

Composição química	Peso Específico (kg/m ³)	PCI (kcal/kg)	PCI (kcal/m ³)	PCI (kWh/m ³)
10% CH ₄ e 90% CO ₂	1,8393	465,43	253,05	0,29
40% CH ₄ e 60% CO ₂	1,4600	2.333,85	1.598,53	1,86
60% CH ₄ e 40% CO ₂	1,2143	4.229,98	3.483,47	4,05
65% CH ₄ e 35% CO ₂	1,1518	4.831,14	4.194,43	4,88
75% CH ₄ e 25% CO ₂	1,0268	6.253,01	6.089,80	7,08
95% CH ₄ e 05% CO ₂	0,7768	10.469,60	13.477,86	15,67
99% CH ₄ e 01% CO ₂	0,7268	11.661,02	16.044,33	18,64

Fonte: Adaptado de Rossetto (2014)

De acordo com Narros *et al.* (2009, p. 1-2), as regulamentações ambientais de cada país geralmente exigem que os chamados "gases de efeito estufa", devem ser coletados para evitar a emissão descontrolada para a atmosfera, de modo especial ao se tratar do metano e do dióxido de carbono, que são os principais componentes do biogás de aterro sanitário. Além disso, o teor de metano do biogás o torna atrativo para produção de eletricidade por meio de diferentes rotas tecnológicas de conversão energética.

2.3.5 Tecnologias de conversão energética do biogás em eletricidade

Bley Jr. (2015) expressa que a utilização de energia do biogás é uma das alternativas disponíveis no Brasil para permitir um aumento no fornecimento de energia elétrica, reforçando as garantias de equilíbrio da matriz energética nacional. No entanto, a Figura 23 mostra a representatividade das plantas de termoeletricas a RSU em

operação no Brasil, onde apenas seis Estados federativos possuem esse tipo de utilização de energia em suas matrizes, o que demonstra um subaproveitamento deste recurso energético no país.

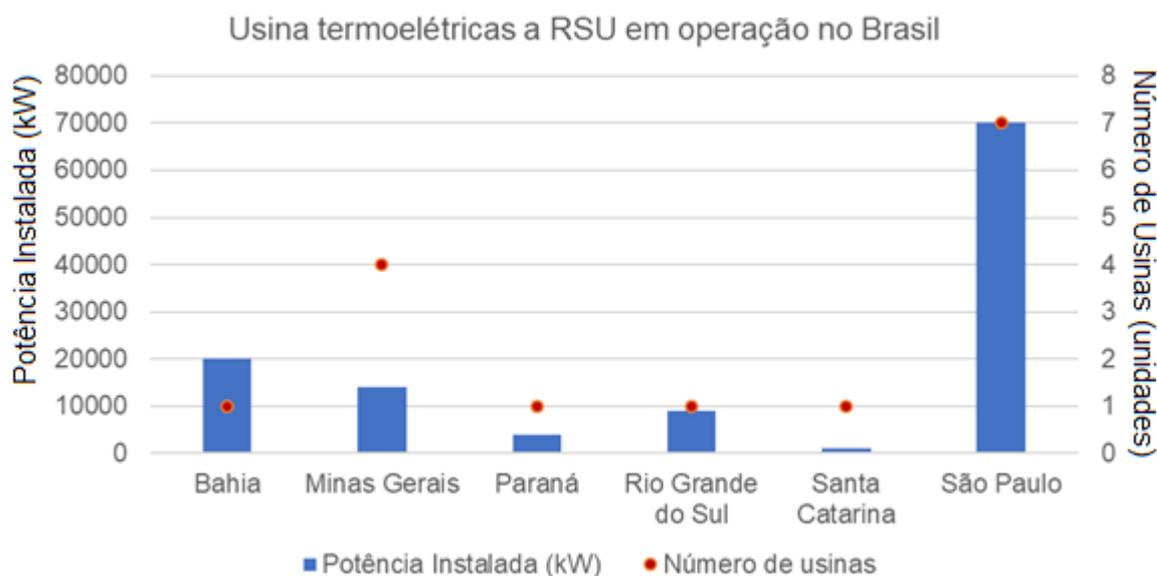


Figura 23. Total de usinas termoeletricas de RSU no Brasil em janeiro de 2017.

Fonte: Adaptado de ANEEL (2017)

De acordo com Oliveira (2009, p. 1), a geração de energia elétrica a partir do biogás se dá a partir da utilização de dispositivos tecnológicos que em uma primeira etapa convertem a energia química presente no combustível, o metano, em energia cinética de rotação, através dos motores. O motor se conecta a um gerador, que transforma esta energia cinética de rotação em energia elétrica. Qualquer que seja o dispositivo que converta a energia química do metano em energia cinética de rotação, este deverá estar conectado a um gerador para a produção da energia elétrica. Existem diferentes tipos de rotas tecnológicas para viabilizar a utilização do biogás produzido em aterros sanitários. Na Figura 24 é apresentada uma síntese dessas alternativas.

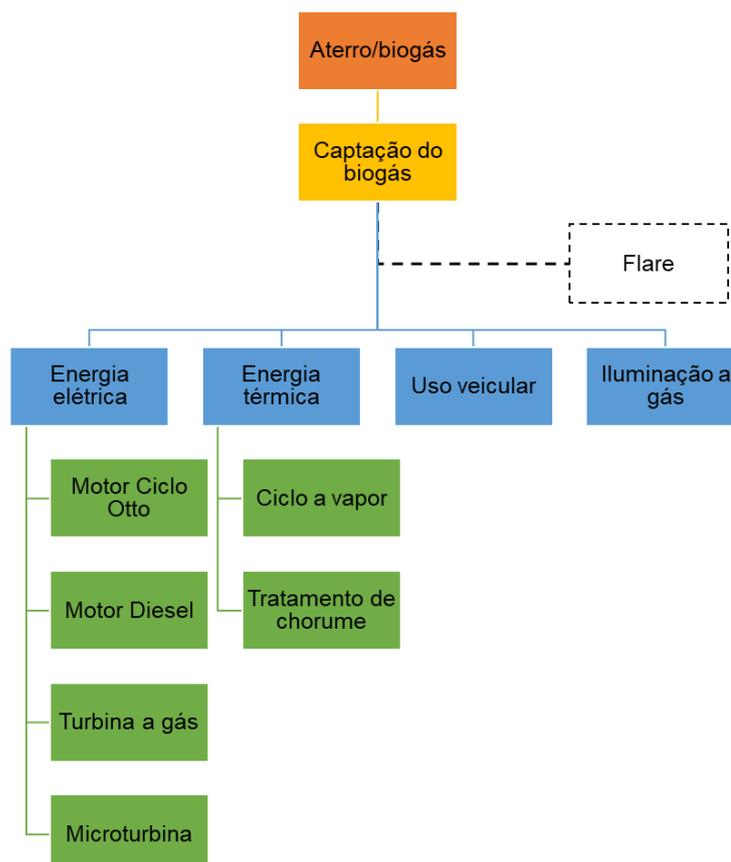


Figura 24. Diagrama com as alternativas de aproveitamento do biogás.
 Fonte: Adaptado de Santos (2011, p. 32)

Conforme o exposto no diagrama da Figura 23, o biogás gerado nos aterros sanitários é captado, podendo, em seguida, ser direcionado a quatro formas distintas de aproveitamento: a geração de energia elétrica; a geração de energia térmica; o uso como combustível veicular; e o uso para iluminação a gás. Independentemente do tipo de aproveitamento do biogás, o sucesso da proposta está na eficiência dos sistemas de extração e purificação do biogás, aumentando, assim, seu poder calorífico e reduzindo os contaminantes que reduzem seu potencial energético.

Para o caso deste estudo, o foco é a geração de energia elétrica. Portanto, as tecnologias de conversão energética do biogás em eletricidade serão descritas a seguir. Contudo, é preciso destacar que, em suma, os processos de conversão seguem um padrão semelhante entre si, onde em uma primeira etapa as tecnologias utilizadas convertem a energia química presente no biogás em energia cinética de rotação, através dos rotores; estes, conectados a um gerador, transformam esta energia cinética de rotação em energia elétrica.

Os motores de Ciclo Otto de quatro tempos foram desenvolvidos pelo engenheiro

alemão Nikolaus August Otto, no ano de 1867. Tais motores são amplamente utilizados no setor de transportes. No Ciclo Otto, a combustão ocorre por meio da explosão do combustível a partir de uma fagulha na câmara de combustão, sendo que o Ciclo consiste em expansão/resfriamento adiabático, seguido de resfriamento a volume constante, aquecimento/compressão adiabática e aquecimento a volume constante. Assim, mecanicamente o que ocorre é um processo pelo qual a válvula de entrada de ar é aberta no tempo preciso de modo a permitir a entrada de ar, misturado com combustível, no cilindro. Em seguida, a vela dá ignição na mistura no cilindro, propiciando a explosão, cuja força é transferida ao pistão que desce e sobe em um movimento periódico. A força no pistão é, pois, transferida ao eixo de transmissão por meio da manivela. Quando acoplado a um gerador, este eixo transfere a energia ao eixo do gerador, produzindo eletricidade (PECORA, 2006, p. 45-46). Esta é a tecnologia mais comum no uso de conversões energéticas do biogás devido, principalmente, ao maior rendimento elétrico e o menor custo de operação quando comparado com outras tecnologias, inclusive por se tratar do motor de combustão interna dos mais comuns no mercado. Para uso com o biogás como combustível, os motores de ciclo Otto necessitam de pequenas modificações nos sistemas de alimentação, ignição e na taxa de compressão do motor (SANTOS, 2011, p. 35), mas é o mais fácil, dentre os motores de combustão interna, de se adaptar para uso com biogás, devido às adaptações já existentes para gás natural (SOUZA, 2016, p. 9).

Já os motores a diesel, surgiram pouco tempo depois, no ano de 1892, sendo desenvolvidos por outro engenheiro alemão, chamado Rudolph Diesel. Tais motores são projetados para serem de maior porte e mais potentes, utilizando como combustível óleo diesel. Suas aplicações geralmente são em máquinas pesadas, automóveis de grande porte, locomotivas e até navios, mas também podem ser empregados na geração de energia elétrica, em bombas hidráulicas e compressores. O rendimento destes se dá em função da relação de compressão. No Ciclo Diesel, a combustão ocorre por meio da compressão do combustível na câmara de combustão (PECORA, 2006, p. 45-46). De acordo com Pereira *et al.* (2005, p. 4), devido à sua robustez e menor custo para uma mesma potência, quando comparado aos motores de Ciclo Otto, os motores Diesel são mais apropriados à geração de energia elétrica, sendo que a utilização de biogás como combustível neste tipo de tecnologia pode se

dar por meio de duas alternativas: a otolização⁹ e a conversão bicomcombustível diesel/gás¹⁰.

Com relação às turbinas a gás, utilizadas para geração estacionária de energia, estas foram desenvolvidas a partir das turbinas usadas na aviação, tendo como fluido o gás da câmara de combustão. Sua estrutura é composta por um compressor de ar, a câmara de combustão e a turbina propriamente dita, sendo o compressor acionado pela própria turbina. Um fator importante quanto ao seu dimensionamento está no fato de que os gases de exaustão devem sair em baixa velocidade, de modo a aumentar a geração de energia da turbina, produzindo um excedente de energia para o gerador. Outra opção que tem sido amplamente utilizada para geração de energia elétrica são as turbinas a gás de Ciclo Brayton. Neste tipo de turbina, há uma sucção contínua do ar atmosférico pelo compressor, onde o mesmo é comprimido a alta pressão e direcionado ao combustor, onde, misturado ao combustível, passa pelo processo de combustão, o que resulta em gases de alta temperatura. Estes gases sofrem expansão através da turbina, realizando trabalho e sendo descarregados na atmosfera. Parte deste trabalho aciona um gerador elétrico, produzindo eletricidade (PECORA, 2006, p. 42).

Por fim, as microturbinas, que também são a gás, são bem menores com relação às turbinas a gás convencionais. Sua faixa de operação está entre 20 e 250 kW, operando com elevadas velocidades de rotação e com uma variedade de combustíveis, tais como gás natural, biogás e gás liquefeito de petróleo, dentre outros. Seu funcionamento se dá pela aspiração do ar atmosférico que é forçado, sob alta velocidade e pressão, para o interior da turbina. Em seguida, o ar é misturado ao combustível e sofre combustão controlada na câmara de combustão, de modo que o controle propicie uma eficiência máxima e baixos níveis de emissões. Da mesma forma que nas turbinas convencionais, os gases resultantes da combustão sofrem expansão nas palhetas da turbina, produzindo trabalho que é aproveitado em um gerador elétrico para produção de eletricidade (PECORA, 2006, p. 44).

⁹ Neste processo todo o sistema de injeção de diesel é removido, sendo substituído por um sistema de carburação do gás ao ar de admissão e o sistema de ignição passa a ser feito por centelha. Outra importante alteração ocorre no cabeçote do motor, adequando-o a novas taxas de compressão. Devido a tantas modificações, deve-se considerar possíveis perdas de potência e performance (SOUZA, 2016, p. 10).

¹⁰ Nesta solução o biogás deve ser introduzido juntamente com o ar na fase de admissão do motor, sendo a ignição realizada por meio de uma pequena injeção-piloto de diesel, de modo a proporcionar a ignição por compressão. Este sistema não carece de modificações no motor (SOUZA, 2016, p. 9).

Comparativamente estas quatro rotas tecnológicas têm suas principais características sintetizadas na Tabela 6.

Tabela 6. Comparação das tecnologias de conversão de biogás em eletricidade.

Tecnologias de Conversão	Potência Instalada	Eficiência de Conversão Energética	Emissões de NOx em partes por milhão (ppm)
Motor a gás (Ciclo Otto)	30 kW – 20 MW	30% - 34%	250 – 3000
Motor Diesel (Biogás + Diesel)	-	30% - 35%	Em média 27
Turbina a Gás (Médio porte)	500 kW – 150 MW	20% - 30%	35 – 50
Microturbina (pequeno porte)	30 kW – 100 MW	24% - 28%	< 9

Fonte: Adaptado de Pecora (2006, p. 47-48)

É importante ressaltar que existem outras tecnologias de conversão do biogás em eletricidade, algumas ainda em pesquisa ou cuja aplicação é bastante incipiente no mercado brasileiro. Podem-se citar os motores Stirling e as células a combustível. É possível que em um futuro próximo estas e outras tecnologias já estejam disponíveis no mercado, aumentando a competitividade e a viabilidade econômica de todo o setor.

2.3.6 Análise da inserção do biogás no mercado energético nacional

De acordo com dados apresentados pela EPE (2014a, p. 214), a questão da inserção do biogás no mercado brasileiro para geração distribuída de eletricidade baseia-se na competitividade do biogás e em um conjunto de premissas estabelecidas para o cenário de referência. A premissa principal assumida

[...] é que a zona de competitividade atual de 20% do potencial teórico, que hoje é competitivo será alcançada somente em 2050. Ou seja, existe uma premissa conservadora que o potencial de competitividade do biogás, em relação ao seu potencial teórico, continuará o mesmo ao longo do período. A segunda premissa é que dado o cenário positivo em relação ao desenvolvimento do biogás, essas barreiras não econômicas serão mitigadas paulatinamente até 2030, quando o cenário de expansão da produção de biogás se torna mais favorável à implantação de projetos de biogás [...]

Contudo, devido à competitividade relativa entre os usos do biogás, geração de eletricidade e produção de biometano, da penetração de 20% somente 30% dessa penetração desta será utilizada para a geração distribuída, ou seja, para geração de eletricidade será considerado somente 6% do potencial de produção de biogás em 2050 (EPE, 2014a, p. 214).

Desta forma, levando-se em consideração que as projeções são referenciadas ao potencial teórico de produção de biogás e as zonas de competitividades do mesmo, o gráfico da Figura 25 apresenta, dentro do horizonte de 2050, a inserção para o cenário de referência e para o cenário de trajetória de sensibilidade de novas políticas - NP, que inclui aprofundamento das questões ambientais e das medidas de incentivo à produção do energético.

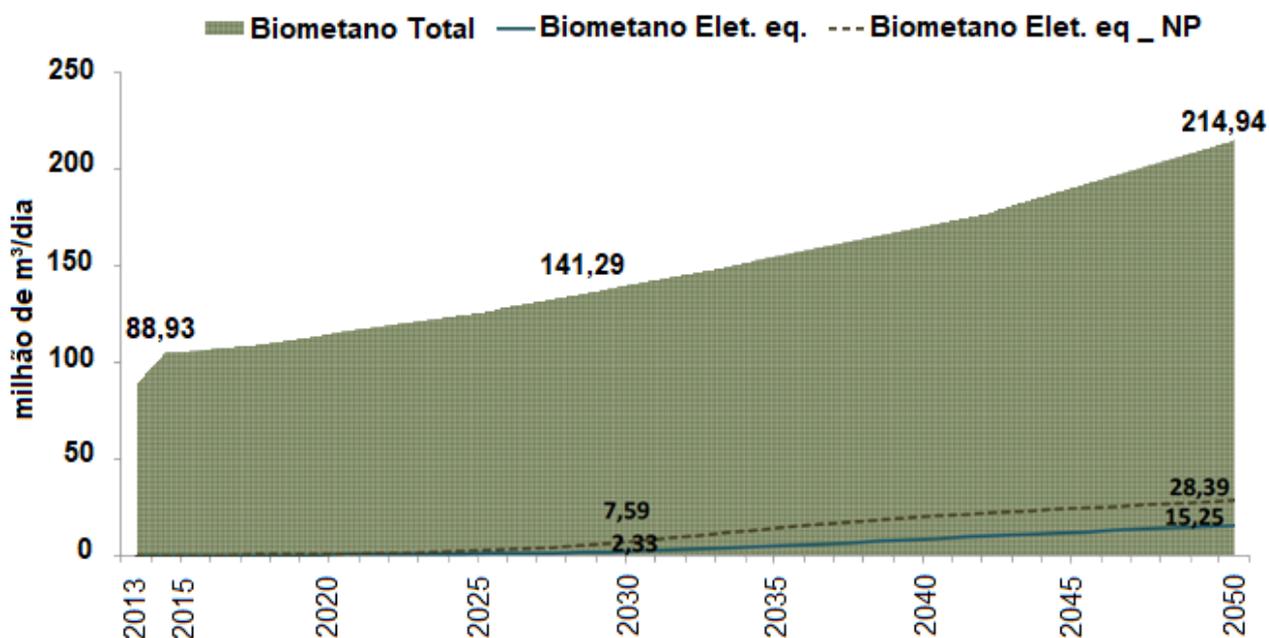


Figura 25. Projeção da inserção do biometano para geração distribuída versus potencial teórico.

Fonte: Adaptado de EPE (2016a, p. 227)

A comparação entre o potencial de produção do biogás e a inserção do biogás para geração de eletricidade no mercado foi feita por meio da contabilização do biometano equivalente, ou seja, tanto o biogás utilizado para a geração de eletricidade como do potencial foram transformados em milhões de m³/dia de biometano.

Já no gráfico da Figura 26 é apresentada a inserção da geração distribuída de biogás em termos de energia elétrica (EPE, 2016a, p. 227).

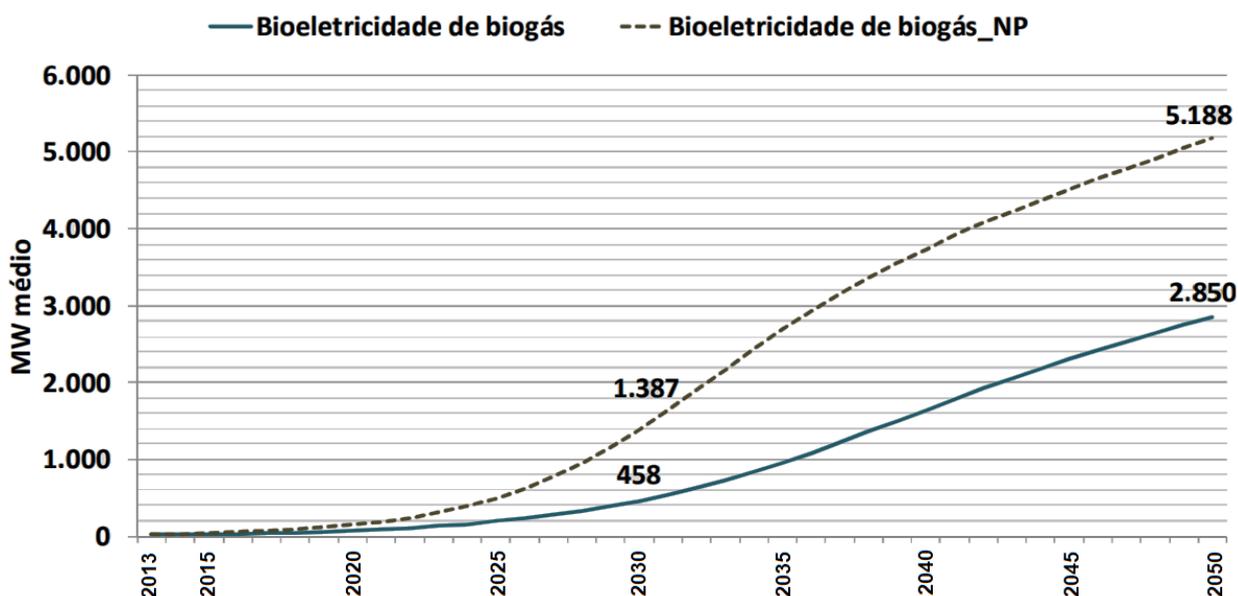


Figura 26. Projeção da inserção da geração distribuída de biogás.

Fonte: EPE (2016a, p. 227).

Para o período da primeira década, o cenário descrito pela EPE (2016a), em ambas as curvas de inserção, considera primeiro a inserção do biogás urbano, cujo potencial apresenta-se bastante inferior ao potencial de produção de biogás rural. Tal situação ocorre, de acordo com a análise da EPE (2016a, p. 227), devido a uma consequência do uso do biogás de aterros já existentes e da obrigatoriedade de correta destinação já em 2014. Assim, considera-se que, a partir de 2030, o mercado do biogás encontrará condições para o seu desenvolvimento, tendo como condições a difusão e consolidação dos projetos pioneiros, bem como o estabelecimento da cadeia de serviços do biogás.

3 CARACTERIZAÇÃO DO ESTADO DE MINAS GERAIS

Este capítulo apresenta uma caracterização demográfica do Estado de Minas Gerais, bem como sua contextualização dentro de um panorama nacional e mundial de densidade demográfica, comportamento do crescimento populacional, oferta e demanda de energia, urbanização e gerenciamento de resíduos sólidos urbanos.

3.1 Caracterização geográfica

O Estado de Minas Gerais localiza-se na região sudeste do Brasil, possui uma população de 19.597.330 habitantes distribuídos em 853 municípios, em uma área total de 586.852,35 km². Faz divisa com os Estados de Goiás, São Paulo, Rio de Janeiro, Espírito Santo, Mato Grosso do Sul e Bahia (PORTAL DO GOVERNO DE MINAS GERAIS, 2017). Dados do último Censo Demográfico (IBGE, 2010) demonstram que de 85% da população no Estado é urbana.

Quanto ao clima, a predominância é de clima tropical com subdivisões regionais, principalmente em função da altitude, e variações entre: tropical de altitude, tropical úmido e etc., além do clima semiárido que ocorre no extremo norte do Estado, em função da baixa pluviosidade (PORTAL DO GOVERNO DE MINAS GERAIS, 2017).

A cobertura vegetal de Minas Gerais pode ser descrita em quatro tipos de biomas principais (PORTAL DO GOVERNO DE MINAS GERAIS, 2017):

- Cerrado, que aparece em 50% do Estado especialmente nas bacias dos rios São Francisco e Jequitinhonha;
- Mata Atlântica, com elevado índice pluviométrico;
- Campos de Altitude ou Rupestres, encontrado nos pontos mais elevados das serras da Mantiqueira, Espinhaço e Canastra;
- Mata Seca que aparece no Norte do Estado, no vale do rio São Francisco (diversos fatores, entre eles, o clima, o relevo e as bacias hidrográficas, são predominantes na constituição da variada vegetação regional).

3.2 Comportamento da demanda e oferta de energia

A Matriz Energética de Minas Gerais 2007 a 2030, publicada pelo Conselho Estadual de Energia (CONER), trata-se de um estudo realizado pela COPPE e UNIFEI, no ano de 2007, que explicita que a geração e transmissão de energia elétrica no Estado estão integradas ao Sistema Interligado Nacional - SIN, ou seja, sua operação é feita de forma integrada pelo Operador Nacional do Sistema - ONS, de modo a manter os ganhos de sinergia da operação coordenada, incrementando as garantias de continuidade, da qualidade e da economicidade do suprimento de energia elétrica. Tal estudo desenvolve dois cenários no intuito de auxiliar as políticas públicas estaduais, sendo estes um cenário Referência e um cenário Alternativo.

Com relação ao cenário Referência, este esclarece que a demanda por energia elétrica no Estado de Minas Gerais tende a crescer, ao longo do horizonte proposto (2030), a uma taxa média anual de 4,09%, sendo que no mesmo período, a geração total estadual de energia elétrica cresce a uma taxa menor, de apenas 3,30%, o que impõe a importação da diferença, de outros Estados da federação, de modo a atender as demandas exigidas internamente. Neste contexto, para o período 2025-2030, o acréscimo de demanda é praticamente atendido de forma integral por importação, com pouco incremento da geração de energia elétrica dentro do Estado. Conforme perspectivas deste cenário “Minas Gerais passa de um exportador líquido para um importador líquido de energia elétrica no final do período de análise, importando cerca de 17% da eletricidade consumida” (COPPE e UNIFEI, 2007, p. 27).

Já o cenário Alternativo expõe que a demanda por energia elétrica no Estado de Minas Gerais cresce a uma taxa média anual de 3,81%, ao passo que a geração cresce a 3,43%, demonstrando assim que, neste cenário, o Estado também alcançará o horizonte proposto como um importador líquido de energia elétrica, sendo 8,7% da sua demanda atendida por importação. Um fator importante que também ocorre nesse cenário é o esgotamento do potencial hidrelétrico no Estado, seguindo a mesma tendência do cenário anterior, mas com característica de evolução um pouco distinta.

A Tabela 7 apresenta uma síntese dos resultados obtidos para ambos os cenários, com destaque para o aproveitamento energético de RSU, que, para os dois cenários, foi mantido idêntico, sem considerar possíveis alterações distintas entre os dois

caminhos previstos, com uma perspectiva de geração de eletricidade a partir da recuperação energética de RSU de apenas 293 MW, em 2030, o que configura uma deficiência do aproveitamento energético desta fonte de energia. Seguindo estas projeções, tal deficiência deve estender-se até o ano de horizonte de 2050. É importante enfatizar que estas são as últimas projeções oficiais para o Estado de Minas Gerais e foram realizadas em 2007.

Tabela 7. Evolução da capacidade instalada em Minas Gerais (MW) conforme cenários de referência e alternativo.

Cenário	Fontes	Capacidade Instalada em Minas Gerais (MW)				
		2010	2015	2020	2025	2030
Referência	RSU	245	258	270	281	293
	Total de Renováveis	13282	15452	18469	19276	19529
	Total de Não Renováveis	711	779	866	3346	3654
	Total	13993	16231	19335	22622	23183
Alternativo	RSU	245	258	270	281	293
	Total de Renováveis	13077	15086	17700	20140	20578
	Total de Não Renováveis	711,3	779,4	866,2	1716,6	3236,9
	Total	13788,3	15865,4	18566,2	21856,6	23814,9

Fonte: Adaptado de COPPE e UNIFEI (2007, p. 27-28).

Em ambos os cenários haverá necessidade de importação de energia elétrica de outros Estados, de modo a suprir a demanda interna, sendo que, em 2030, está previsto um déficit de aproximadamente 14.140.000 MWh de energia elétrica, equivalente a 11% da demanda total do Estado (COPPE e UNIFEI, 2007, p. 28).

Este estudo apresentado por COPPE e UNIFEI (2007) torna clara a necessidade de se repensar o uso da energia elétrica na economia mineira, bem como a redução da dependência externa, impulsionando a avaliação de novas rotas tecnológicas para a geração de eletricidade, como o caso do biogás, sempre primando pela eficiência energética de tal modo a agregar maior valor e segurança energética.

3.3 Situação da destinação final de RSU em Minas Gerais

O Conselho Estadual de Resíduos Sólidos do COPAM, em 2001 (MINAS GERAIS,

2001), 2004 (MINAS GERAIS, 2004) E 2008 (MINAS GERAIS, 2008) convocou os municípios mineiros, por meio de deliberações normativas, para que realizassem o licenciamento ambiental de sistemas para destinação final adequada de RSU. No ano de 2009, por meio da Lei Estadual nº 18.031/2009, foi instituída a Política Estadual de Resíduos Sólidos – PERS, sendo regulamentadas as diretrizes para o alcance da gestão dos resíduos sólidos urbanos, desde sua geração até sua destinação final (MINAS GERAIS, 2009).

Em 2003, a Fundação Estadual do Meio Ambiente – FEAM criou em Minas Gerais o Programa Minas Sem Lixões, com o intuito de apoiar os municípios mineiros nos processos de implementação de políticas públicas direcionadas à gestão adequada dos resíduos sólidos urbanos, em atendimento às normas definidas pelo Conselho Estadual de Política Ambiental – COPAM. Dentre suas metas, podem-se destacar o fim de 80% dos lixões até o ano de 2011, bem como a disposição final adequada, em sistemas tecnicamente adequados e devidamente licenciados pelo COPAM, de pelo menos 60% dos RSU gerados em Minas Gerais.

As mudanças de paradigmas sobre a destinação final de RSU no Estado de Minas Gerais têm apresentado resultados muito favoráveis à regularização ambiental. Em 2001, dos 853 municípios mineiros, 823 dispunham seus resíduos em lixões, ao passo que, em 2016, este número caiu para 246 municípios. Quanto à relação da população urbana no Estado e a destinação de seus RSU, em 2001, 77,51% da população destinava seus resíduos a lixões, sendo que, já em 2016, este percentual caiu para 18,95% (FEAM, 2017, p. 61). No gráfico da Figura 27 são apresentadas tais mudanças de paradigma, demonstrando a evolução das tipologias de destinação de RSU em Minas Gerais de 2001 a 2016. No caso deste gráfico UTC significa Usina de Triagem e Compostagem e AAF significa Autorização Ambiental de Funcionamento.

Os dados mais atuais disponíveis para Minas Gerais, com relação à situação da destinação final de RSU no Estado, correspondem ao ano de 2016, conforme FEAM (2017). Dados do documento "Panorama da Destinação dos Resíduos Sólidos Urbanos no Estado de Minas Gerais em 2016", cerca de 57,79% da população urbana era atendida por algum sistema de tratamento e/ou destinação final de RSU regularizado. O documento ainda apresenta dados que mostram que 10,51% da população urbana destina seus RSU a aterros sanitários e/ou UTCs não regularizados, e 31,71% a empreendimentos irregulares, sendo 12,76% a aterros

controlados e 18,95% a lixões (FEAM, 2017, p. 63).

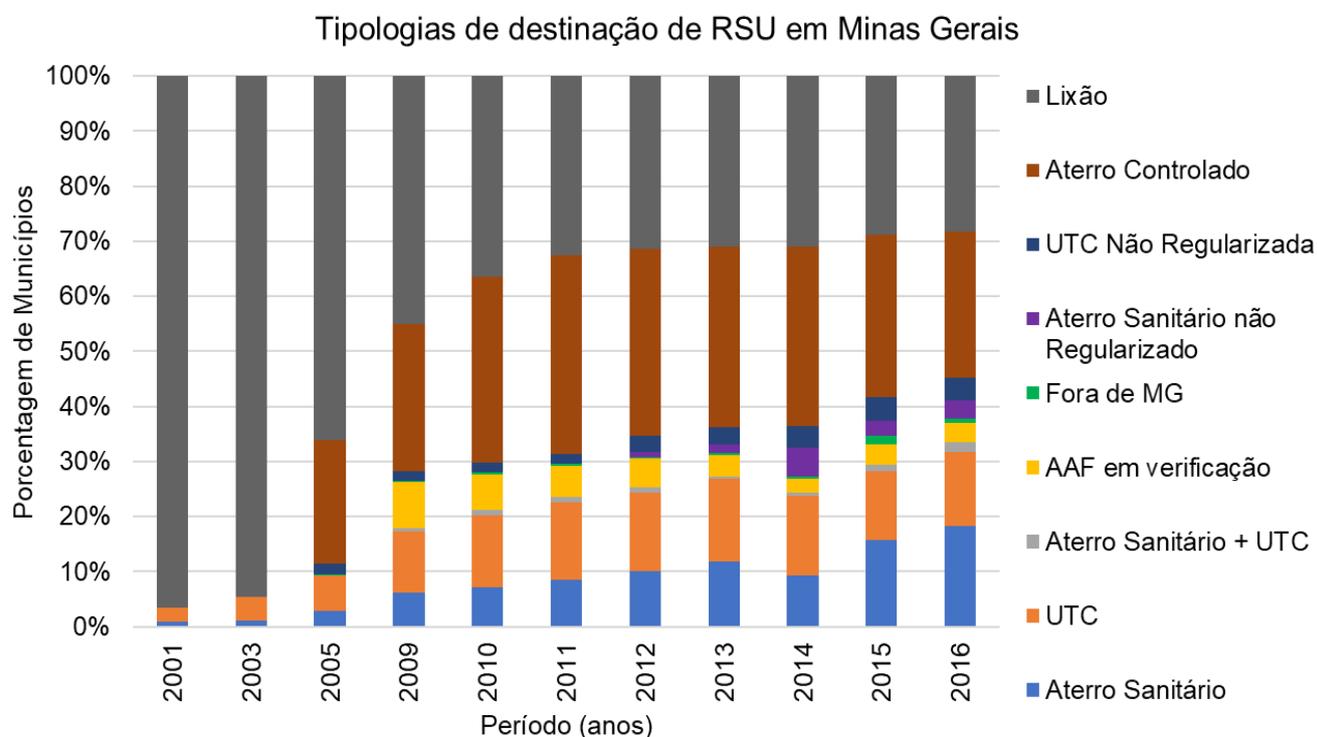


Figura 27. Evolução das tipologias de destinação final de RSU em Minas Gerais no período de 2001 a 2016.

Fonte: Adaptado de FEAM (2017, p. 63).

3.4 Os Territórios de Desenvolvimento

O Estado de Minas Gerais possui uma divisão administrativa composta por dez macrorregiões. Contudo, desde o dia 09 de junho de 2015, passou a vigorar, por meio do Decreto 46.774, uma nova divisão, composta por dezessete Territórios de Desenvolvimento Econômico e Social, sendo eles: Alto Jequitinhonha, Caparaó, Central, Mata, Médio e Baixo Jequitinhonha, Metropolitana, Mucuri, Noroeste, Norte, Oeste, Sudoeste, Sul, Triângulo Norte e Triângulo Sul, Vale do Aço, Vale do Rio Doce, Vertentes (MINAS GERAIS, 2015, p. 1). A relação de todos os municípios mineiros correspondentes aos seus devidos agrupamentos nos Territórios de Desenvolvimento pode ser consultada no Anexo 1.

Este modelo é uma divisão regional do Estado, ao contrário de um modelo centralizado, que pretende respeitar as especificidades de cada território e bem como tratar de forma mais adequada os problemas e demandas de cada localidade

(CASTRO, 2015, p. 1). O que distingue esses territórios são suas características diferenciadas, sendo que seu objetivo é facilitar a implantação de dezessete fóruns regionais, um em cada território. Tais fóruns pretendem constituir-se em poderosa ferramenta para participação popular dentro desses territórios e visam atrair a sociedade para a discussão e elaboração de políticas públicas dentro do Plano Mineiro de Desenvolvimento Integrado – PMDI e do Plano Plurianual de Ação Governamental - PPAG. Desta forma, o Governo do Estado pretende que, ao longo da próxima década, Minas Gerais tenha uma gestão regional de suas ações de forma mais efetiva, onde a participação popular constitui-se como uma variável que pretende dinamizar a gestão pública.

É importante esclarecer que o arranjo dos Territórios de Desenvolvimento Econômico e Social não constitui a única forma de tratar o tema dos resíduos sólidos urbanos, nem pretende, neste trabalho, estabelecer-se como a forma mais eficiente dentre todas as demais. Há, por exemplo, estudos da área de energia que levam em consideração as áreas das bacias hidrográficas, outros consideram a antiga organização administrativa em macro e microrregiões. Contudo, a escolha desta abordagem busca estar alinhada à proposta definida atualmente para a regionalização das tomadas de decisão no Estado de Minas Gerais, contribuindo para a identificação do potencial energético como parte integrante do potencial de desenvolvimento econômico de cada território.

Os dezessete Territórios de Desenvolvimento são apresentados no mapa da Figura 28.

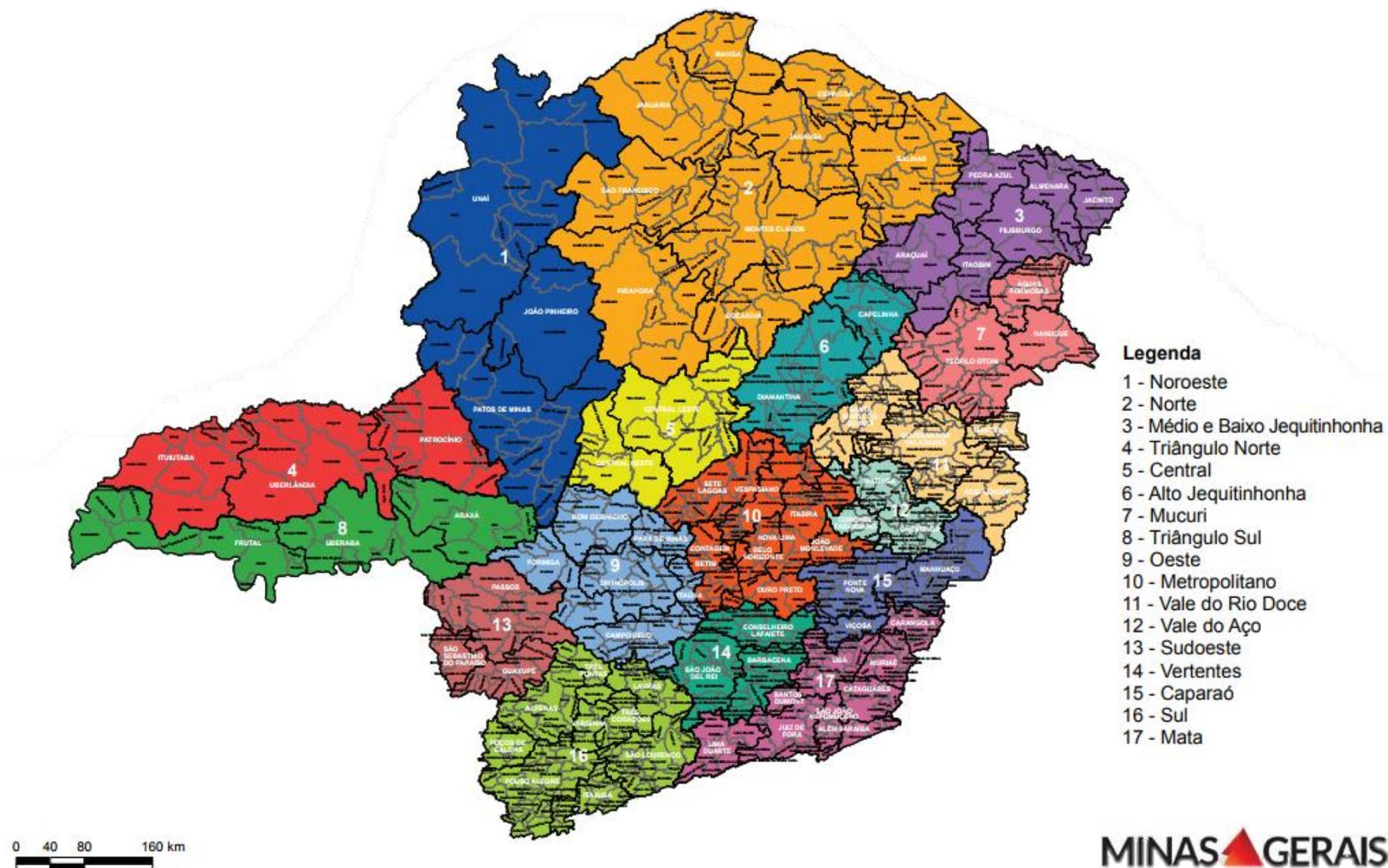


Figura 28. Territórios de Desenvolvimento e Microterritórios de Minas Gerais.
 Fonte: AGÊNCIA MINAS GERAIS (2017).

Na Tabela 8 é apresentada uma síntese das principais características dos Territórios de Desenvolvimento de Minas Gerais.

Tabela 8. Caracterização sintética dos Territórios de Desenvolvimento de Minas Gerais.

Território de Desenvolvimento	Nº de Municípios	População (IBGE 2012)		Extensão Territorial		Contribuição no PIB Estadual (IBGE 2012)	
		Absoluta (habitantes)	Relativa (%)	Absoluta (km ²)	Relativa (%)	Absoluta (milhões de R\$)	Relativa (%)
Alto Jequitinhonha	24	305.616	1,6	21.131	3,6	2.418,00	0,6
Caparaó	55	675.711	3,4	15.389	2,6	8.060,00	2,0
Central	17	243.235	1,2	23.461	4,0	3.627,00	0,9
Mata	93	1.561.463	8,0	24.534	4,2	22.971,00	5,7
Médio e Baixo Jequitinhonha	31	437.805	2,2	32.149	5,5	2.821,00	0,7
Metropolitano	90	5.880.619	30,0	35.822	6,1	164.424,00	40,8
Mucuri	29	431.541	2,2	23.162	3,9	4.030,00	1,0
Noroeste	30	652.954	3,3	77.755	13,3	12.896,00	3,2
Norte	86	1.577.300	8,0	122.829	20,9	16.120,00	4,0
Oeste	56	1.194.156	6,1	29.824	5,1	20.956,00	5,2
Sudoeste	34	564.501	2,9	17.236	2,9	12.090,00	3,0
Sul	119	2.045.101	10,4	36.566	6,2	41.106,00	10,2
Triângulo Norte	30	1.200.694	6,1	44.624	7,6	36.270,00	9,0
Triângulo Sul	27	697.812	3,6	35.548	6,1	22.165,00	5,5
Vale do Aço	33	780.202	4,0	9.840	1,7	13.702,00	3,4
Vale do Rio Doce	49	646.879	3,3	21.547	3,7	7.254,00	1,8
Vertentes	50	723.489	3,7	15.105	2,6	12.090,00	3,0

Fonte: Adaptado de AGÊNCIA MINAS GERAIS (2017)

Com relação à área correspondente a cada Território, bem como à quantidade de municípios que os compõem, o gráfico da Figura 29 apresenta os dados referentes a estas informações.

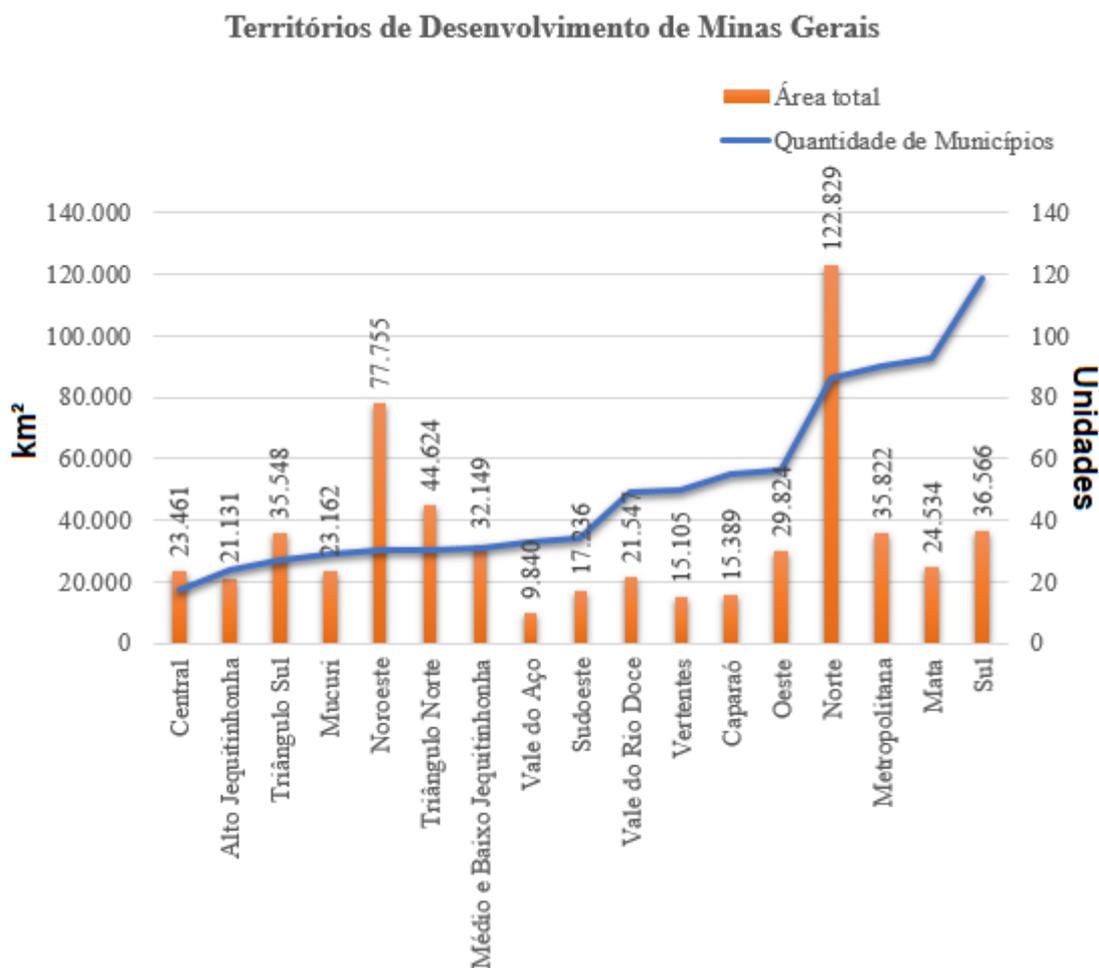


Figura 29. Área de ocupação e quantidade de municípios dos Territórios de Desenvolvimento de Minas Gerais.

Fonte: Adaptado de AGÊNCIA MINAS GERAIS (2017).

Pelo gráfico é possível perceber a variação de extensão dos municípios que compõem os Territórios de Desenvolvimento. Esta realidade é expressiva quando se verifica a variação destes componentes, como o Território Central com apenas 17 municípios e o Território Sul com 119 municípios, sendo que, em extensão territorial, o Sul corresponde a apenas cerca de 50% a mais do Território Central.

4 METODOLOGIA DE TRABALHO

Este capítulo apresenta a metodologia desenvolvida para a obtenção dos resultados esperados, conforme descritos no capítulo “1 INTRODUÇÃO”. Esta metodologia se baseia em outras já amplamente aplicadas no Brasil e em outros países, como a proposta pelo IPCC.

4.1 Projeção Populacional

Conforme MMA (2016, p.23), para se estimar a população no horizonte de planejamento, é preciso realizar um estudo de evolução populacional, cujo objetivo é conhecer qual a população estimada para cada ano do horizonte do projeto. Para tanto, é proposta a realização de uma “[...] projeção da população por meio de métodos matemáticos ou estatísticos, como o método crescimento aritmético, ou o do crescimento geométrico. Todos estes métodos se baseiam nos dados históricos de população, como os dados censitários produzidos pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE[...]” (MMA, 2016, p.23).

Assim, esta etapa do estudo inicia-se com o levantamento dos dados censitários, de contagens populacionais e de estimativas/projeções da população de cada município de Minas Gerais, conforme publicado pelo IBGE. Assim, com a associação destes dados, é possível elaborar uma tabela contendo a série histórica, possibilitando uma avaliação do comportamento das taxas de crescimento dos municípios. Contudo, no intuito de avaliar o potencial de geração de biogás a partir de resíduos sólidos urbanos depositados em aterros sanitários, é importante ressaltar que apenas a parcela da população urbana faz parte do objeto requerido para o escopo deste estudo. Neste sentido, destaca-se que os dados do IBGE que mostram a população urbana de cada município são encontrados nos censos populacionais que, no Brasil, são realizados a cada dez anos, conforme periodicidade regulamentada pela Lei nº 8.184 de 10 de maio de 1991 (BRASIL, 1991).

Como hipótese, considera-se que, durante os anos do intervalo entre dois censos populacionais subsequentes, a proporção correspondente à população urbana de

cada município, seria a mesma do ano de início do intervalo. Ou seja, hipoteticamente, ocorrido um censo no ano X0 e outro no ano X10, as populações urbanas relativas de cada município nos anos de X1 a X9 corresponderiam à mesma taxa de proporção das populações urbanas do censo do ano X0. Para os municípios criados após o início do período considerado nos censos utilizados neste trabalho, as populações anteriores aos anos de suas criações foram consideradas iguais a zero.

Considera-se ainda que, para o horizonte de 2050, tendo-se como base os dados do IBGE, de forma geral, o crescimento dos municípios de Minas Gerais está em consonância com o crescimento regional e de cidades do mesmo porte. Levando-se em consideração o fato de que, para os municípios menores, deve permanecer a diminuição da população rural e o aumento da população urbana (relativamente), até que seja atingido o equilíbrio comparado em termos nacionais e mundiais, dos países em desenvolvimento, onde, em média, 90% da população reside em áreas urbanas e 10% em áreas rurais.

Como apresentado no Capítulo “2 REVISÃO DE LITERATURA”, existem muitos modelos e métodos para a realização de projeções populacionais. Cada método contém suas peculiaridades e critérios, de modo a aproximar o resultado da realidade mais provável para cada caso. Assim, para este estudo, foi escolhido o método da progressão geométrica, utilizando-se da Equação 2. A escolha deste método se baseia na quantidade e qualidade dos dados disponibilizados pelos bancos de dados do IBGE. O próprio Instituto atualiza e otimiza seus métodos com o passar do tempo, sempre refinando mais e mais a qualidade das informações. A grande quantidade de dados a serem processados, bem como sua variabilidade quanto à precisão e qualidade, acabam por limitar o uso de métodos mais precisos e sofisticados. Todavia, a progressão geométrica atende bem aos objetivos deste trabalho.

4.1.1 Taxa de crescimento

O período considerado para efeito do cálculo da taxa de crescimento foi o dos dois últimos censos populacionais: de 2000 a 2010. Esta consideração foi feita devido ao fato de 131 municípios terem sido criados após os censos de 1980 e de 1991, alterando os limites territoriais e quantidade de habitantes residentes em pelo menos

mais 131 municípios, constituindo uma anomalia nas taxas de crescimento de cerca de 262 dos atuais municípios mineiros. A partir do censo de 2000 até o de 2010 não houve a criação nem extinção de nenhum município, o que faz com este período represente maior segurança e certeza na coerência dos dados.

4.2 Estimativa de produção de RSU

Para se estimar o potencial de produção de RSU dos Territórios de Desenvolvimento do Estado de Minas Gerais, primeiramente é necessário calcular a estimativa de geração de resíduos de cada município, para depois agrupar os resultados por território. Desta forma, de posse dos dados das projeções anuais das populações municipais, o próximo passo é multiplicar a população (número de habitantes) pela taxa média per capita de geração de RSU. A produção per capita dos resíduos sólidos nos municípios brasileiros oscila entre 0,46 a 1,29 kg (IBGE, 2010). Conforme dados apresentados na Tabela 2 (sessão 2.2.2), pode-se observar que há uma tendência de a quantidade de resíduos produzidos ser diretamente proporcional ao tamanho da população da cidade, ou seja, quanto maior a comunidade municipal, maior a produção de resíduos.

Assim, conforme os extratos populacionais apresentados, classificou-se cada município mineiro quanto à taxa de produção per capita de RSU correspondente. É importante salientar que esta classificação se realizou para cada população anual ao longo das projeções municipais. Ou seja, os municípios podem ter taxas diferentes conforme se movem dentro das faixas propostas pelos extratos populacionais municipais, o que dá maior dinamicidade às projeções.

4.3 Cálculo do potencial de geração de biogás de aterro

Para a determinação do potencial de geração de biogás em aterros sanitários, o *Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC (2006)* apresenta uma metodologia amplamente aceita e utilizada em muitos países. Ela consiste da aplicação de algumas equações matemáticas, apresentadas a seguir. Este modelo

possibilita a estimativa de geração de CH₄ em diferentes regiões geográficas, uma vez que prevê parâmetros característicos de cada região (IPCC, 2006, p. 3.11).

Para definir a estimativa teórica da vazão de metano proveniente de RSU depositado em aterros sanitários, o IPCC propõe o cálculo por meio da Equação (7) (IPCC, 1996b, p. 6.5). Este modelo é discreto e demonstra a geração teórica anual de metano. Há, contudo, outros modelos contínuos formulados e utilizados tanto pelo IPCC quanto por outros órgãos de grande relevância mundial, como a *United States Environmental Protection Agency - USEPA* e a *United Nations Framework Convention on Climate Change - UNFCCC*.

$$Q_{CH_4} = [(Pop_{urb} \cdot Taxa_{RSU} \cdot RSU_f \cdot L_0) - R] \cdot (1 - OX) \quad (7)$$

Onde:

Q_{CH_4} : Vazão de metano gerado [10^3 kg_{CH₄}/ano];

Pop_{urb} : População urbana [habitantes];

$Taxa_{RSU}$: Taxa anual de geração de RSU per capita [kg_{RSU}/habitante.ano];

RSU_f : Fração de RSU depositada em aterros sanitários [%];

L_0 : Potencial de geração de metano dos RSU [10^3 kg_{CH₄}/ 10^3 kg_{RSU}];

R : Metano recuperado [10^3 kg_{CH₄}/ano];

OX : Fator de oxidação.

O potencial de geração de metano dos RSU (L_0) é um dado de grande importância que, além de ser utilizado na metodologia desenvolvida pelo IPCC, também pode ser usado em outras metodologias e mesmo em softwares desenvolvidos para a estimativa de metano gerado em aterros sanitários. Assim, L_0 é calculado pela Equação (8) (IPCC, 2006, p. 3.9).

$$L_0 = MCF \cdot DOC \cdot DOC_f \cdot F \cdot \frac{16}{12} \quad (8)$$

Onde:

MCF : Fator de correção de metano [%];

DOC : Fração de carbono degradável [kg_C/kg_{RSU}];

DOC_f : Fração de DOC dissolvida (que realmente degrada) [kg_C/kg_{RSU}];

F : Fração de metano no biogás de aterro;

$16/12$: Fator de conversão de carbono (C) para metano (CH₄) [10^3 kg_{CH₄}/ 10^3 kg_C].

O DOC é o carbono orgânico que é acessível à decomposição bioquímica. Baseia-se na composição dos resíduos e pode ser calculado a partir de uma média ponderada do teor de carbono de vários componentes dos RSU. Esta variável leva em conta a

composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos e a quantidade de carbono presente em cada componente do RSU. A Equação (9) estima o DOC usando valores padrão de carbono por conteúdo (IPCC, 1996b, p. 6.9).

$$\text{DOC} = (0,4 \cdot A) + (0,17 \cdot B) + (0,15 \cdot C) + (0,4 \cdot D) + (0,3 \cdot E) \quad (9)$$

Onde:

A: Percentual de papel e papelão na composição dos RSU;

B: Percentual de resíduos de poda, jardinagem e outros materiais orgânicos não alimentícios (resíduos de parques e jardins) na composição dos RSU;

C: Percentual de resíduos alimentícios orgânicos na composição dos RSU;

D: Percentual de têxteis na composição dos RSU.

E: Percentual de madeiras e resíduos florestais na composição dos RSU.

Para este estudo, foi feita uma adaptação ao cálculo do DOC, uma vez que os dados disponíveis não estavam discriminados da mesma forma que o modelo do IPCC (1996b, p. 6.9). Assim, uniram-se os fatores B e C, considerando-se $B+C=0,16$. De acordo com dados apresentados pela EPE (2014b, p. 20), a composição média dos RSU produzidos no Brasil é de 60,0% de matéria orgânica, 15,0% de papel e papelão, 5,0% de têxteis, 1,0% de madeiras e 20,0% de outros materiais não geradores de metano (plásticos, vidros, metais e etc.).

De acordo com Bingemer e Crutzen (1987, p. 1), a fração dissociada de carbono orgânico degradável (DOC_f) corresponde à fração de carbono que é disponível para a decomposição bioquímica, podendo variar em função da temperatura na zona anaeróbia do aterro sanitário. Assumindo-se que esta temperatura permanece constante por volta dos 35 °C IPCC (1996b, p. 6.9), não obstante a temperatura ambiente, pode-se calcular o DOC_f pela Equação (10).

$$\text{DOC}_f = (0,014 \cdot T) + 0,28 \quad (10)$$

Onde:

T: Temperatura na zona anaeróbia do aterro sanitário.

Quanto à parcela de resíduos depositados em aterros sanitários, é preciso considerar-se a abrangência dos serviços de coleta. Para o Brasil como um todo, a taxa de cobertura vem crescendo continuamente, já alcançando em 2009 quase 90% do total de domicílios e se aproximando da totalidade dos domicílios urbanos. Contudo, apesar

do índice elevado, essa cobertura é distribuída de forma desigual no território nacional, o que pode ser observado, por exemplo, quando se comparam os domicílios urbanos com os rurais, uma vez que a coleta em domicílios rurais alcança apenas metade da taxa de cobertura das áreas urbanas (nas regiões Sul e Sudeste), chegando a abaixo de 30% nas demais regiões. Assim, dados de 2009, apresentados pela Política Nacional de Resíduos Sólidos, demonstram que, em se tratando do país como um todo, a abrangência da coleta de resíduos chegava a 98,5% em áreas urbanas, ao passo que em áreas rurais não passava de 32,7% (MMA, 2011, p. 7-8). Desta forma, com uma perspectiva para o Estado de Minas Gerais aceitando esta variação da distribuição dos serviços, para a estimativa teórica da produção de biogás de aterro sanitário, consideraram-se dois cenários:

- Um Otimista: tendo como hipótese que todos os resíduos gerados em Minas Gerais seriam completamente destinados a aterros sanitários, ou seja, o RSU_f igual a 1,0.
- Um Pessimista: tendo como base a meta do Programa Minas sem Lixões de que 60% dos RSU produzidos no Estado deveriam ter uma destinação final adequada e regularizada, considera-se que durante todo o período o valor de RSU_f se manterá estável em 0,65 (FEAM, 2012, p. 21).

Assumiu-se que o MCF para o caso de aterro é 1,0, conforme relatado no IPCC (1996a, p. 3.14). Um valor de 50% foi considerado para a fração em volume de CH_4 no biogás de aterro, como geralmente é aceito, conforme expresso por FEAM (2012, p.53; IPCC, 2006, p. 3.14). Para a conversão do L_0 em $m^3_{CH_4}/kg_{RSU}$, considera-se a densidade do metano (σ) igual a $0,0007168 t/m^3$ (UNFCCC, 2017, p. 9). Assim, o valor encontrado para o L_0 é de $128,19 m^3_{CH_4}/kg_{RSU}$. O valor padrão para a recuperação CH_4 (R) é zero, segundo o IPCC (2006, p. 3.19), da mesma forma que o fator de oxidação (OX), conforme IPCC (2006, p. 3.15).

4.4 Cálculo da geração de energia elétrica a partir do biogás de aterro

Para a geração de energia elétrica, consideram-se quatro níveis de aproveitamento do biogás:

- O primeiro considerando-se que o total do potencial de biogás a ser produzido (100%) será usado para geração de energia elétrica.
- O segundo admite que parte do biogás gerado será utilizado para geração de energia elétrica (60%), e o restante como combustível (40%) (EPE, 2016b).
- O terceiro, prevendo-se um aproveitamento de apenas 20% do biogás para geração de energia elétrica, considerando-se a estagnação do crescimento do aproveitamento de biogás no Brasil, conforme apresentado pelos dados disponíveis na “Calculadora Brasil 2050” ¹¹(EPE, 2016b).
- O quarto nível, considerando as previsões de inserção do biogás no mercado brasileiro, onde apenas 7% do biogás produzido poderá ser utilizado para a produção de eletricidade (EPE, 2016a, p. 227).

Além dos quatro níveis citados, foram consideradas quatro tecnologias de conversão do biogás em energia elétrica, cada uma com sua eficiência de conversão distinta das demais. Embora as diferenças entre as eficiências possam ser próximas entre si, quando aplicadas sobre grandes volumes de energia elas apresentam distinções consideráveis.

Como resultado, ter-se-á 32 cenários distintos, compostos pelas combinações entre os quatro níveis, as quatro rotas tecnológicas para conversão do biogás em eletricidade e os dois cenários de disposição dos resíduos em aterros sanitários.

Para a determinação do potencial de energia disponível, utilizam-se as Equações (11) e (12) (LOBATO, 2011; ZILOTTI, 2012).

$$P_x = Q_x \cdot \eta \cdot PCI_D \quad (11)$$

Onde:

P_x : Energia elétrica disponível [kWh/dia];

Q_x : Vazão média diária de biogás gerado [m^3 /dia]

η : eficiência elétrica de conversão [%];

PCI_D : Poder calorífico inferior disponível [kWh/m^3].

¹¹ A Calculadora Brasil 2050 é uma ferramenta desenvolvida pela EPE em parceria com a COPPE-UFRJ e com o suporte do Departamento de Energia e Mudanças Climáticas do Reino Unido (*Department for Business, Energy & Industrial Strategy - BEIS*) e da Embaixada Britânica no Brasil (*British Embassy Brasilia*). Tal ferramenta permite a construção de diferentes cenários energéticos para o horizonte até 2050, por meio do balanço entre oferta e demanda de energia e de medidas de expansão da oferta e eficientização da demanda. Para cada cenário, apresenta seu impacto em termos de emissões de gases de efeito estufa (GEE), composição da matriz energética, dependência externa de energia. Os resultados dos cenários abrem uma discussão sobre o futuro do sistema energético nacional e áreas com maior potencial de mitigação de emissões de GEE (EPE, 2016b).

$$PCI_D = \gamma_{CH_4} \cdot PCI_{CH_4} \cdot k \quad (12)$$

Onde:

PCI_D : Poder calorífico inferior disponível [kWh/m³];

γ_{CH_4} : Peso específico do metano [kg/m³]

PCI_{CH_4} : Poder calorífico inferior do metano [kcal/kg];

k: fator de conversão de kcal em kWh [4,19/3600].

O poder calorífico inferior considerado para o CH₄ foi o de 3.281,92 kcal/kg, interpolando da Tabela 6, para uma concentração de 50% de CH₄ no biogás. Da mesma forma, o peso específico será de 1,3372 kg/m³, também interpolado da Tabela 6.

As eficiências a serem consideradas serão as seguintes, conforme as rotas tecnológicas de conversão energética do biogás para eletricidade (CENBIO, 2004 *apud* PECORA, 2006, p. 86):

- Motores a gás (Ciclo Otto): 34%;
- Motores a Diesel (Biogás + Diesel): 35%;
- Turbinas a gás: 30%;
- Microturbinas: 28%.

Destaca-se que as impurezas contidas no biogás podem afetar a eficiência de conversão energética dos equipamentos ao longo do tempo, uma vez que podem reagir com os materiais que os constituem. Desta forma, quanto maior a concentração de metano e quanto mais puro for o biogás, maiores são as garantias de se manter a eficiência de conversão dos equipamentos durante sua vida útil.

Assim, para o cálculo do potencial de geração de eletricidade a partir dos dois cenários apresentados para produção de biogás de aterro, foi aplicada a Equação (15), para cada uma das quatro rotas tecnológicas de conversão energética do biogás, considerando-se os quatro níveis possíveis de aproveitamento do biogás para geração de eletricidade. Assim, para facilitar a compreensão, os resultados foram agrupados com as denominações contidas na Tabela 9.

Tabela 9. Cenários de aproveitamento do biogás de aterro para geração de eletricidade.

Cenário	Perspectiva de aproveitamento do biogás para geração de eletricidade	Motor Ciclo Otto	Motor Diesel	Turbina a Gás	Microturbina
Otimista RSU _f = 1,0	100%	1A	1B	1C	1D
	60%	2A	2B	2C	2D
	20%	3A	3B	3C	3D
	6%	4A	4B	4C	4D
Pessimista RSU _f = 0,65	100%	5A	5B	5C	5D
	60%	6A	6B	6C	6D
	20%	7A	7B	7C	7D
	6%	8A	8B	8C	8D

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.5 Mapeamento dos resultados

Para o tratamento dos dados obtidos para a geração de RSU e para o potencial de geração de biogás, foi utilizada uma ferramenta de Sistema de Informação Geográfica – SIG¹², por meio do software ArcGIS, no intuito de possibilitar a edição e análise dos dados para a produção de mapas com os resultados. O intuito é possibilitar uma representação computacional do espaço definido no escopo, contendo os parâmetros de geração de RSU e de biogás.

¹² Sistemas de Informações Geográficas - SIG são sistemas computacionais capazes de capturar, armazenar, consultar, manipular, analisar, exibir e imprimir dados referenciados espacialmente sobre/sob a superfície da Terra (RAPER & MAGUIRE, 1992).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Ressalte-se que um trabalho de projeção de longo prazo de matriz energética não pode ser entendido, de modo acrítico, como “previsão do futuro”. Ao contrário, trabalhos desta natureza projetam trajetórias de evolução possíveis para variáveis chaves a partir de fatores condicionantes e de expectativas acerca do futuro vigentes no presente (COPPE e UNIFEI, 2007, p. 6).

Desta forma, tomando como base os dados disponibilizados pelos censos demográficos de 1980, 1991, 2000 e 2010, bem como das contagens populacionais, todos realizados pelo IBGE, realizou-se a projeção das populações urbanas de cada um dos 853 municípios do Estado de Minas Gerais, por meio de progressão geométrica, conforme apresentado no capítulo 4 “Metodologia de Trabalho”. Assim, todos os municípios foram agrupados conforme seus respectivos Territórios de Desenvolvimento, sendo que os resultados detalhados podem ser consultados no Apêndice 1. De modo a facilitar a visualização e análise dos dados graficamente, os resultados foram divididos em três grupos: o primeiro (Figura 30) consta os territórios com populações urbanas acima de 5 milhões de habitantes em 2050; o segundo grupo (Figura 31) apresenta os resultados para os territórios com populações urbanas acima de 1 milhão e abaixo de 5 milhões de habitantes em 2050; e o grupo 3 (Figura 32) contém os resultados obtidos para os territórios cujas populações urbanas, no ano de 2050, não ultrapassarão a faixa de 1 milhão de habitantes, conforme as previsões deste trabalho.

Pelos gráficos, nota-se que as previsões apresentam um comportamento de crescimento populacional urbano muito semelhante entre todos os Territórios de Desenvolvimento. Para a maioria dos territórios do grupo 3, há uma queda na população pouco antes dos anos 2000, seguida de uma recuperação considerável a partir deste ano. O rápido incremento populacional a partir do ano 2000 ocorre em territórios dos três grupos e é explicado devido à criação de novos municípios entre o período intercensitário de 1991 a 2000. Assim, muitos municípios, cuja população e área pertenciam a determinada região, uma vez que estavam vinculados a outros municípios, a partir do censo de 2000 foram computados como independentes, passando a pertencer a outras regiões territoriais. Cabe destacar os altos índices populacionais no Território Metropolitano, onde está inserida a capital do Estado e

onde a maior parte dos municípios praticamente já não possui mais população rural.

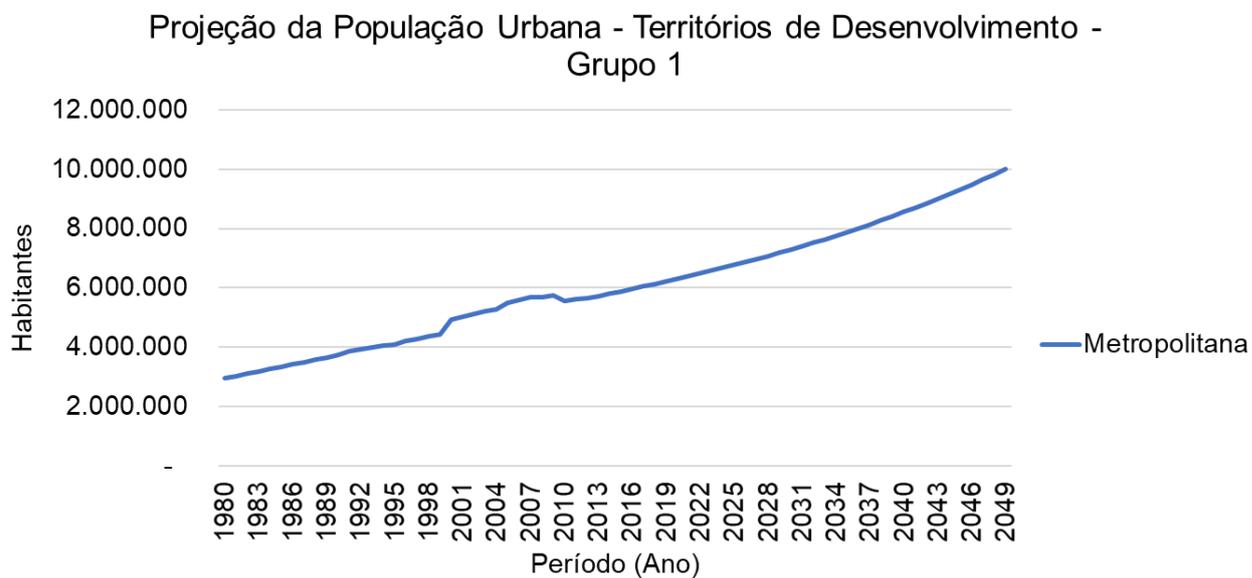


Figura 30. Projeção da população urbana dos Territórios de Desenvolvimento de Minas Gerais – de 1980 a 2050 – Grupo 1.
Fonte: Elaborado pelo autor.

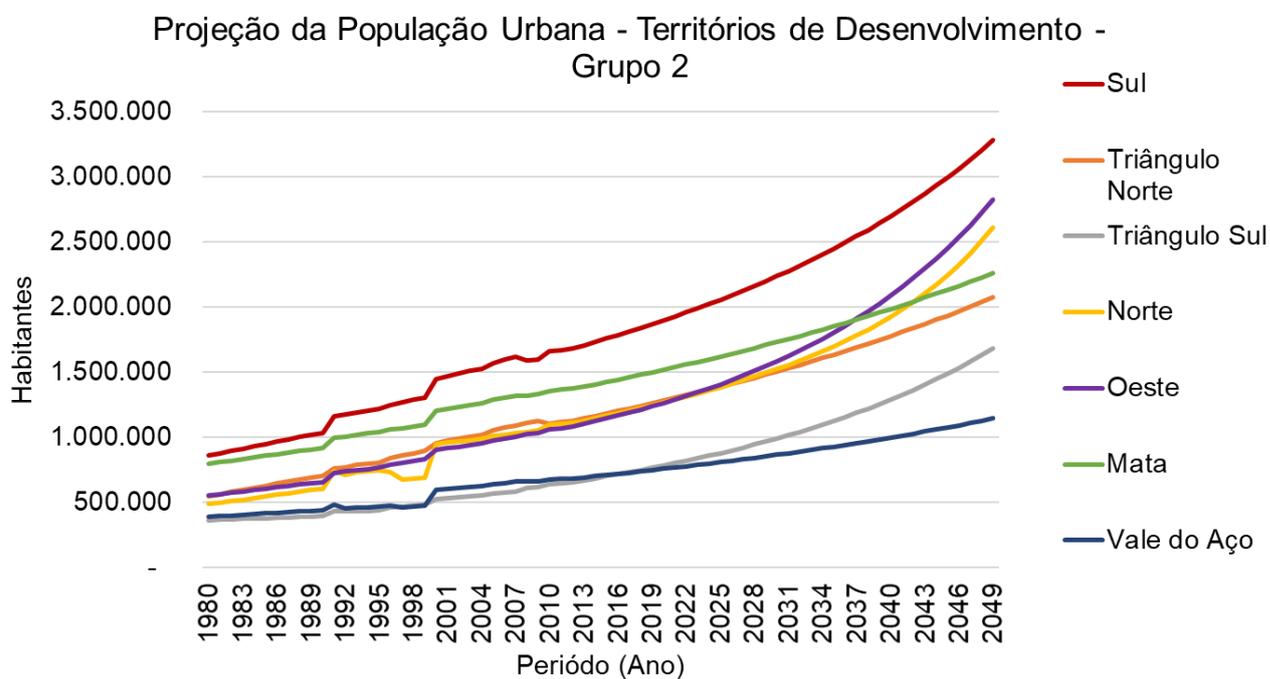


Figura 31. Projeção da população urbana dos Territórios de Desenvolvimento de Minas Gerais – de 1980 a 2050 – Grupo 2.
Fonte: Elaborado pelo autor.

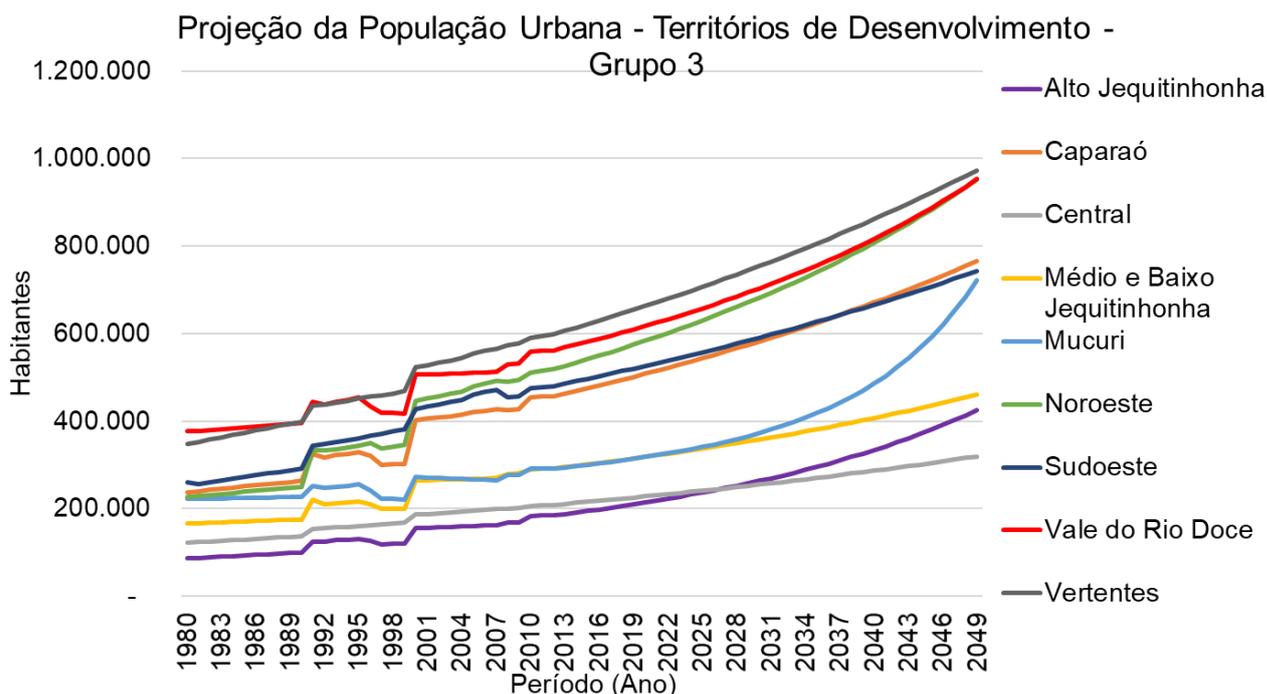


Figura 32. Projeção da população urbana dos Territórios de Desenvolvimento de Minas Gerais – de 1980 a 2050 – Grupo 3.
Fonte: Elaborado pelo autor.

De posse dos dados de projeção anual das populações dos municípios, foi calculada a geração total anual de resíduos sólidos urbanos, também por município, utilizando-se os valores de geração per capita apresentados pela Tabela 1, conforme extratos populacionais dos municípios brasileiros. Desta forma, à medida que os municípios se mobilizam entre os extratos propostos pela tabela, da mesma forma esta mobilidade acontece com as taxas per capita de geração diária de RSU. Assim, observa-se pelos gráficos das Figuras 33, 34 e 35, que há “saltos” em determinados anos, significando que um ou mais municípios daquele território mudaram de faixa populacional dentro dos extratos populacionais dos municípios brasileiros, influenciando, pois, no comportamento da curva de todo o Território de Desenvolvimento a que pertence. Da mesma forma que nos resultados das projeções populacionais, foi mantido o agrupamento dos territórios em três grupos.

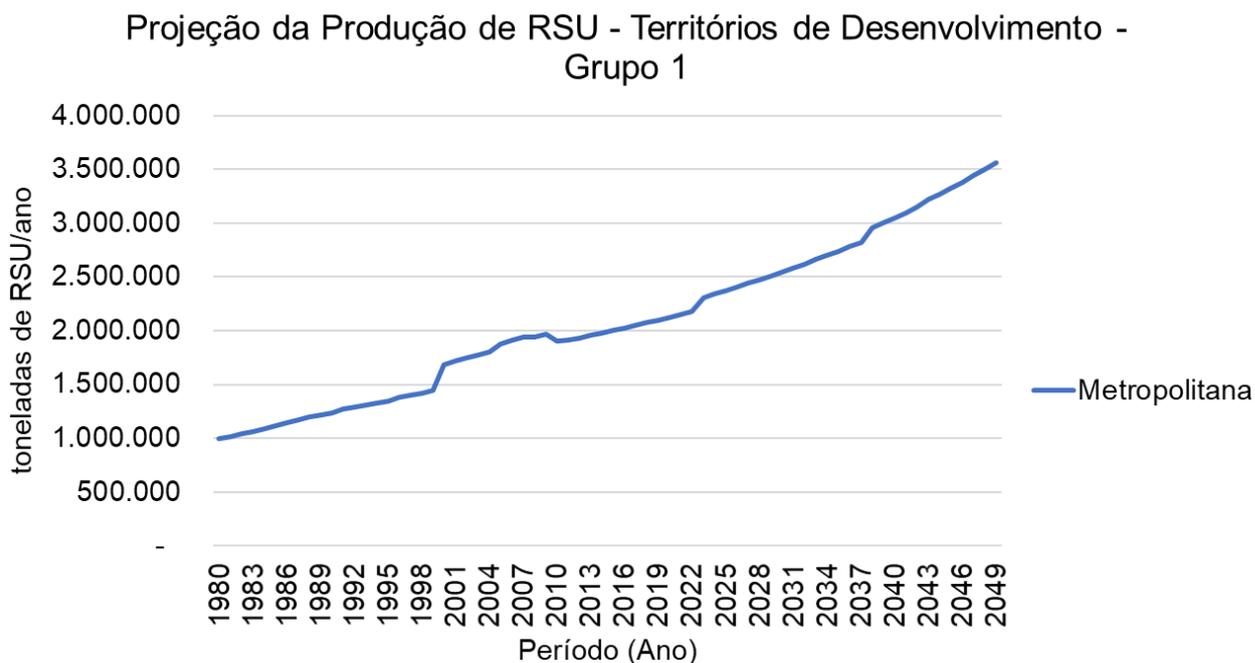


Figura 33. Projeção da produção de RSU total (t/ano) por Território de Desenvolvimento de Minas Gerais – Grupo 1.

Fonte: Elaborado pelo autor.

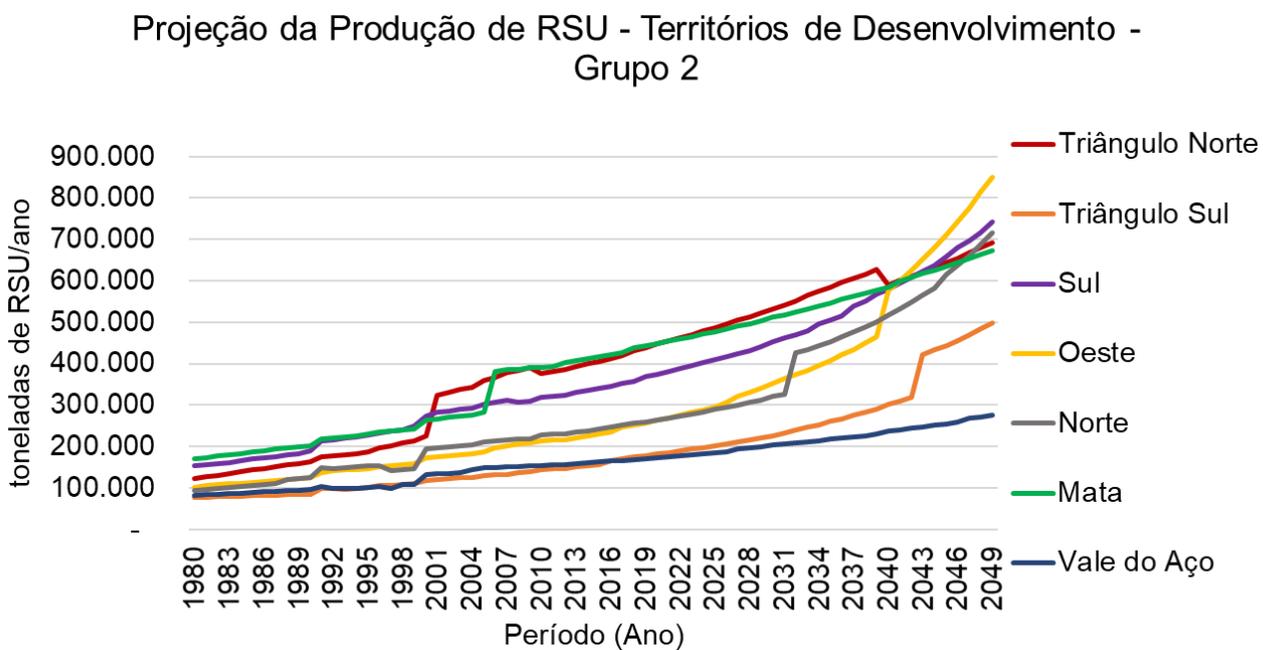


Figura 34. Projeção da produção de RSU total (t/ano) por Território de Desenvolvimento de Minas Gerais – Grupo 2.

Fonte: Elaborado pelo autor.

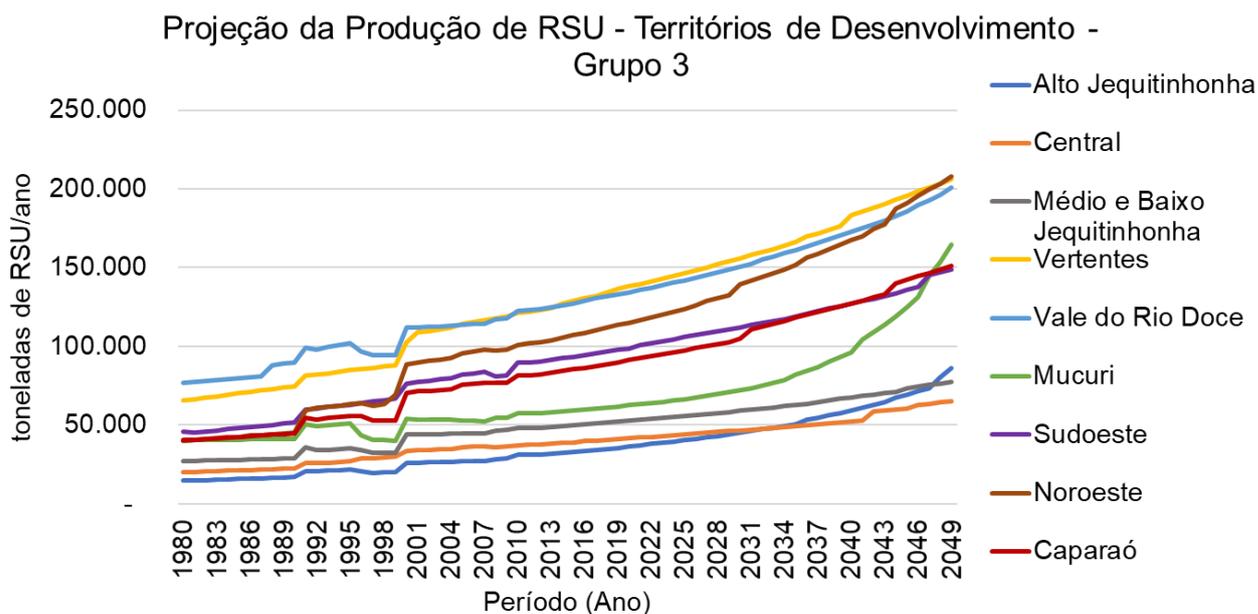


Figura 35. Projeção da produção de RSU total (t/ano) por Território de Desenvolvimento de Minas Gerais – Grupo 3.

Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com os gráficos, o território que apresentou maior potencial de geração de RSU no ano de horizonte deste trabalho (2050) foi o Metropolitano, com 3.562.979 t/ano; seguido pelo Território Oeste, com 851.289 t/ano; e o terceiro lugar é o Território Sul, com 741.533 t/ano. Já o território com menor potencial de geração de RSU, em 2050, foi o Território Central, com 65.072 t/ano, antecedido pelo Território do Médio e Baixo Jequitinhonha, com 77.306 t/ano. Todavia, de 2010 a 2050, o Território que teve maior taxa crescimento foi o do Oeste, com 300%; seguido pelo Triângulo Sul (245%) e Norte (215%). Já os que apresentaram menores taxas de crescimento no período foram o território do Médio e Baixo Jequitinhonha (60%), o Vale do Rio Doce (64%) e o Sudoeste (66%). A tabela com os dados completos pode ser consultada no Apêndice 2.

De forma geral, na Figura 36 é apresentado o potencial de geração anual de RSU de cada território e sua representatividade dentro do universo que corresponde ao Estado de Minas Gerais.

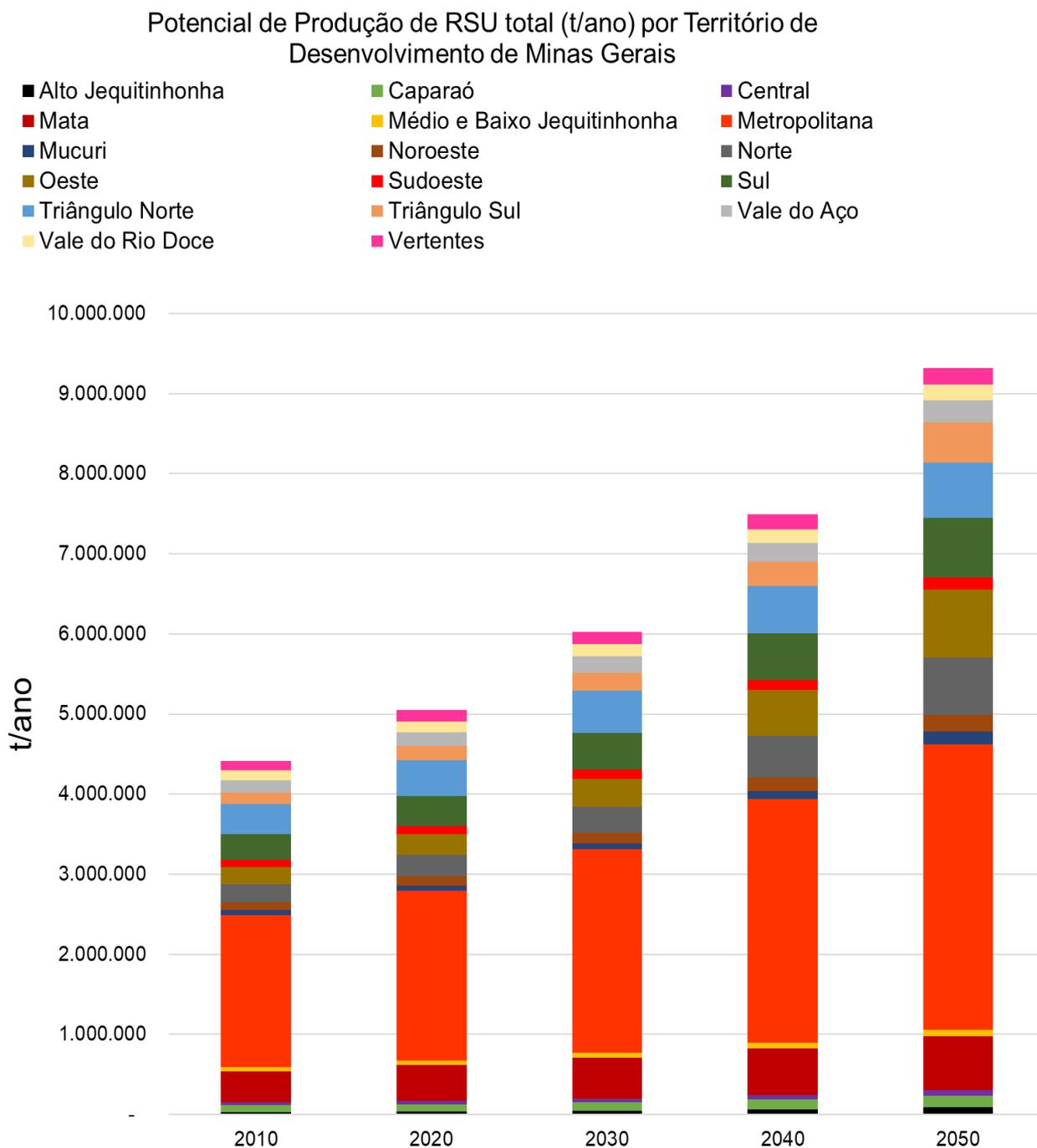


Figura 36. Projeção do potencial de produção de RSU total (t/ano) por Território de Desenvolvimento de Minas Gerais e sua correspondência no total estadual– de 2010 a 2050.

Fonte: Elaborado pelo autor.

O mapa da Figura 37 apresenta o potencial de geração de RSU por município mineiro, no ano de horizonte (2050), delimitados os Territórios de Desenvolvimento.

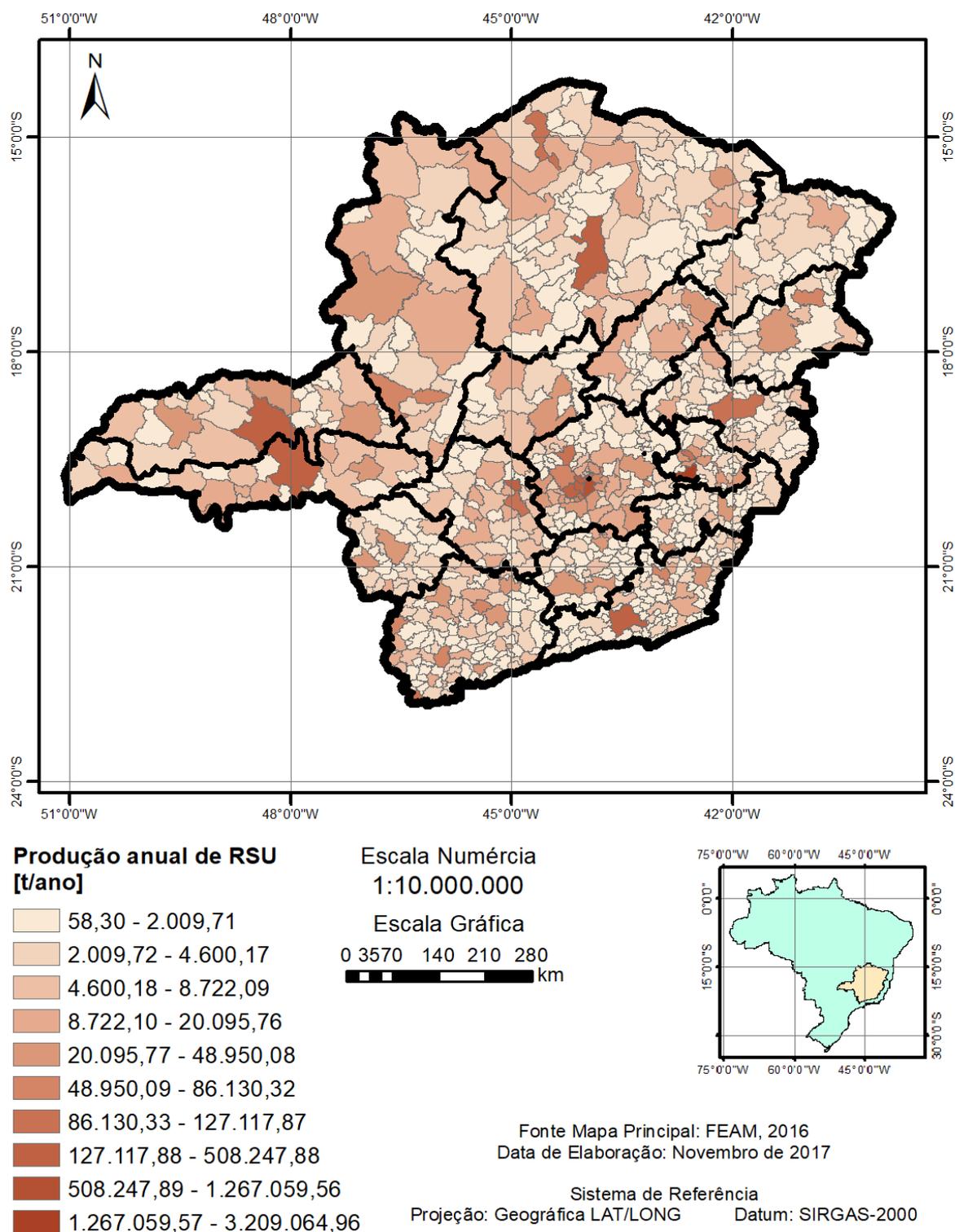


Figura 37. Mapa do potencial de geração de RSU em Minas Gerais no ano de 2050.
 Fonte: Elaborado pelo autor.

É possível observar que poucos municípios apresentam os maiores potenciais do Estado. Contudo, praticamente em todos os territórios há uma certa representatividade de todas as faixas apresentadas no mapa. Os municípios com

menores potenciais de geração de RSU são geralmente muito pequenos, com população inferior a 20.000 habitantes e, provavelmente, ainda com considerável parcela rural em sua composição.

Quanto à contabilização real dos resíduos produzidos nos municípios mineiros, tem-se que levar em conta pelo menos três fatores importantes: as diferenças de composição gravimétrica dos resíduos de municípios mais urbanizados com relação aos municípios com características mais rurais; a abrangência e eficiência dos serviços de coleta dos resíduos em cada município; e, por fim, a destinação final dos resíduos gerados em cada município. A eficiência dos sistemas de gestão e gerenciamento de resíduos depende, ainda, da criação de políticas públicas mais robustas e equilibradas para o setor. Todavia, para estudos de viabilidade técnica de sistemas de recuperação energética de RSU, bem como para previsão de atratividade econômica na cadeia de resíduos, é necessário criar hipóteses conforme o escopo do projeto. Cabe ressaltar que este trabalho não possui finalidade comercial, mas pretende apresentar o potencial teórico de geração de RSU e de seu aproveitamento energético nos Territórios de Desenvolvimento do Estado.

Desta forma, de posse de todos os dados, aplicando-se as Equações (7), (8), (9), e (10), apresentadas no capítulo 4 “Metodologia de Trabalho”, e associando os valores padrão sugeridos pelo IPCC (1996), obtiveram-se os resultados apresentados pelos gráficos das Figuras 38 e 40 e os mapas das Figuras 39 e 41. Os detalhamentos destes resultados podem ser consultados nos Apêndices 3 e 4. Na Tabela 10 são apresentados os parâmetros fixos para aplicação nas ditas equações para cálculo do potencial teórico de produção de biogás para este estudo.

Tabela 10. Parâmetros dados e calculados para a estimativa de produção de biogás.

Parâmetro	Valor	Unidade
MCF	1,00	%
DOC	0,179	kgC/kg _{RSU}
DOC _f	0,77	kgC/kg _{RSU}
F	0,50	Adimensional
σ	0,0007168	t/m ³
L ₀	128,19	m ³ _{CH₄} /kg _{RSU}
R	0,00	10 ³ kg _{CH₄} /ano
OX	0,00	adimensional

Fonte: Elaborado pelo autor.

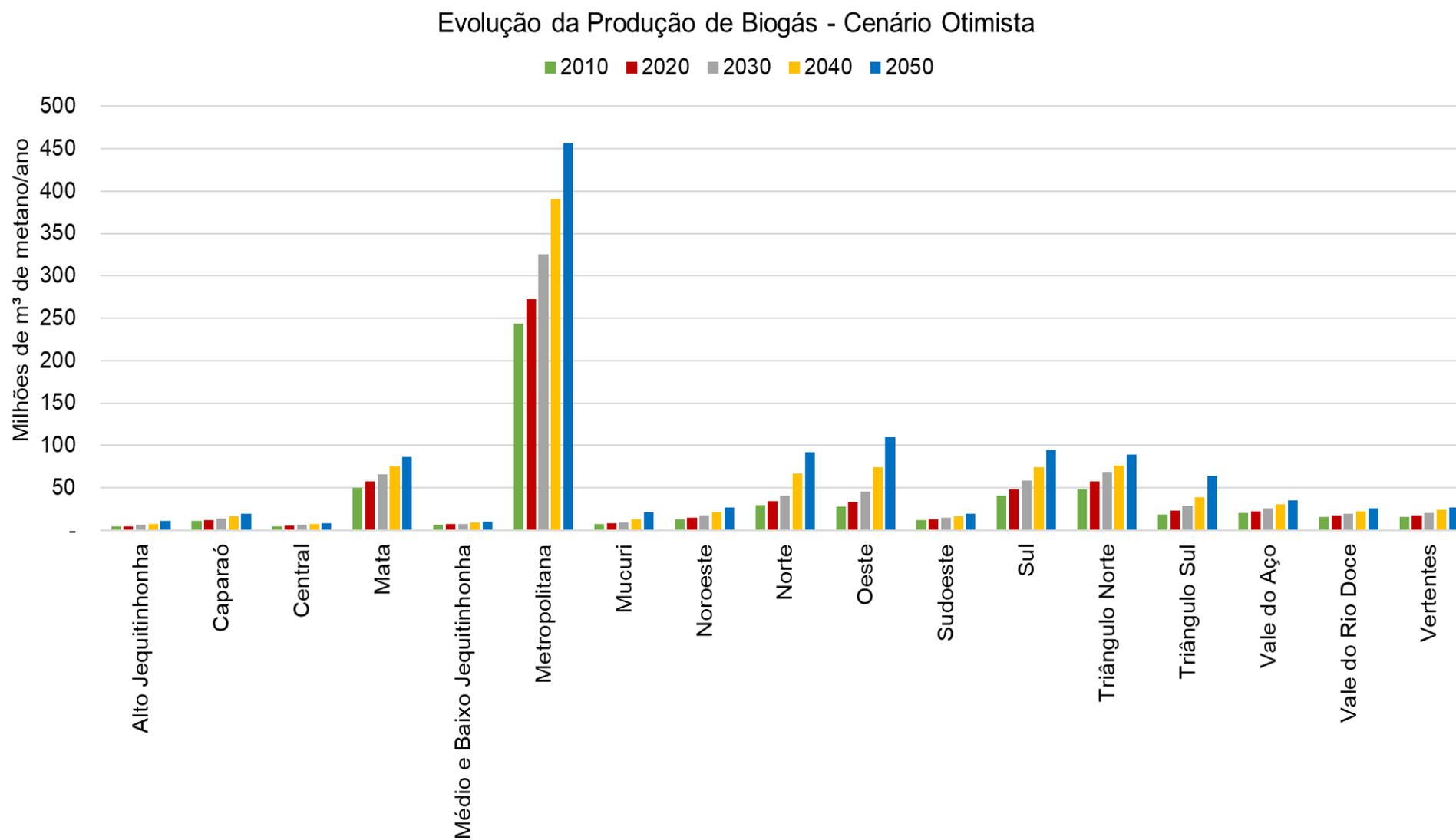


Figura 38. Evolução do potencial de produção de biogás considerando um Cenário Otimista – de 2010 a 2050.

Fonte: Elaborado pelo autor.

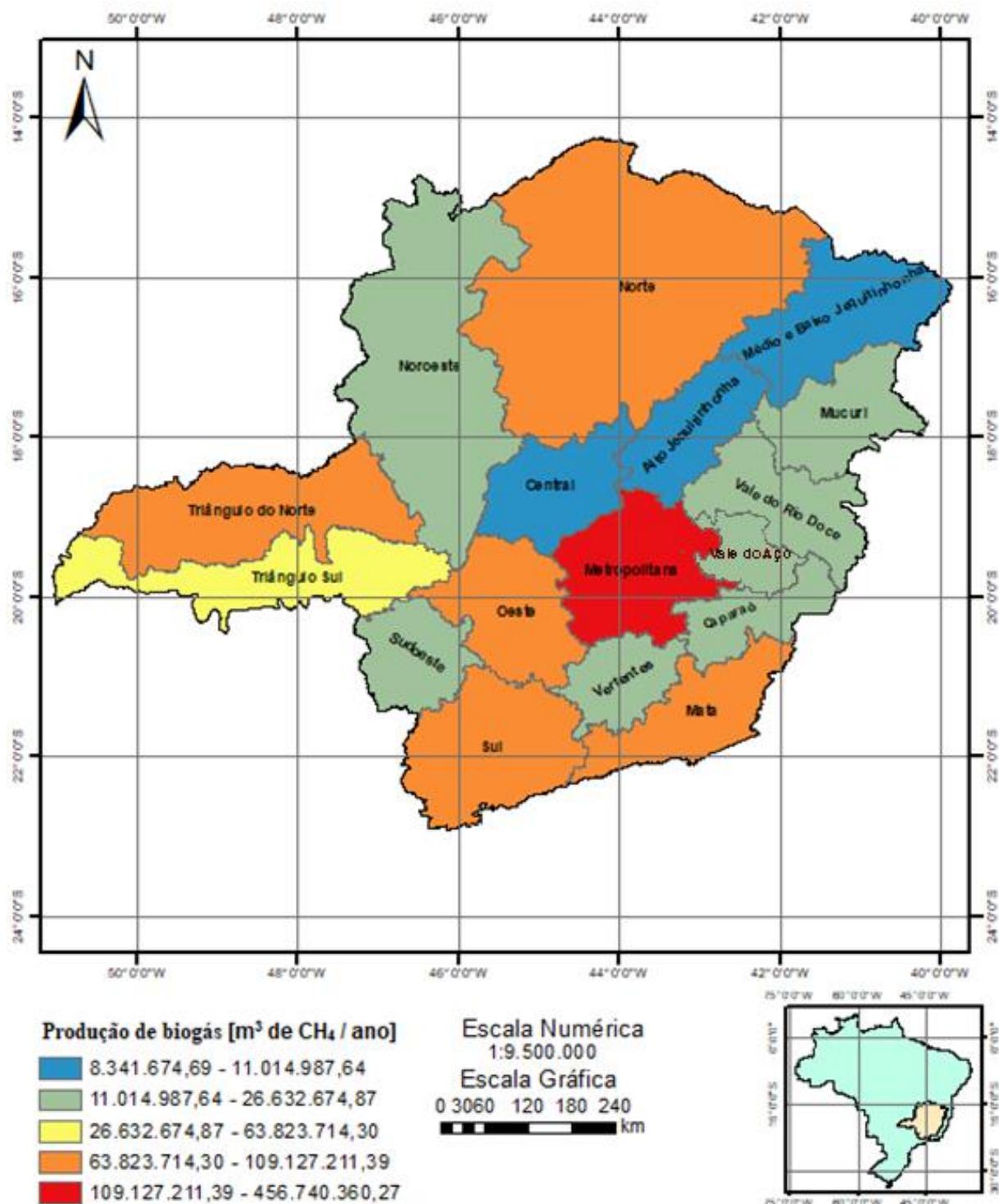


Figura 39. Mapa do potencial de geração de biogás em Minas Gerais – Cenário Otimista - 2050.
 Fonte: Elaborado pelo autor.

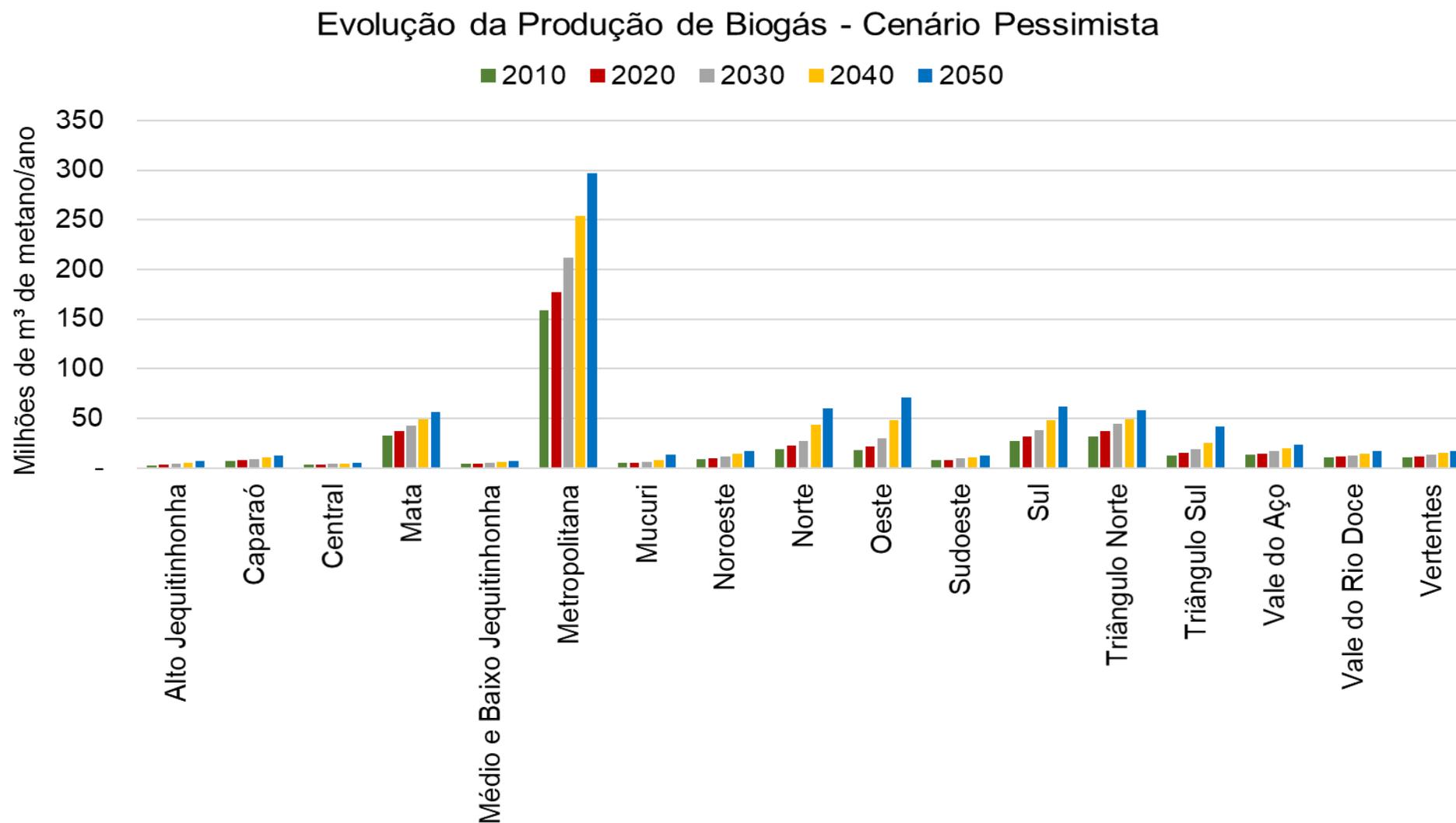
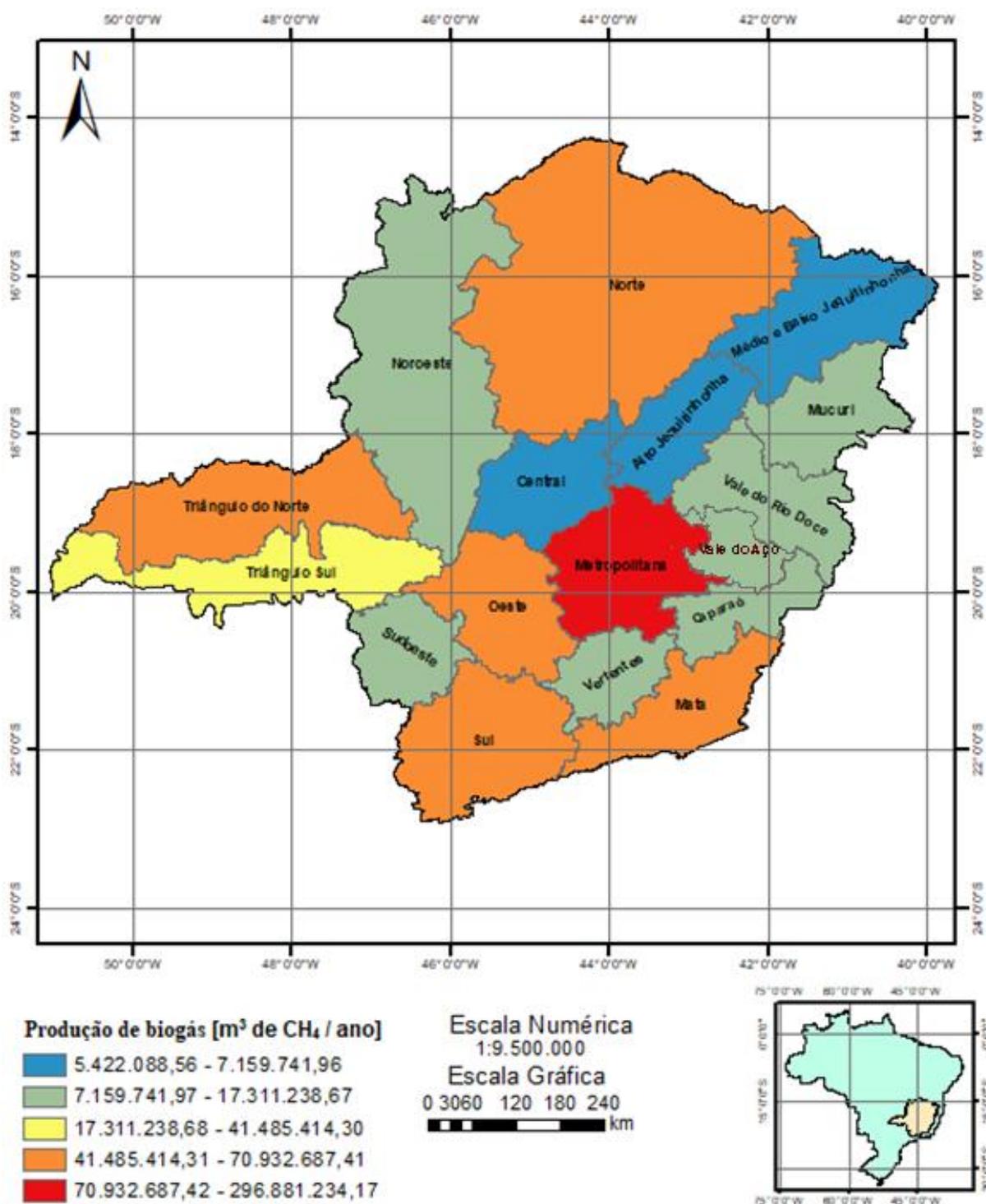


Figura 40. Evolução do potencial de produção de biogás considerando um Cenário Pessimista– de 2010 a 2050.

Fonte: Elaborado pelo autor.



Fonte: Mapa Principal: FEAM, 2016 Data de elaboração: novembro de 2017

Sistema de Referência

Projeção: Geográfica LAT/LONG Datum: SIRGAS-2000

Figura 41. Mapa do potencial de geração de biogás em Minas Gerais – Cenário Pessimista - 2050.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os mapas das Figuras 39 e 41 revelam que o Território com maior potencial de geração de biogás é o Metropolitano, ao passo que os Territórios com menor potencial de geração de biogás são o Médio e Baixo Jequitinhonha, o Alto Jequitinhonha e o Central. Tais resultados estão diretamente relacionados com a questão populacional, uma vez que, pelo método proposto, a faixa populacional define a taxa de produção de RSU, usada, por sua vez, no cálculo de estimativa do potencial de geração de biogás de aterro sanitário.

Observa-se que há semelhanças quanto ao comportamento das curvas de projeção das populações urbanas e das produções de RSU. Contudo, não são exatamente iguais, ao menos não em todo o período. Se as projeções de produção de RSU fossem feitas tendo-se como base as projeções territoriais de população urbana, ter-se-ia que considerar uma única taxa média de produção per capita dia de RSU. Desta forma, o comportamento das curvas em ambos os gráficos seria o mesmo, salvo as grandezas distintas entre si. Contudo, no intuito de aproximar os resultados da realidade, consideraram-se as taxas conforme os extratos populacionais dos municípios brasileiros. Para ser mais exato, o ideal seria ter disponíveis os dados específicos de cada município, o que não foi possível obter, uma vez que mais de 75% dos municípios mineiros não têm, ou não disponibilizaram estas informações.

Com os dados do potencial de produção de biogás para cada um dos Territórios de Desenvolvimento e a aplicação das Equações (11) e (12), obteve-se o potencial de geração de energia elétrica correspondente a cada território. Os resultados detalhados podem ser consultados nas Tabelas 12 e 13. Relembrando que os cenários foram definidos na Tabela 9. Na Tabela 11 são apresentados os parâmetros fixos para os cálculos deste potencial de produção de energia elétrica.

Tabela 11. Parâmetros dados e calculados para a estimativa de geração de eletricidade.

Parâmetro	Valor	Unidade
γ_{CH_4}	1,3372	kg/m ³
PCI _{CH₄}	3.281,92	kcal/kg
PCI _D	5,1078	kWh/m ³

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 12. Cenários de potencial de geração de eletricidade a partir da conversão energética de biogás – ano de 2050 - Melhores resultados.

Potencial de geração de energia elétrica (MWh/dia) - ano de 2050								
Cenário/ Perspectiva 2050	Total Estadual	Metropolitana	Oeste	Sul	Norte	Triângulo Norte	Mata	Triângulo Sul
1A	5.683,93	2.173,15	519,22	452,28	437,08	422,12	410,70	303,67
1B	5.851,11	2.237,06	534,49	465,58	449,94	434,54	422,78	312,60
1C	5.015,24	1.917,48	458,14	399,07	385,66	372,46	362,39	267,94
1D	4.680,89	1.789,65	427,59	372,47	359,95	347,63	338,23	250,08
2A	3.410,36	1.303,89	311,53	271,37	262,25	253,27	246,42	182,20
2B	3.510,67	1.342,24	320,70	279,35	269,96	260,72	253,67	187,56
2C	3.009,14	1.150,49	274,88	239,44	231,40	223,48	217,43	160,77
2D	2.808,53	1.073,79	256,56	223,48	215,97	208,58	202,94	150,05
3A	1.136,79	434,63	103,84	90,46	87,42	84,42	82,14	60,73
3B	1.170,22	447,41	106,90	93,12	89,99	86,91	84,56	62,52
3C	1.003,05	383,50	91,63	79,81	77,13	74,49	72,48	53,59
3D	936,18	357,93	85,52	74,49	71,99	69,53	67,65	50,02
4A	397,88	152,12	36,35	31,66	30,60	29,55	28,75	21,26
4B	409,58	156,59	37,41	32,59	31,50	30,42	29,59	21,88
4C	351,07	134,22	32,07	27,93	27,00	26,07	25,37	18,76
4D	327,66	125,28	29,93	26,07	25,20	24,33	23,68	17,51
5A	3.694,56	1.412,55	337,49	293,98	284,10	274,38	266,96	197,39
5B	3.803,22	1.454,09	347,42	302,63	292,46	282,45	274,81	203,19
5C	3.259,90	1.246,36	297,79	259,40	250,68	242,10	235,55	174,16
5D	3.042,58	1.163,27	277,94	242,10	233,97	225,96	219,85	162,55
6A	2.216,73	847,53	202,50	176,39	170,46	164,63	160,17	118,43
6B	2.281,93	872,46	208,45	181,58	175,47	169,47	164,89	121,91
6C	1.955,94	747,82	178,67	155,64	150,41	145,26	141,33	104,50

6D	1.825,55	697,96	166,76	145,26	140,38	135,58	131,91	97,53
7A	738,91	282,51	67,50	58,80	56,82	54,88	53,39	39,48
7B	760,64	290,82	69,48	60,53	58,49	56,49	54,96	40,64
7C	651,98	249,27	59,56	51,88	50,14	48,42	47,11	34,83
7D	608,52	232,65	55,59	48,42	46,79	45,19	43,97	32,51
8A	258,62	98,88	23,62	20,58	19,89	19,21	18,69	13,82
8B	266,23	101,79	24,32	21,18	20,47	19,77	19,24	14,22
8C	228,19	87,25	20,85	18,16	17,55	16,95	16,49	12,19
8D	212,98	81,43	19,46	16,95	16,38	15,82	15,39	11,38

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 13. Cenários de potencial de geração de eletricidade à partir da conversão energética de biogás – ano de 2050 - Piores resultados.

Cenário/ Perspectiva 2050	Potencial de geração de energia elétrica (MWh/dia) - ano de 2050									
	Alto Jequitinhonha	Caparaó	Central	Médio e Baixo Jequitinhonha	Mucuri	Noroeste	Sudoeste	Vale do Aço	Vale do Rio Doce	Vertentes
1A	52,41	92,10	39,69	47,15	100,48	126,72	90,66	168,30	122,49	125,71
1B	53,95	94,81	40,86	48,54	103,44	130,44	93,33	173,25	126,10	129,40
1C	46,24	81,26	35,02	41,60	88,66	111,81	80,00	148,50	108,08	110,92
1D	43,16	75,85	32,69	38,83	82,75	104,36	74,66	138,60	100,88	103,52
2A	31,45	55,26	23,81	28,29	60,29	76,03	54,40	100,98	73,50	75,42
2B	32,37	56,88	24,51	29,12	62,06	78,27	56,00	103,95	75,66	77,64
2C	27,75	48,76	21,01	24,96	53,20	67,09	48,00	89,10	64,85	66,55
2D	25,90	45,51	19,61	23,30	49,65	62,61	44,80	83,16	60,53	62,11
3A	10,48	18,42	7,94	9,43	20,10	25,34	18,13	33,66	24,50	25,14
3B	10,79	18,96	8,17	9,71	20,69	26,09	18,67	34,65	25,22	25,88
3C	9,25	16,25	7,00	8,32	17,73	22,36	16,00	29,70	21,62	22,18
3D	8,63	15,17	6,54	7,77	16,55	20,87	14,93	27,72	20,18	20,70

4A	3,67	6,45	2,78	3,30	7,03	8,87	6,35	11,78	8,57	8,80
4B	3,78	6,64	2,86	3,40	7,24	9,13	6,53	12,13	8,83	9,06
4C	3,24	5,69	2,45	2,91	6,21	7,83	5,60	10,39	7,57	7,76
4D	3,02	5,31	2,29	2,72	5,79	7,30	5,23	9,70	7,06	7,25
5A	34,07	59,86	25,80	30,65	65,31	82,37	58,93	109,39	79,62	81,71
5B	35,07	61,63	26,56	31,55	67,23	84,79	60,66	112,61	81,96	84,11
5C	30,06	52,82	22,76	27,04	57,63	72,68	52,00	96,52	70,25	72,10
5D	28,05	49,30	21,25	25,24	53,79	67,83	48,53	90,09	65,57	67,29
6A	20,44	35,92	15,48	18,39	39,19	49,42	35,36	65,64	47,77	49,03
6B	21,04	36,98	15,93	18,93	40,34	50,87	36,40	67,57	49,18	50,47
6C	18,03	31,69	13,66	16,23	34,58	43,61	31,20	57,91	42,15	43,26
6D	16,83	29,58	12,75	15,14	32,27	40,70	29,12	54,05	39,34	40,37
7A	6,81	11,97	5,16	6,13	13,06	16,47	11,79	21,88	15,92	16,34
7B	7,01	12,33	5,31	6,31	13,45	16,96	12,13	22,52	16,39	16,82
7C	6,01	10,56	4,55	5,41	11,53	14,54	10,40	19,30	14,05	14,42
7D	5,61	9,86	4,25	5,05	10,76	13,57	9,71	18,02	13,11	13,46
8A	2,38	4,19	1,81	2,15	4,57	5,77	4,13	7,66	5,57	5,72
8B	2,45	4,31	1,86	2,21	4,71	5,94	4,25	7,88	5,74	5,89
8C	2,10	3,70	1,59	1,89	4,03	5,09	3,64	6,76	4,92	5,05
8D	1,96	3,45	1,49	1,77	3,77	4,75	3,40	6,31	4,59	4,71

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quanto ao potencial de geração de eletricidade pelo aproveitamento do biogás gerado em aterros, de acordo com os resultados apresentados nas Tabelas 12 e 13, o melhor cenário é aquele em que a totalidade do biogás gerado seria usada para geração de energia elétrica, sendo a melhor tecnologia de conversão o motor de Ciclo Diesel, levando-se em consideração apenas a eficiência de conversão. Contudo, pensando-se nos menores custos de implantação, a melhor opção atualmente seria o motor de Ciclo Otto, visto que precisa de poucas adaptações para o uso com o biogás e também tem ampla utilização no mercado.

Assim os resultados apontam os três melhores potenciais de geração de eletricidade como sendo o cenário 1B no Metropolitano (2.237,06 MWh/dia), o 1A no Metropolitano (2.173,15 MWh/dia) e o 1C no Metropolitano (1.917,48 MWh/dia). Já os três piores potenciais de geração de eletricidade foram 8D no Central (1,49 MWh/dia), 8C no Central (1,59 MWh/dia) e 8D no Médio e Baixo Jequitinhonha (1,77 MWh/dia). Todavia, como é possível observar, mesmo os piores resultados apresentam viabilidade técnica para aproveitamento do biogás para geração de eletricidade no Estado de Minas Gerais, podendo contribuir para o desenvolvimento regional de todos os municípios que compõem os Territórios de Desenvolvimento. Este potencial pode servir tanto para o auxílio nas tomadas de decisões quanto a políticas públicas ambientais e energéticas, quanto para atrair e estimular o setor privado para as oportunidades de desenvolvimento de cada território.

Comparativamente, dados fornecidos pela EPE (2017b), informam que em outubro de 2017 o consumo residencial de energia elétrica na região Sudeste do Brasil foi de 5.315.363 MWh/mês, sendo o número de consumidores (residências) igual a 31.887.052 residências. Assim, feita a razão entre estes dados, obtém-se que o consumo médio mensal na região Sudeste foi de 166,69 kWh/mês. Considerando o pior caso dentre os resultados dos cenários propostos neste trabalho, tem-se um potencial de geração de energia elétrica de cerca de 44,7 MWh/mês (8D no Central). Desta forma, com o aproveitamento do biogás neste cenário, seria possível atender até 268 residências. Considerando uma média de 3,2 moradores por domicílio, conforme dados do Censo Demográfico 2010 para o Estado de Minas Gerais, seria possível atender cerca de 857 pessoas. Ou seja, seria possível atender a toda a demanda residencial do município de Serra da Saudade (815 habitantes no total), ou ainda toda a população urbana dos municípios de Frei Lagonegro (618 habitantes na

zona urbana), Senador José Bento (683 habitantes na zona urbana) ou Queluzito (847 habitantes na zona urbana). Já para o melhor cenário de 2.173,15 MWh/dia (1A Metropolitana), seria possível atender a cerca de 391,112 residências, o que corresponde a 1.251.559 habitantes, ou seja, cerca de 52% da população total de Belo Horizonte, ou 100% de qualquer um dos demais municípios mineiros.

Segundo previsões da EPE (2014a, p. 118), espera-se que, em 2050, o consumo médio mensal de eletricidade por domicílio será de cerca de 198 kWh/mês. Ou seja, no melhor cenário, seria possível abastecer mensalmente cerca de 329.265 domicílios; ao passo que, no pior cenário, a quantidade de residências atendidas poderia ser de 6.772.

Reforça-se aqui a necessidade de instalação de filtros e outros sistemas de purificação do biogás logo após sua coleta, como forma de tratamento, de modo a aumentar o rendimento energético e até mesmo a vida útil dos sistemas de conversão do metano em eletricidade. Dentre os principais benefícios destes sistemas purificadores destacam-se três: a remoção do CO₂, que, por se tratar de um gás inerte, reduz o poder calorífico do biogás; a remoção da umidade, que absorve parte da energia gerada em casos de combustão; e a remoção do H₂S, que pode causar corrosão nos equipamentos.

Por fim, cabe uma reflexão sobre os custos de implantação e operação de sistemas de aproveitamento de biogás. Não se constituiu escopo deste trabalho a realização de uma análise de viabilidade econômica para estes sistemas, mas, para o caso de propostas de projetos para os Territórios de Desenvolvimento do Estado de Minas Gerais, o fator custo será crucial. É sabido que muitos municípios não têm verba nem mesmo para a realização da coleta e da destinação final adequada dos resíduos, quanto menos para investir em sistemas de aproveitamento e recuperação energética do biogás. Custos como o transporte e a logística são fator importante para as tomadas de decisão. Algumas soluções possíveis para facilitar a implantação deste tipo de sistemas nos Territórios seria a criação de consórcios entre os municípios próximos, o que deve ser bem avaliado frente aos diversos impactos ambientais do ciclo de vida dos resíduos.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

O biogás proveniente de aterros sanitários vem se tornando uma potencial fonte de energia renovável. Além da produção de energia elétrica para suprir as demandas locais, com a geração distribuída, contribui ainda para a diminuição de danos ambientais da disposição final de resíduos e para a redução de emissões de gases de efeito estufa.

Observou-se que há fortes tendências de aumento na geração de RSU no Estado de Minas Gerais, seguindo o ritmo do Brasil e de outros países em desenvolvimento no mundo, principalmente devido ao incremento populacional e às altas taxas de urbanização vivenciadas no Estado. Tudo isso aliado ao aumento do poder de compra da população e às novas exigências de demanda energética da sociedade contemporânea constitui um campo fértil às “novas” energias, incluindo o biogás. Dentre os Territórios de Desenvolvimento de Minas Gerais, no horizonte de 2050, aquele que apresentou maior potencial de geração de RSU foi o Metropolitano, com 3.562.979 t/ano, de um total de 9.319.081 t/ano para todo o Estado. Tal potencial pode ser usado para geração de energia elétrica a partir do aproveitamento e recuperação energética do biogás produzido na decomposição anaeróbia destes RSU, uma vez que estes sejam depositados em aterros sanitários.

Nota-se que há um esforço cada vez maior dos governos em sanar os problemas de infraestrutura social que têm se ampliado nas últimas décadas. Políticas ambientais e energéticas como a Política Nacional de Saneamento Básico – PNSB, o RenovaBio, o ProInfra, o Programa Minas Sem Lixão e a Calculadora Brasil 2050 estão alinhados às demandas apresentadas e discutidas mundialmente, como na COP-21, mas também em âmbito municipal e regional. Exemplo disso é a nova divisão territorial do Estado de Minas Gerais, criada com o intuito de facilitar o trabalho dos agentes sociais, intercambiar soluções e alavancar as potencialidades de cada região.

Contudo, percebe-se que há certa morosidade na efetivação dos processos de regulação e melhoria dos problemas estruturais relacionados à questão dos RSU e também às fontes alternativas de energia. Foram apresentados exemplos, como o caso da Alemanha que, embora atualmente seja líder no tratamento de resíduos, principalmente com relação à recuperação energética dos mesmos, ainda sim passou

por lentidão em seus processos, mas foi resiliente e paciente até chegar ao ponto em que se encontra hoje, servindo de inspiração ao Brasil como um todo.

Neste sentido, observa-se que o estado da arte do tratamento de resíduos no Brasil, associado à recuperação e aproveitamento energético desta fonte renovável de energia, ainda está bastante atrasado com relação à maioria dos países desenvolvidos, uma vez que, no caso de Minas Gerais, ainda existem lixões e quase não há mecanismos de incentivo à reciclagem e compostagem, sem falar no desperdício de biogás que é simplesmente queimado em *flares* na maioria dos aterros existentes.

Neste trabalho, apresentou-se o potencial teórico regional de produção de biogás de aterro e seu possível aproveitamento para a geração de eletricidade em cada um dos dezessete Territórios de Desenvolvimento do Estado de Minas Gerais, onde o melhor cenário 1B no Metropolitano (2.237,06 MWh/dia), sendo que este cenário corresponde ao Otimista tendo como tecnologia de conversão energética o motor Ciclo Diesel. O melhor resultado para o Estado corresponde a uma potência “instalada” de 5.851,11 MWh/dia para o ano de 2050, no cenário 1B (otimista com motor Ciclo Diesel). A literatura correlata já havia apresentado outros estudos referentes ao estado de Minas Gerais, mas nenhum ainda focado nas potencialidades de desenvolvimento dos territórios mineiros. Assim, intenta-se contribuir ao setor público e privado no sentido de apresentar um vislumbre teórico das potencialidades e benesses correspondentes à recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos destinados a aterros sanitários em Minas Gerais. A proposta está em consonância com o Programa Minas Sem Lixões, do Estado, bem como com o RenovaBio, da União, além de embasar-se nas expectativas dos órgãos públicos competentes, como a FEAM, a ANEEL, o IBGE e a EPE.

Para maior refinamento dos dados seria necessário o acesso a informações quantitativas e qualitativas com relação aos RSUs referentes a cada um dos municípios mineiros, de modo a aumentar a exatidão dos resultados apresentados. De um modo geral, conforme a metodologia do IPCC e outras amplamente utilizadas em outros países, os resultados atendem ao objetivo do trabalho, uma vez que a estimativa é teórica, sendo que um estudo mais detalhado deve ser realizado para cada caso específico de instalação de empreendimentos de recuperação energética de RSU. Todavia, os resultados apresentados são satisfatórios e demonstram a

viabilidade técnica de exploração do biogás de aterro sanitário para geração de energia elétrica nos Territórios de Desenvolvimento de Minas Gerais.

É importante ressaltar que para este trabalho não se especulou a probabilidade de mudanças no padrão de tratamento de destinação final dos RSU em Minas Gerais, tampouco na implementação de políticas públicas municipais de maior controle quanto ao gerenciamento adequado dos resíduos. Uma proposta de trabalho futuro é exatamente analisar o potencial de geração de biogás tendo-se em consideração a criação de políticas públicas de incentivo à redução, reuso e reciclagem dos resíduos produzidos no Estado.

Por fim, ressalta-se que o biogás pode ser recuperado de diversas fontes, principalmente residuais. Sendo Minas Gerais um Estado cuja agricultura e pecuária têm grande importância e representatividade, a possibilidade de se estabelecerem sistemas de recuperação energética dos resíduos constitui-se como um grande desafio. Como proposta de trabalhos futuros fica a possibilidade do levantamento do potencial de geração de biogás em suas demais fontes disponíveis no Estado de Minas Gerais, de modo a mapear toda a potencialidade de aproveitamento deste energético, no intuito de contribuir cada vez mais para a diversificação da matriz elétrica e energética do Estado, bem como mitigar os diversos impactos ambientais causados pelo gerenciamento inadequado dos resíduos.

A efetividade de implantação de projetos de aproveitamento e recuperação energética de biogás de aterros sanitários depende não apenas da viabilidade técnica, mas também da viabilidade econômica e de fatores ambientais. O escopo deste trabalho, porém, ateu-se apenas ao primeiro item, apresentando o potencial teórico de produção de biogás em Minas Gerais, bem como suas possíveis rotas tecnológicas de conversão energética para geração de eletricidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos - NBR 10.004. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

_____. Compostagem - NBR 13.591. Rio de Janeiro: ABNT, 1996.

_____. Resíduos Sólidos - Classificação - NBR 8.419. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

AGÊNCIA MINAS GERAIS. Fóruns Regionais. Mapa Fóruns Regionais - Territórios de Desenvolvimento e Microterritórios de Minas Gerais. Disponível em <http://www.agenciaminas.mg.gov.br/ckeditor_assets/attachments/1277/mapa_forum_s_regionais.pdf>. Acesso em 30 de outubro de 2017.

ALEM SOBRINHO, P.; TSUTIYA, M. T. Coleta e transporte de esgoto sanitário. São Paulo: Winner Graph, 1999. 547 p.

ALMEIDA, R. C. Levantamento histórico e ocupação urbana da unidade de estudo. In: SCHIEL, D. *et al.* (Org.). O estudo de bacias hidrográficas. Uma estratégia para educação ambiental. São Carlos: Rima, 2002. p. 37-42.

ALMEIDA, L. M. A.; RIGOLIN, T. B. Geografia. São Paulo: Ática, 2002. 448 p.

AL-SALEM, S.M.; LETTIERI, P.; BAEYENS, J. Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): a review. *Waste Manage*, nº 29, 2009. p. 2625–2643.

ALVAREZ, R.; GUNNAR, L. Semi-continuous co-digestion of solid slaughterhouse waste, manure, and fruit and vegetable waste. *Renewable Energy*, v.33, 2008. p.726-734.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Banco de informações de geração. Disponível em <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>>. Acesso em 03 de novembro de 2017.

_____. Nota Técnica nº 0056/2017-SRD/ANEEL. Brasília: ANEEL, 2017. 26 p.

_____. Atlas de energia elétrica do Brasil. Brasília: ANEEL, 2008. 236 p.

ANP – AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Resolução Normativa nº 8, de 30 de janeiro de 2015 - Estabelece a especificação do Biometano contida no Regulamento Técnico ANP nº 1/2015, parte integrante desta Resolução. Brasília: Diário Oficial, 2015.

ARAÚJO, M. B.; NORA, G. D. Resíduos sólidos residenciais do bairro CPA III Setor V: Uma análise preliminar. Anais do VII Congresso Brasileiro de Geógrafos. Vitória: AGB, 2014. p. 1-13.

ARCGIS: Software. Disponível em <<http://www.esri.com/software/arcgis/index.html>>. Acessado em 10 de agosto de 2017.

ARENA, U. Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review. Waste Management, nº 32. Elsevier, 2012. p. 625–639.

BANKS, C. J.; CHESSHIRE, M.; HEAVEN, S.; ARNOLD, R. Anaerobic digestion of source-segregated domestic food waste: performance assessment by mass and energy balance. Bioresource technology, v. 102, n. 2, 2011. 612 p.

BARBIERI, A. F.; BILSBORROW, R. E. Dinâmica populacional, uso da terra e geração de renda: uma análise longitudinal para domicílios rurais na Amazônia equatoriana. Nova Economia. Vol. 19. Belo Horizonte: UFMG, 2011. p. 67-94.

BARBOSA FILHO, W. P.; FERREIRA, W. R.; SILVA, L. M. L. Discussão sobre geração distribuída dentro do contexto de planejamento urbano. In: II Encontro Nacional de Tecnologia Urbana. Passo Fundo: ENURB, 2015. 10 p.

BARRERA, P. Biodigestores: energia, fertilidade e saneamento para a zona rural. 2. ed. São Paulo: Ícone, 2003. 106 p.

BAHR, T.; FRICKE, K.; HILLEBRECHT, K.; KOLSH, F.; REINHARD, B. Clean Development Mechanism – Tratamento de resíduos sólidos e oxidação de gás metano para minimização de emissões. 2006. 13 p.

BAUMAN, Z. Vida para o consumo: a transformação das pessoas em mercadoria. São Paulo, Editora Zahar, 2008. 199 p.

BILOTTA, P.; ROSS, B. Z. L. Estimativa de geração de energia e emissão evitada de gás de efeito estufa na recuperação de biogás produzido em estação de tratamento de esgotos. In: Engenharia Sanitária e Ambiental, vol. 21, nº 2. Rio de Janeiro, 2016. p. 275-282.

BINGEMER, H. G.; CRUTZEN, P. J. The production of methane from solid wastes. In: Journal of geophysical research, vol. 92, nº D2. 1987. p. 2181-2187.

BLEY JR., C. Biogás: a energia invisível. 2ª ed., São Paulo: CIBiogas, 2015. 230 p.

BORBA, S. M. P. Análise de modelos de geração de gases em aterros sanitários: estudo de caso. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação de engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2006. 134 p.

BORGES, A.S.; MARQUES, C.S.; BRITO, L.P.G.; SILVA, V.R.L.; JANNUZZI, P.M. Projeções populacionais no Brasil: subsídios para o seu aprimoramento. Anais do XV Encontro Nacional de Estudos Populacionais. São Paulo: ABEP, 2006. 26 p.

BRAGA, B.; HESPANHOL, I.; CONEJO, J. G. L.; MIERZWA, J. C.; BARROS, M. T. L.; SPENCER, M.; PORTO, M.; NUCCI, N.; JULIANO, N.; EIGER, S. Introdução à Engenharia Ambiental. 2ª Ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005. 318 p.

BRASIL. Lei n. 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei n. 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, 2010.

_____. Lei n. 11.445, de 05 de janeiro de 2007. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico; altera as Leis nos 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.036, de 11 de maio de 1990, 8.666, de 21 de junho de 1993, 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; revoga a Lei no 6.528, de 11 de maio de 1978; e dá outras providências. Brasília, 2007.

_____. Lei n. 8.184, de 10 de maio de 1991. Dispõe sobre a periodicidade dos Censos Demográficos e dos Censos Econômicos e dá outras providências. Brasília, 1991.

BRITTO, M. L. C. P. S. Taxa de Emissão de Biogás e Parâmetros de Biodegradação de Resíduos Sólidos Urbanos no Aterro Metropolitano Centro. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia. Salvador: UFBA, 2006. 185 p.

CARIOCA, J. O. B.; ARORA, H. L. Biomassa: Fundamentos e aplicações tecnológicas. Fortaleza: UFC, 1984. 644 p.

CASTILHOS JÚNIOR, A. B. (Coord.); TADA, A. M.; ALMEIDA, A. M. G.; GONÇALO JR., P. R.; KIMURA, W. Resíduos sólidos urbanos: aterro sustentável para municípios de pequeno porte. Florianópolis: Rima Artes e Textos, 2009. 294 p.

CASTRO, B. A. A. Identidades dos territórios de desenvolvimento de Minas Gerais. Belo Horizonte: SEBRAE Minas, 2015. 222 p.

CASTRO, M. C. A. A. Avaliação da eficiência das operações unitárias de uma usina de triagem e compostagem na recuperação de materiais recicláveis e na transformação da matéria orgânica em composto. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos: USP, 1996.

CHEN, S.; CHEN, B. Net energy production and emissions mitigation of domestic wastewater treatment system: a comparison of different biogas-sludge use alternatives. *Bioresour Technol*, v. 144, 2013. p. 296-303.

CHERUBINI, R. Avaliação ambiental do sistema de coleta e disposição final de resíduos sólidos urbanos do município de Farroupilha - RS. Caxias do Sul: UCS, 2008. 40 p.

COELHO, E. J. Sistema de aproveitamento de lixo urbano: uma avaliação socioeconômica. Dissertação (Mestrado em Economia Rural) – Departamento de Economia Rural, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa (MG). 1994. 108 p.

COELHO, M. C. N. Impactos ambientais em áreas urbanas – teoria, conceitos e métodos de pesquisa. In: GUERRA, A. T.; CUNHA, S. B. (Org.). Impactos ambientais no Brasil. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2001. p. 19-45.

COINTREAU, S. Occupational and Environmental Health Issues of Solid Waste Management: Special Emphasis on Middle- and Lower-Income Countries. Washington, D. C.: World Bank, 2006. 48 p.

COLDEBELLA, A.; SOUZA, S. N. M.; SOUZA, J.; KOHELER, A. C. Viabilidade da cogeração de energia elétrica com biogás da bovinocultura de leite. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, nº 6. Campinas: AGRENER. 2006. 9 p.

COMISSÃO EUROPEIA. Proposta de diretiva do Parlamento Europeu e do Conselho - que altera a Diretiva 2008/98/CE relativa aos resíduos, a Diretiva 94/62/CE relativa

às embalagens e aos resíduos de embalagens, a Diretiva 1999/31/CE relativa à deposição de resíduos em aterros, a Diretiva 2000/53/CE relativa aos veículos em fim de vida, a Diretiva 2006/66/CE relativa às pilhas e acumuladores e respetivos resíduos e a Diretiva 2012/19/UE relativa aos resíduos de equipamentos elétricos e eletrónicos. Bruxelas: Comissão Europeia, 2014. 34 p.

CONSELHO DA UNIÃO EUROPEIA. Directiva 1999/31/CE do Conselho, de 26 de abril de 1999 - relativa à deposição de resíduos em aterros. In: Jornal Oficial das Comunidades Europeias, L182. 1999. 19 p.

COPPE - INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA EM ENGENHARIA; UNIFEI - UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ. Matriz Energética de Minas Gerais 2007 – 2030: Sumário Executivo. 2007. 31 p.

COSTA, D.F. Geração de energia elétrica a partir do biogás do tratamento de esgoto. Dissertação (Mestrado) – Programa de Interunidades de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo. São Paulo: USP, 2006. 194 p.

DAVIS, M. Planet of Slums. London & New York: Verso Editorial. 2006. 228 p.

DEMAJOROVIC, J. Da política tradicional de tratamento do lixo à política de gestão de resíduos sólidos: as novas prioridades. Revista de Administração de Empresas, São Paulo, v. 35, n. 3, 1995. p.88-93.

DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. Biogas from waste and renewable resources: An introduction. Weinheim: Wiley-VCH, 2008. 443 p.

DUNCAN, A. Bibliographic teaching outline, introductory pollution prevention materials: National pollution prevention center for higher education. An Arbor: University of Michigan, 1994. 26 p.

EIGENHEER, E. M. Lixo: A limpeza urbana através dos tempos. Porto Alegre: Gráfica Palloti, 2009. 139 p.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Balanço Energético Nacional 2017: Ano base 2016. Rio de Janeiro: EPE, 2017a. 292 p.

_____. Consumo mensal de energia elétrica por classe (regiões e subsistemas) – 2004-2017. 2017b. Disponível em <[http://antigo.epe.gov.br//mercado/Paginas/Consumomensaldeenergiael%C3%A9trica porclasse\(regi%C3%B5esesubistemas\)%E2%80%932011-2012.aspx](http://antigo.epe.gov.br//mercado/Paginas/Consumomensaldeenergiael%C3%A9tricaporclasse(regi%C3%B5esesubistemas)%E2%80%932011-2012.aspx)>. Acesso em

30 de janeiro de 2018.

_____. Demanda de energia 2050. Estudos da demanda de energia. Nota Técnica DEA 13/15. Rio de Janeiro: EPE, 2016a. p. 244.

_____. Calculadora 2050. Rio de Janeiro: EPE, 2016b. Disponível em: < <http://calculadora2050.epe.gov.br/calculadora.html>>. Acesso em 09 de novembro de 2017.

_____. Demanda de energia 2050. Estudos da demanda de energia. Nota Técnica DEA 13/14. Rio de Janeiro: EPE, 2014a. p. 232.

_____. Inventário Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos. Nota Técnica DEA 18/14. Série Recursos Energéticos. Rio de Janeiro: EPE, 2014b. 49 p.

_____. Projeções da demanda de energia elétrica para o plano decenal de expansão de energia 2008-2017. Rio de Janeiro, 2008.

ESMAP – Energy Sector Management Assistance Programme. The World Bank Handbook for the Preparation of Landfill Gas to Energy Projects in Latin America and the Caribbean. Ontário: World Bank, 2004. 216 p.

FEAM- FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. Panorama da destinação dos resíduos sólidos urbanos no Estado de Minas Gerais em 2016. Belo Horizonte: FEAM, 2017. 86 p.

_____. Análise de pré-viabilidade técnica, econômica e ambiental da implantação de uma usina solar fotovoltaica em consórcio com a reabilitação de áreas degradadas. Belo Horizonte: FEAM, 2016a. 164 p.

_____. Panorama da destinação final dos resíduos sólidos urbanos no Estado de Minas Gerais em 2015. Belo Horizonte: FEAM, 2016b. 63 p.

_____. Aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos: Guia de orientações para governos municipais de Minas Gerais. Belo Horizonte: FEAM, 2012. 163 p.

FEATHERSTONE, M. Cultura de Consumo e Pós-Modernismo. São Paulo: Studio Nobel, 1995. 223 p.

FERREIRA, B. R. Avaliação de um sistema de metanização de resíduos alimentares com vistas ao aproveitamento energético do biogás. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte: UFMG, 2015. 117 p.

FGV - FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS. Bio Combustíveis. Cadernos FGV Energia. Ano 4, nº 8. Rio de Janeiro: FGV Energia, 2017. 115 p.

FIGUEIREDO, J. C. Estimativa de produção de biogás e potencial energético dos resíduos sólidos urbanos em Minas Gerais. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de sistemas Ambientais da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte: UFMG, 2012. 138 p.

FIGUEIREDO, P. J. M. A sociedade do lixo: os resíduos, a questão energética e a crise ambiental. 2ed. Piracicaba: Editora Unimep, 1995. 240 p.

FOLBERTH, G. A; BUTLER, T. M.; COLLINS, W. J.; RUMBOLD, S. T. Megacities and climate change - A brief overview. In: Environmental Pollution, nº 203. Elsevier Ltd, 2015. p. 235-242.

FONTANA, R. L. M.; COSTA, S. S.; SILVA, J. A. B.; RODRIGUES, A. J. Teorias demográficas e o crescimento populacional no mundo. In: Cadernos de Graduação - Ciências Humanas e Sociais Unit. Vol. 2. Nº 3. Aracaju: UNIT, 2015. p. 113-124.

FRÉSCA, F. R. C. Estudo da geração de resíduos sólidos domiciliares no município de São Carlos, SP, a partir da caracterização física. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos: USP, 2007.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energia e meio ambiente no Brasil. Estudos Avançados, v. 21, n. 59. São Paulo: USP, 2007. p. 7-20.

GOMES, L. P. Estudo da caracterização física e da biodegradabilidade dos resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos: USP, 1989.

GUG, J.; CACCIOLA, D.; SOBKOWICZ, M. J. Processing and properties of a solid energy fuel from municipal solid waste (MSW) and recycled plastics. In: Waste Management, nº 35. Elsevier Ltd, 2015. p. 283-292.

HELLER, L.; DE PÁDUA, V. L. (Org.). Abastecimento de água para consumo humano. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2006. p. 859.

HERMSDORFF, W. and OLIVEIRA FILHO, D. Geração independente na ponta. Anais 3º Encontro de Energia no Meio Rural. Campinas, 2000.

HIRANO, M. Y. Geração de energia por microturbina alimentada à biogás em uma propriedade rural – Estudo de caso. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista. Bauru, 2015. 107 p.

HOMMA, A. K. O. Criando um Preço Positivo para o Lixo Urbano: A Reciclagem e a Coleta Informal. In: Simpósio Sobre a Reciclagem de Lixo Urbano para fins industriais e Agrícolas, Belém, 1998. Anais : Belém, PA, Embrapa Amazônia Ocidental, 2000, p.137-145.

HOORNWEG, D.; BHADA-TATA, P. What a Waste : A Global Review of Solid Waste Management. Urban development series;knowledge papers. Nº 15. Washington, DC: World Bank, 2012. 98 p.

HOUAISS, A.; VILLAR, M. S. Dicionário Houaiss da Línguas Portuguesa. Rio de Janeiro: Editora Objetiva, 2009.

IBAM - INSTITUTO BRASILEIRO DE ADMINISTRAÇÃO MUNICIPAL. Manual de gerenciamento integrado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: IBAM, 2001. 200 p.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATISTICA. Censo Demográfico 2010. 2010. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em 06 de outubro de 2017.

_____. Pesquisa Nacional de Saneamento Básico – 2008. Brasília: IBGE, 2008. p. 213.

IEA – International Energy Agency. Energy Efficiency 2017. France: IEA Publications, 2017. 139 p.

II UNCED - II Conferência das Nações Unidas sobre Ambiente e Desenvolvimento. Agenda 21. Rio de Janeiro, 1992. Disponível em: <<http://www.ecolnews.com.br/agenda21/>>. Acesso em 15 de outubro de 2017.

ILPES – Instituto Latinoamericano y del Caribe de Planificación Económica y Social. Guía para la preparación, evaluación y gestión de proyectos de residuos sólidos domiciliarios. OPAS/ILPES, 1998. 473 p.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Group I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [PACHAURI, R. K.; MEYER, L. A. (eds.)]. Geneva: IPCC, 2015. 151 p.

_____. Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [EDENHOFER, O.; PICHES-MADRUGA, R.; SOKONA, Y.; FARAHANI, E.; KADNER, S.; SEYBOTH, K.; ADLER, A.; BAUM, I.; BRUNNER, S.; EICKEMEIER, P.; KRIEMANN, B.; SAVOLAINEN, J.; SCHLÖMER, S.; VON STECHOW, C.; ZWICKEL, T.; e MINX, J.C. (eds.)]. Cambridge & New York: Cambridge University Press, 2014. 1454 p.

_____. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Vol 5: Waste. Hayama: IGES, 2006.

_____. Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Reference Manual - Vol. 3. Waste - Chapter 6. Mexico City: IPCC, 1996a. 32 p.

_____. Guidelines for Greenhouse Gas inventory: reference Manual. Vol. 5 – Waste. Chapter 2: Waste Generation, Composition, and Management Data. Mexico City: IPCC, 1996b.

JAMES, Bárbara. Lixo e Reciclagem. São Paulo: Scipione, 1997. 43p.

JANKES, G. G.; TRNINIC, M. R.; STAMENIC, M. S.; SIMONOVIC, T. S.; TANASIC, N. D.; LABUS, J. M. Biomass gasification with CHP production: A review of the State-of-the-Art technology and near future perspectives. In: Thermal Science, vol. 16, nº 1. 2012. P. S115-S130.

JARDIM, N. S.; D'ALMEIDA, M. L. O.; PRANDINI, F. L. Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado. São Paulo: IPT/CEMPRE, 1995. 278 p.

JICA - JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY. The study on the solid waste management in Dhaka City: Final Report. In: Clean Dhaka Master Plan, Vol. 3 - Supporting Report. Dhaka City: JICA, 2005. 289 p.

JUNKES, M. B. Procedimentos para aproveitamento de resíduos sólidos urbanos em municípios de pequeno porte. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação

em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis: UFSC, 2002. 116 p.

KHOIYANGBAM, R. S.; GUPTA, N.; KUMAR, S. Biogas Technology: Towards sustainable development. New Delhi: The Energy and Resources Institute - teri, 2011. 200 p.

KRELING, M. T. Aterro Sanitário da Extremos e Resíduos Sólidos Urbanos Domiciliares: Percepção dos Moradores – Porto Alegre – RS. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Geociências. Programa de Pós-Graduação em Geografia. Porto Alegre: UFRS, 2006. 201 p.

KUNZ, A.; OLIVEIRA, P. A. V. Aproveitamento de dejetos de animais para geração de biogás. In: Política Agrícola, ano XV, nº 3. 2006. p. 28-35.

LAJOLO, R. D. Cooperativa de catadores de materiais recicláveis: guia de implantação. São Paulo: SEBRAE, 2003.

LE TREUT, H.; SOMERVILLE, R.; CUBASCH, U.; DING, Y.; MAURITZEN, C.; MOKSSIT, A.; PETERSON, T.; PRATHER, M. Historical Overview of Climate Change. In: SOLOMON, S.; QIN, D.; MANNING, M.; CHEN, Z.; MARQUIS, M.; AVERYT, K. B.; TIGNOR, M.; MILLER, H. L. (eds.). Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge-UK/New York-USA: Cambridge University Press, 2007. 104 p.

LIMA, L. M. Q. Lixo: tratamento e biorremediação. 2ed. São Paulo: Hemus, 1991. 240 p.

LOBATO, L.C.S. Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgoto doméstico. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte: UFMG, 2011.

LOGAREZZI, Amadeu José Montagnini. Contribuições conceituais para o gerenciamento de resíduos sólidos e ações de educação ambiental. In: LEAL, Antonio Cezar *et al.* Resíduos Sólidos no Pontal do Paranapanema. Presidente Prudente: Editor Antonio Thomaz Júnior, 2004.

LUCCI, E. A.; BRANCO, A. L.; MENDONÇA, C. Território e sociedade no mundo globalizado: Geografia geral e do Brasil. São Paulo: Saraiva, 2005. 624 p.

MAGALHÃES, D. N. Elementos para o diagnóstico e gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos do município de Dores de Campos - MG. Juiz de Fora: UFJF, 2008. 60 p.

MAGERA, M. Os caminhos do lixo: da obsolescência programada à logística reversa. Campinas: Editora Átomo, 2012. 165 p.

MANCINI, S. D. Estudos da hidrólise do PET pós-consumo no estado sólido visando a reciclagem química. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos. São Carlos: UFSCAR, 2001.

MARQUES NETO, J. C. Estudo da gestão municipal dos resíduos de construção e demolição na bacia hidrográfica do Turvo Grande (UGRHI-15). Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos: USP, 2009. 669 p.

MARTINE, G.; McGRANAHAN, G. A transição urbana brasileira: trajetória, dificuldades e lições aprendidas. p. 11 - 24. In: População e Cidades: subsídios para o planejamento e para as políticas sociais. BAENNGER, R. (Org.). Campinas: Núcleo de Estudos de População-Nepo/Unicamp; Brasília: UNFPA, 2010. 304p.

MATA-ALVAREZ J, MACE S, LLABRES P. Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives. Bioresource Technology, 2000. p. 3–16.

MINAS GERAIS. Decreto nº 46.774, de 09 de junho de 2015. Institui os Fóruns Regionais de Governo e dá outras providências. Belo Horizonte: Minas Gerais Diário do Executivo, 2015.

_____. Deliberação Normativa COPAM nº 75, de 20 de outubro de 2004. Convoca municípios com população entre trinta e cinquenta mil habitantes ao licenciamento ambiental de sistema adequado de disposição final de lixo e altera prazos estabelecidos pela Deliberação Normativa COPAM nº 52, de 14 de dezembro de 2001. Belo Horizonte: Diário do Executivo – Minas Gerais, 2004.

_____. Deliberação Normativa COPAM nº 126, de 09 de outubro de 2008. Convoca municípios com população entre vinte e trinta mil habitantes ao licenciamento ambiental de sistema adequados de tratamento ou destinação final de resíduos sólidos urbanos. Belo Horizonte: Diário do Executivo – Minas Gerais, 2008.

_____. Deliberação Normativa COPAM nº 52, de 14 de dezembro

de 2001. Convoca municípios para o licenciamento ambiental de sistema adequado de disposição final de lixo e dá outras providências. Belo Horizonte: Diário do Executivo – Minas Gerais, 2001.

_____. Lei nº 18.031, de 12 de janeiro de 2009. Dispõe sobre a Política Estadual de Resíduos Sólidos. Belo Horizonte: Minas Gerais Diário do Executivo, 2009.

MINK, S. D. Poverty, population and the environment. 189 - World Bank Discussion Papers. Washington: WB, 1993. 40 p.

MMA – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Aproveitamento Energético do Biogás de Aterro Sanitário. In: Política Nacional de Resíduos Sólidos, 2017. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos/politica-nacional-de-residuos-solidos/aproveitamento-energetico-do-biogas-de-aterro-sanitario>>. Acesso em 10 de dezembro de 2017.

_____. Orientações para elaboração de Plano Simplificado de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos – PSGIRS - para municípios com população inferior a 20 mil habitantes. In: Plano Simplificado de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos – PSGIRS – Manual de orientação. 3ª Ed. Brasília: MMA – Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano, 2016. p. 89.

_____. PNRS- Versão preliminar para consulta pública. Brasília: MMA, 2011. 102 p.

MME - Ministério de Minas e Energia. RenovaBio - Nota explicativa sobre a proposta de criação da Política Nacional de Biocombustíveis. Brasília: MME, 2017. 138 p.

_____. PROINFA: Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia. [S.1:s.n], 2005. Disponível em:<<http://www.mme.gov.br/programs/display.do?prg=5>>. Acesso em: 17 fev.2005.

MONTEIRO, J. H. P. Landfill gas recovery an important alternative energy resource for developing countries. 1996.

NARROS, A.; DEL PESO, M.I.; MELE, G.; VINOT, M.; FERNÁNDEZ, E.; e RODRÍGUEZ M. E. Determination of siloxanes in landfill gas by adsorption on Tenax tubes and TD-GCMS. In: Proceedings Sardinia 2009, Twelfth International Waste Management and Landfill Symposium. Cagliari: CISA Publisher; 2009. 8 p.

OLIVEIRA, R. D. Geração de energia elétrica a partir do biogás produzido pela fermentação anaeróbia de dejetos em abatedouros e as possibilidades no mercado de carbono. São Carlos: USP, 2009. 79 p.

ONU - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. World Population Prospects: The 2012 revision. Nova Iorque: ONU, 2013.

PAIVA, J. L. Reciclagem sustentada: um processo de tratamento de resíduos sólidos para a proteção ambiental. Dissertação (Mestrado em Ciência Ambiental) – Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ. 1999. 140 p.

PECORA, V.; FIGUEIREDO, N. J. V.; COELHO, S. T.; VELÁZQUEZ, S. M. S. G. Potencial de geração de energia elétrica e iluminação a gás por meio do aproveitamento de biogás proveniente de aterro sanitário. In: Congresso Internacional sobre Geração Distribuída e Energia no Meio Rural, 7 Anais. Fortaleza: Universidade de Fortaleza, 2008. 7 p.

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. [Mestrado] Dissertação apresentada ao Programa Interunidades de Pós-graduação em Energia da Universidade de São Paulo. São Paulo: USP, 2006. 153 p.

PEIXOTO, K.; CAMPOS, V. B. G.; D'AGOSTO, M. A.. A coleta seletiva e a redução dos resíduos sólidos. Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2005. 21 p.

PEREIRA, R. H.; BRAGA, S. L.; BRAGA, C. V. M.; FREIRE, L. G. M. Geração distribuída de energia elétrica - aplicação de motores bicompostível diesel/gás natural. In: 3º Congresso BRasileiro de P&D em Petróleo e Gás, Salvador -BA, 2005. 6 p.

PEREIRA NETO, J.T. Manual de compostagem: processo de baixo custo. Viçosa: UFV, 2007. 81 p.

PHILOSOPHICAL TRANSACTIONS. The description of a well, and Earth in Lanchashire, taking fire by a candle approached to it. 1666, p. 482-484. Disponível em <<http://rstl.royalsocietypublishing.org/content/2/23-32/482.1.full.pdf+html>>. Acessado em 15 de dezembro de 2017.

PORTAL DO GOVERNO DE MINAS GERAIS. Conheça Minas: Geografia. Disponível em: <<http://mg.gov.br/conheca-minas/geografia>>. Acesso em 05 de novembro de 2017.

QIAN, X.; KOERNER, R. M.; GRAY, D. H. Geotechnical aspects of landfill design and construction. New Jersey: Pearson Education, 2001. 717 p.

RAPER, J. F.; MAGUIRE, D. J. Design Models and Functionality in GIS. Computers and Geosciences, London, v.18, n.4, 1992. p.387-400.

RICETO, A.; DA SILVA, E. I.; GUIMARÃES, A. A. Uma reflexão sobre os impactos em sistemas ambientais urbanos: estudos de caso da microbacia do córrego liso no município de uberlândia-MG. Caminhos de Geografia. Vol. 2. Nº 37. Uberlândia: UFU. 2010. p. 230-238.

RODRIGUES, A. M. Produção e consumo do e no espaço: problemática ambiental urbana. São Paulo: Ed. Hucitec, 1998. 193p.

ROSS, J. L. S. A sociedade industrial e o ambiente. In: Geografia do Brasil. São Paulo: Editora USP, EDUSP, 2003. 225 p.

ROSSETTO, C. Desempenho de motor-gerador de Ciclo Otto operado com gasolina e biogás proveniente de suinocultura e de uma estação de tratamento de esgotos. Projeto (Qualificação) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Cascavel: UEOPR, 2014. 50 p.

SALOMON, K.R. Avaliação Técnico-econômica e ambiental da utilização do biogás proveniente da vinhaça em tecnologias para geração de eletricidade. Tese (Doutorado em engenharia mecânica) – Instituto de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Itajubá. Itajuba: UFI, 2007. 128 p.

SANTOS, A. A.; PEIXOTO, K. L. G.; PASSOS, A.; NOGUCHI, H. S.; PESSOA, J. O.; MOTTA SOBRINHO, M. A. Caracterização quantitativa e qualitativa dos resíduos sólidos urbanos no município de Apuí-AM. In: Revista EDUCAmazônia - Educação Sociedade e Meio Ambiente, ano 6, vol. X, nº 1. Humaitá: LAPESAM/GISREA/UFAM/CNPq/EDUA, 2013. 49-58 p.

SANTOS, G. G. D. Análise e perspectivas de alternativas de destinação dos resíduos sólidos urbanos: o caso da incineração e da disposição em aterros. Dissertação (Mestrado) – Programa de Planejamento Energético da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2011. 193 p.

SARTORI, H. J. F. Discussão sobre a caracterização física de resíduos sólidos domiciliares. Dissertação (Mestrado) – Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte: UFMG, 1995.

SCHALCH, V.; LEITE, W. C. A.; FERNANDES JÚNIOR, J. L.; CASTRO, M. C. A. A. Gestão e gerenciamento de resíduos sólidos. São Carlos: UFC, 2002. 93 p.

SEBIGAS. Proposta das instituições presentes na reunião de construção do RenovaBio Biocombustíveis. Brasília: SEBIGAS, 2016. 10 p.

SEEG - SISTEMA DE ESTIMATIVAS DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA. Análise das emissões de GEE Brasil (1970-2014) e suas implicações para políticas públicas e a contribuição brasileira para o acordo de Paris. São Paulo: SEEG/Observatório do Clima, 2016. 44 p.

_____. Análise da evolução das emissões de GEE no Brasil (1990-2012): setor de resíduos. São Paulo: SEEG/Observatório do Clima, 2014. 17 p.

SEIBERT, A. L. A importância da gestão de resíduos sólidos urbanos e a conscientização sobre a sustentabilidade para a população em geral. Medianeira: UTFPR, 2014. 44 p.

SEKITO, T.; ONOUE, K.; DOTE, Y.; SAKANAKURA, H.; NAKAMURA, K. Variation and correlation of content and leachability of hazardous metals in MSW molten slag. In: Environ Monit Assess. Switzerland: Springer International Publishing Switzerland 2014. 12 p.

SILVA, C. A. B. V. Limpeza e purificação de biogás. [Mestrado] Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. Vila Real: UTAD, 2009. 91 p.

SILVA, O. V. Sistemas produtivos, desenvolvimento econômico e degradação ambiental. Revista Científica Eletrônica Turismo, Ano 3, ed. 5. São Paulo: FAHU, 2006. 7 p.

SIMÕES, G. F.; CATAPRETA, C. A. A. Monitoring and modeling of long-term settlements of an experimental landfill in Brazil. In: Waste Management, nº 33, 2013. p. 420-430.

SOARES, E. L. S. F. Estudo da caracterização gravimétrica e poder calorífico dos resíduos sólidos urbanos. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – COPPE da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: COPPE, 2011. 133 p.

SOUZA, S. N. M. Manual de geração de energia elétrica a partir do biogás no meio

rural. Cascavel: UNIOESTE, 2016. 47 p.

SOUZA, S. N. M.; PEREIRA, W. C.; NOGUEIRA, C. E. C.; PAVAN, A. A.; SORDI, A. Custo da eletricidade gerada em conjunto motor gerador utilizando biogás da suinocultura. *Acta Scientiarum*, v.26, n. 2. Maringá, 2004. p. 127-133.

SPOSITO, M. E. B. Reflexões sobre a natureza da segregação espacial nas cidades contemporâneas. In: *Revista de Geografia*. Dourados: AGB, 1996, p. 71-85.

STAISS, C.; PEREIRA, H. Biomassa Energia Renovável na Agricultura e no Setor Florestal. *Revista Agros*, Instituto Superior de Agronomia, Portugal, v. 13, n. 1. 2001. p. 21-28.

TCHOBANOGLIOUS, G.; THIESEN, H.; VIGIL, S. A. *Integrated solid waste management - engineering principles and management issues*. New York: McGraw-Hill International Editions, 1993. 978 p.

TOLMASQUIM, M. T.; GUERREIRO, A.; GORINI, R. Matriz energética brasileira: Uma prospectiva. *Novos Estudos*. nº 79. CEBRAP, 2007. p. 47-69.

UMWELTBUNDESAMT. Die Treibhausgase. Disponível em: <<http://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/treibhausgas-emissionen/die-treibhausgase>>. Acesso em 18 de novembro de 2017.

UNEP – UNITED NATIONS ENVIRONMENTAL. *The Emissions Gap Report 2017 – A UN Environmental Synthesis Report*. Nairobi: UNEP, 2017. 89 p.

UNFCCC - UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. Methodological tool: Project emissions from flaring. In: ACM0001: Flaring or use of landfill gas, v. 18.0. Bonn: UNFCCC, 2017. 14 p.

USEPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Greenhouse Gas Emissions – Understanding Global Warming Potentials*. Disponível em: < <https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials>>. Acesso em 19 de fevereiro de 2018.

VAN DER WALT, I. J.; JANSEN, A. A.; CROUSE, P. L. Plasma-Assisted Treatment of Municipal Solid Waste: A Scenario Analysis. In: *Plasma Chem Plasma Process*, nº 37. New York: Springer Science+Business Media, 2017. p. 763-782.

VEIGA, A. J. P.; VEIGA, D. A. M.; MATA, J. M. B. Densidade demográfica como instrumento de planejamento urbano: um estudo de caso sobre Vitória da Conquista-BA. In: II Simpósio Cidades Médias e Pequenas da Bahia, Vitória da Conquista-BA, 2011. 15 p.

VIEIRA, A. J. P.; CUNHA, S. B. Mudanças na rede de drenagem urbana de Teresópolis (Rio de Janeiro). In: GUERRA, A. T.; CUNHA, S. B. (Org.). Impactos ambientais no Brasil. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2001. p. 111-145.

VOLPI, A. A história do consumo no Brasil. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007. 182 p.

WALDVOGEL, B. C., FERREIRA, C. E. C. Estatísticas da Vida. Revista: São Paulo em perspectiva, volume 17, nº 3-4, Julho/Dezembro. São Paulo, 2003. 55-66 p.

WALDMAN, M. Recursos hídricos, resíduos sólidos e matriz energética: notas conceituais, metodológicas e de gestão ambiental. In: AMARO, A. B.; VERDUM, R. (Org.). Política Nacional de Resíduos Sólidos e suas interfaces com o espaço geográfico: entre conquistas e desafios. Porto Alegre: Letra1, 2016. 396 p.

WEC - WORLD ENERGY COUNCIL. World Energy Resources - 2016. London, United Kingdom, 2016.

WMO – WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. WMO Statement on the State of the Global Climate in 2017 Provisional Release 06.11.2017. 16 p. Disponível em: <http://ane4bf-datap1.s3-eu-west-1.amazonaws.com/wmocms/s3fs-public/ckeditor/files/2017_provisional_statement_text_-_updated_04Nov2017_1.pdf?7rBjqhMTRJkQbvuyMNAmetvBgFeyS_vQ>. Acessado em 14 de dezembro de 2017.

WRI - WORLD RESOURCES INSTITUTE. CAIT Climate Data Explorer - Historical Emissions. 2014. Disponível em: < <http://www.wri.org/resources/data-sets/cait-historical-emissions-data-countries-us-states-unfccc>>. Acesso em 10 de fevereiro de 2018.

ZILOTTI, H.A.R. Potencial de produção de biogás em uma Estação de tratamento de esgoto de cascavel para a geração de energia elétrica. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Cascavel: UEOPR, 2012.

ZGLOBISZ, N.; CASTILLO-CASTILLO, A.; GRIMES, S.; JONES, P. Influence of UK energy policy on the deployment of anaerobic digestion. In: Energy Policy, v. 38, nº 10. 2010. P. 5988-5999.

APÊNDICES

Apêndice 1: Projeções das populações urbanas dos Territórios de Desenvolvimento de Minas Gerais.

Ano	População urbana dos Territórios de Desenvolvimento																
	Alto Jequitinhonha	Caparaó	Central	Mata	Médio e Baixo Jequitinhonha	Metropolitana	Mucuri	Noroeste	Norte	Oeste	Sudoeste	Sul	Triângulo Norte	Triângulo Sul	Vale do Aço	Vale do Rio Doce	Vertentes
2010	183.718	1.244.876	591.557	902.598	832.959	819.350	287.638	272.102	919.515	676.944	514.732	1.794.251	931.729	288.762	378.368	661.071	608.488
2011	184.258	1.255.615	597.343	908.168	839.287	824.309	289.860	273.275	925.681	681.002	517.881	1.808.948	938.830	290.398	381.756	665.507	612.105
2012	184.774	1.265.979	602.935	913.526	845.398	829.078	291.999	274.403	931.617	684.911	520.914	1.823.127	945.687	291.972	385.025	669.780	615.585
2013	188.119	1.286.518	613.044	928.986	859.854	840.511	296.952	278.352	945.640	694.208	527.080	1.853.721	958.337	296.090	392.310	679.838	624.318
2014	191.562	1.307.552	623.349	944.850	874.725	852.191	302.022	282.383	959.963	703.699	533.357	1.885.041	971.179	300.292	399.753	690.117	633.264
2015	195.106	1.329.097	633.853	961.133	890.030	864.128	307.212	286.500	974.596	713.391	539.748	1.917.110	984.216	304.582	407.356	700.630	642.434
2016	198.756	1.351.169	644.562	977.852	905.788	876.332	312.528	290.702	989.549	723.292	546.256	1.949.953	997.450	308.961	415.125	711.389	651.841
2017	202.516	1.373.786	655.480	995.025	922.023	888.818	317.972	294.993	1.004.830	733.410	552.886	1.983.596	1.010.886	313.432	423.062	722.406	661.497
2018	206.391	1.396.967	666.613	1.012.670	938.756	901.597	323.548	299.375	1.020.452	743.753	559.640	2.018.066	1.024.526	317.997	431.172	733.697	671.416
2019	210.385	1.420.732	677.964	1.030.807	956.013	914.686	329.262	303.849	1.036.424	754.331	566.523	2.053.391	1.038.373	322.658	439.459	745.278	681.614
2020	214.505	1.445.099	689.540	1.049.455	973.820	928.100	335.117	308.417	1.052.759	765.151	573.538	2.089.599	1.052.432	327.419	447.928	757.169	692.107
2021	218.754	1.470.089	701.345	1.068.637	992.206	941.858	341.119	313.082	1.069.468	776.225	580.690	2.126.723	1.066.705	332.282	456.582	769.389	702.913
2022	223.140	1.495.725	713.385	1.088.376	1.011.199	955.978	347.271	317.845	1.086.564	787.564	587.983	2.164.794	1.081.197	337.250	465.427	781.964	714.052
2023	227.669	1.522.029	725.665	1.108.694	1.030.833	970.483	353.579	322.710	1.104.059	799.178	595.421	2.203.845	1.095.910	342.326	474.467	794.918	725.547
2024	232.345	1.549.024	738.191	1.129.618	1.051.141	985.395	360.048	327.677	1.121.969	811.080	603.009	2.243.912	1.110.849	347.513	483.706	808.282	737.422
2025	237.177	1.576.735	750.970	1.151.174	1.072.159	1.000.741	366.684	332.751	1.140.306	823.284	610.753	2.285.031	1.126.017	352.813	493.151	822.089	749.704
2026	242.172	1.605.187	764.006	1.173.391	1.093.928	1.016.549	373.492	337.932	1.159.087	835.802	618.657	2.327.242	1.141.418	358.231	502.805	836.377	762.421
2027	247.336	1.634.407	777.306	1.196.297	1.116.487	1.032.851	380.478	343.223	1.178.328	848.651	626.727	2.370.584	1.157.056	363.769	512.674	851.190	775.607
2028	252.679	1.664.422	790.877	1.219.924	1.139.882	1.049.682	387.649	348.627	1.198.044	861.845	634.969	2.415.101	1.172.935	369.432	522.763	866.576	789.297
2029	258.207	1.695.263	804.726	1.244.306	1.164.160	1.067.080	395.009	354.147	1.218.253	875.403	643.389	2.460.835	1.189.059	375.222	533.078	882.591	803.531
2030	263.930	1.726.958	818.858	1.269.477	1.189.372	1.085.089	402.567	359.785	1.238.975	889.342	651.994	2.507.835	1.205.431	381.143	543.624	899.298	818.353
2031	269.857	1.759.540	833.281	1.295.474	1.215.572	1.103.756	410.329	365.543	1.260.227	903.683	660.789	2.556.149	1.222.057	387.200	554.408	916.768	833.812
2032	275.997	1.793.041	848.003	1.322.337	1.242.819	1.123.133	418.303	371.425	1.282.031	918.447	669.783	2.605.828	1.238.941	393.395	565.435	935.084	849.961
2033	282.362	1.827.495	863.030	1.350.106	1.271.175	1.143.280	426.495	377.433	1.304.408	933.657	678.983	2.656.927	1.256.085	399.734	576.711	954.339	866.861
2034	288.961	1.862.939	878.371	1.378.825	1.300.707	1.164.260	434.913	383.570	1.327.380	949.337	688.396	2.709.503	1.273.497	406.221	588.243	974.639	884.577
2035	295.807	1.899.410	894.032	1.408.540	1.331.485	1.186.148	443.566	389.840	1.350.971	965.514	698.032	2.763.614	1.291.178	412.859	600.036	996.107	903.185
2036	302.910	1.936.947	910.023	1.439.300	1.363.588	1.209.022	452.463	396.244	1.375.206	982.216	707.898	2.819.325	1.309.135	419.654	612.099	1.018.883	922.766
2037	310.285	1.975.591	926.351	1.471.157	1.397.096	1.232.973	461.611	402.787	1.400.111	999.476	718.004	2.876.701	1.327.371	426.610	624.436	1.043.125	943.411
2038	317.944	2.015.384	943.025	1.504.166	1.432.099	1.258.101	471.020	409.472	1.425.715	1.017.325	728.359	2.935.811	1.345.892	433.732	637.057	1.069.016	965.223
2039	325.902	2.056.371	960.055	1.538.384	1.468.690	1.284.518	480.700	416.301	1.452.046	1.035.800	738.975	2.996.730	1.364.702	441.026	649.967	1.096.767	988.315
2040	334.173	2.098.599	977.448	1.573.873	1.506.970	1.312.347	490.661	423.278	1.479.136	1.054.940	749.862	3.059.534	1.383.806	448.496	663.175	1.126.617	1.012.814
2041	342.774	2.142.116	995.215	1.610.697	1.547.048	1.341.729	500.913	430.407	1.507.016	1.074.787	761.030	3.124.305	1.403.210	456.149	676.687	1.158.840	1.038.861

2042	351.720	2.186.973	1.013.365	1.648.926	1.589.042	1.372.817	511.467	437.690	1.535.722	1.095.387	772.494	3.191.129	1.422.917	463.989	690.513	1.193.754	1.066.613
2043	361.030	2.233.224	1.031.909	1.688.633	1.633.075	1.405.786	522.335	445.133	1.565.290	1.116.789	784.264	3.260.095	1.442.934	472.023	704.659	1.231.721	1.096.246
2044	370.723	2.280.923	1.050.856	1.729.895	1.679.281	1.440.828	533.528	452.738	1.595.758	1.139.047	796.355	3.331.301	1.463.265	480.257	719.135	1.273.155	1.127.956
2045	380.817	2.330.130	1.070.218	1.772.795	1.727.806	1.478.161	545.058	460.508	1.627.167	1.162.218	808.781	3.404.847	1.483.916	488.697	733.949	1.318.536	1.161.963
2046	391.334	2.380.905	1.090.004	1.817.418	1.778.804	1.518.025	556.939	468.449	1.659.561	1.186.365	821.558	3.480.839	1.504.893	497.349	749.110	1.368.412	1.198.511
2047	402.296	2.433.312	1.110.228	1.863.858	1.832.440	1.560.693	569.184	476.564	1.692.985	1.211.558	834.700	3.559.390	1.526.200	506.222	764.626	1.423.413	1.237.875
2048	413.726	2.487.418	1.130.899	1.912.212	1.888.894	1.606.467	581.808	484.858	1.727.487	1.237.868	848.225	3.640.619	1.547.844	515.321	780.508	1.484.264	1.280.360
2049	425.648	2.543.291	1.152.031	1.962.584	1.948.357	1.655.686	594.824	493.333	1.763.119	1.265.378	862.152	3.724.652	1.569.830	524.654	796.765	1.551.798	1.326.309

Apêndice 2: Projeções dos potenciais de produção de RSU em Minas Gerais, por Território de Desenvolvimento.

Ano	Produção de RSU [t/ano] dos Territórios de Desenvolvimento																
	Alto Jequitinhonha	Caparaó	Central	Mata	Médio e Baixo Jequitinhonha	Metropolitana	Mucuri	Noroeste	Norte	Oeste	Sudoeste	Sul	Triângulo Norte	Triângulo Sul	Vale do Aço	Vale do Rio Doce	Vertentes
2010	30.919	37.300	1.901.252	48.182	377.370	144.200	121.243	122.611	154.084	57.584	391.208	319.684	89.437	212.654	101.075	227.541	81.384
2011	31.011	37.497	1.916.634	48.291	381.571	145.618	122.057	123.029	155.370	57.659	394.060	322.084	89.885	214.784	101.798	229.194	81.723
2012	31.100	37.672	1.931.585	48.395	385.632	147.266	122.842	123.431	156.911	57.730	401.557	324.839	90.316	216.839	102.495	230.790	82.050
2013	31.653	38.089	1.954.650	48.919	392.204	150.574	124.216	124.717	158.674	58.267	406.596	330.409	91.353	220.876	103.979	234.545	83.124
2014	32.222	38.512	1.978.722	49.453	399.339	154.113	127.221	126.028	160.614	58.825	411.712	335.363	92.404	224.902	105.491	238.387	84.216
2015	32.808	38.942	2.001.742	49.996	406.160	157.295	128.812	127.365	162.585	59.404	416.757	340.425	93.469	229.213	107.032	242.320	85.328
2016	33.410	39.816	2.025.025	50.550	413.107	166.830	130.425	129.168	164.588	60.007	422.028	345.600	94.550	235.281	108.603	246.796	86.460
2017	34.030	40.260	2.048.872	51.115	420.181	170.140	132.062	130.561	166.625	60.489	427.379	351.185	95.497	246.379	110.205	250.936	87.611
2018	34.669	40.710	2.074.633	51.691	432.152	174.150	134.164	131.983	168.695	61.143	437.589	357.927	96.604	251.987	111.838	255.620	88.783
2019	35.327	41.166	2.099.238	52.277	439.541	177.826	136.295	132.841	170.801	61.828	443.159	368.131	97.726	257.072	113.503	259.977	89.976
2020	36.448	41.630	2.124.436	52.875	447.065	181.603	138.014	134.302	172.942	62.546	448.669	374.346	98.714	262.656	115.055	264.449	91.190
2021	37.174	42.100	2.155.316	53.484	454.580	185.487	139.461	135.795	175.119	63.153	454.265	382.130	101.041	268.466	116.778	269.043	92.425
2022	37.923	42.576	2.181.596	54.106	462.383	189.481	141.075	137.172	177.334	63.928	460.094	388.617	102.213	275.992	118.536	273.618	93.683
2023	38.697	43.060	2.310.340	54.593	470.331	193.437	142.860	138.728	179.587	64.743	465.865	394.973	103.402	282.316	120.330	278.469	94.963
2024	39.496	43.551	2.341.516	55.238	478.425	197.505	144.671	140.318	181.879	65.449	471.727	401.496	104.608	288.763	122.160	283.160	96.266
2025	40.322	44.049	2.371.985	55.895	486.670	201.837	146.362	141.796	184.212	66.347	477.830	408.635	105.830	295.489	123.882	289.582	97.592
2026	41.177	44.554	2.409.599	56.566	495.523	206.150	148.224	143.457	186.585	67.298	484.473	416.989	107.069	307.313	126.224	294.718	98.795
2027	42.060	45.066	2.441.424	56.956	504.395	210.743	150.114	145.156	193.771	68.746	490.782	424.086	108.326	322.236	128.611	300.605	100.019
2028	42.975	45.586	2.473.901	57.649	513.135	215.923	152.032	146.895	196.141	69.872	497.040	431.384	109.600	330.658	130.465	306.090	101.412
2029	43.921	46.114	2.507.652	58.357	522.494	220.823	153.977	148.676	200.194	70.917	503.546	440.510	110.892	339.479	132.508	312.385	102.831
2030	45.349	46.649	2.541.680	59.079	531.584	226.320	155.952	150.500	202.859	72.189	511.623	453.176	112.202	353.487	139.193	320.116	104.714
2031	46.375	47.192	2.583.128	59.816	540.845	232.981	157.955	152.369	206.012	73.553	518.200	462.009	113.531	363.683	141.842	326.390	110.825
2032	47.439	47.743	2.619.284	60.568	550.281	238.974	159.842	155.171	208.783	75.018	525.031	470.697	114.878	373.928	144.124	426.172	112.430
2033	48.393	48.302	2.661.035	61.189	564.656	246.644	161.904	157.163	211.606	76.595	531.972	479.678	116.245	384.539	146.459	434.792	114.511
2034	49.533	48.869	2.698.536	61.967	574.522	252.637	163.996	159.208	214.334	78.295	538.879	495.585	117.485	396.301	148.848	444.200	116.185
2035	50.717	49.444	2.736.719	62.762	585.016	260.799	166.119	161.156	217.261	82.046	546.045	505.141	118.738	408.221	151.732	453.551	118.335
2036	53.466	50.028	2.780.745	63.574	595.266	267.298	169.595	163.305	220.243	84.241	554.817	515.634	120.596	420.763	156.157	465.299	119.931
2037	54.834	50.621	2.822.584	64.696	605.709	274.916	171.806	165.513	223.138	86.628	562.250	538.700	122.479	433.820	158.756	477.252	122.150
2038	56.257	51.222	2.959.614	65.834	616.055	281.790	174.050	168.082	226.236	90.138	569.659	550.144	123.946	449.650	161.418	488.146	123.817
2039	57.738	51.832	3.003.901	66.707	626.894	289.070	176.328	170.273	229.396	93.017	577.779	568.460	125.434	464.801	164.586	501.085	125.661
2040	59.280	52.450	3.049.233	67.600	589.778	301.475	183.274	172.672	237.398	96.307	585.597	580.863	127.385	476.199	167.256	518.202	127.391

2041	60.886	53.078	3.097.108	68.511	600.130	309.685	185.511	174.991	240.595	104.379	599.933	593.774	128.773	599.275	170.143	532.451	129.155
2042	62.559	58.486	3.150.955	69.443	610.681	318.230	187.927	177.529	244.309	108.725	608.624	607.225	130.329	625.373	174.589	549.281	131.100
2043	64.303	59.195	3.219.181	70.101	621.287	421.963	190.380	179.993	247.807	113.509	617.018	621.688	131.907	652.474	177.655	565.144	133.081
2044	67.443	59.914	3.270.541	70.918	632.246	432.818	193.168	182.681	251.377	118.779	626.008	637.817	133.508	680.014	187.438	582.349	140.164
2045	69.372	60.643	3.323.654	73.367	643.417	444.250	195.707	185.599	255.022	124.593	635.598	659.709	136.011	711.112	190.761	614.573	142.279
2046	71.384	62.857	3.378.583	74.392	654.805	456.141	198.285	189.930	258.743	131.012	644.323	680.465	137.666	743.514	195.717	636.744	144.435
2047	73.187	63.487	3.441.375	75.439	668.346	468.517	200.753	192.755	267.843	144.721	653.644	697.235	145.027	776.876	199.766	660.429	146.631
2048	80.391	64.274	3.498.039	76.362	680.251	482.891	203.407	196.278	271.771	153.672	663.714	714.940	146.822	813.385	203.481	688.218	148.868
2049	85.927	65.072	3.562.979	77.306	692.094	497.882	206.100	200.835	275.936	164.742	673.367	741.533	148.644	851.289	207.758	716.614	151.001

Apêndice 3: Projeções dos potenciais de geração de biogás em Minas Gerais, por Território de Desenvolvimento – Cenário Otimista (RSU_r = 1,0).

Ano	Produção de biogás por Território de Desenvolvimento – Cenário Otimista [m ³ de CH ₄ /ano]																
	Alto Jequitinhonha	Caparaó	Central	Mata	Médio e Baixo Jequitinhonha	Metropolitana	Mucuri	Noroeste	Norte	Oeste	Sudoeste	Sul	Triângulo Norte	Triângulo Sul	Vale do Aço	Vale do Rio Doce	Vertentes
2010	3.963.552	10.432.703	4.781.501	50.149.226	6.176.461	243.722.545	7.381.699	12.956.925	29.168.630	27.260.253	11.464.982	40.980.460	48.375.314	18.485.118	19.752.140	15.717.554	15.542.156
2011	3.975.365	10.476.154	4.806.747	50.514.803	6.190.441	245.694.368	7.391.359	13.049.547	29.380.562	27.533.242	11.522.357	41.288.183	48.913.800	18.666.873	19.916.938	15.771.180	15.646.511
2012	3.986.664	10.517.985	4.829.194	51.475.875	6.203.769	247.610.984	7.400.460	13.138.844	29.585.078	27.796.725	11.577.611	41.641.281	49.434.351	18.878.102	20.114.570	15.822.754	15.747.127
2013	4.057.608	10.655.660	4.882.677	52.121.806	6.270.936	250.567.689	7.469.311	13.329.111	30.066.463	28.314.219	11.710.546	42.355.331	50.276.852	19.302.195	20.355.155	15.987.598	15.923.347
2014	4.130.565	10.795.746	4.936.937	52.777.605	6.339.359	253.653.470	7.540.766	13.522.981	30.558.970	28.830.256	11.845.299	42.990.325	51.191.435	19.755.797	20.621.780	16.155.636	16.308.501
2015	4.205.618	10.938.292	4.991.987	53.424.310	6.409.068	256.604.450	7.615.032	13.720.554	31.063.077	29.382.995	11.981.897	43.639.284	52.065.891	20.163.680	20.896.745	16.326.976	16.512.439
2016	4.282.852	11.083.347	5.104.075	54.099.951	6.480.095	259.589.149	7.692.338	13.921.934	31.636.894	30.160.811	12.120.371	44.302.722	52.956.408	21.386.053	21.181.159	16.558.132	16.719.308
2017	4.362.358	11.230.962	5.160.939	54.786.012	6.552.474	262.646.110	7.754.088	14.127.231	32.167.608	31.583.444	12.241.845	45.018.585	53.863.300	21.810.374	21.476.378	16.736.709	16.929.155
2018	4.444.229	11.381.187	5.218.628	56.094.801	6.626.237	265.948.321	7.838.002	14.336.557	32.768.111	32.302.386	12.383.715	45.882.917	55.397.869	22.324.404	21.764.946	16.918.943	17.198.555
2019	4.528.567	11.534.074	5.277.155	56.808.812	6.701.420	269.102.553	7.925.791	14.550.031	33.326.598	32.954.191	12.527.543	47.190.906	56.344.960	22.795.595	22.082.571	17.028.909	17.471.778
2020	4.672.265	11.689.678	5.336.532	57.515.192	6.778.059	272.332.607	8.017.796	14.748.931	33.899.869	33.670.045	12.654.165	47.987.685	57.309.486	23.279.847	22.416.097	17.216.297	17.692.078
2021	4.765.312	11.848.053	5.396.772	58.232.449	6.856.191	276.291.223	8.095.609	14.969.836	34.488.743	34.414.854	12.952.463	48.985.451	58.272.913	23.777.693	22.768.324	17.407.646	17.877.537
2022	4.861.366	12.009.255	5.457.887	58.979.670	6.935.853	279.660.015	8.194.924	15.195.193	35.075.261	35.379.552	13.102.796	49.817.094	59.273.188	24.289.696	23.209.965	17.584.176	18.084.434
2023	4.960.563	12.173.341	5.519.891	59.719.449	6.998.269	296.163.757	8.299.434	15.425.139	35.697.122	36.190.274	13.255.207	50.631.800	60.291.957	24.796.754	23.626.720	17.783.579	18.313.288
2024	5.063.044	12.340.369	5.582.977	60.470.942	7.080.929	300.160.245	8.389.915	15.659.814	36.298.380	37.016.668	13.409.733	51.467.946	61.329.590	25.318.229	24.078.893	17.987.391	18.545.471
2025	5.168.960	12.510.399	5.646.619	61.253.276	7.165.239	304.066.135	8.505.106	15.880.458	37.121.658	37.878.965	13.566.406	52.383.132	62.386.463	25.873.609	24.573.832	18.176.971	18.762.177
2026	5.278.466	12.664.527	5.711.370	62.104.870	7.251.244	308.887.858	8.627.021	16.180.724	37.780.122	39.394.587	13.725.262	53.454.120	63.521.357	26.426.526	25.331.036	18.389.857	19.000.940
2027	5.391.731	12.821.499	5.777.064	62.913.635	7.301.229	312.967.549	8.812.602	16.486.670	38.534.662	41.307.635	13.886.338	54.363.826	64.658.684	27.015.225	26.602.319	18.607.673	19.243.201
2028	5.508.928	13.000.114	5.843.715	63.715.895	7.390.111	317.130.755	8.956.870	16.724.435	39.237.823	42.387.202	14.049.671	55.299.319	65.779.118	27.679.302	27.339.441	18.830.613	19.489.016
2029	5.630.243	13.181.966	5.911.338	64.549.892	7.480.809	321.457.338	9.090.871	16.986.291	40.044.781	43.517.946	14.215.299	56.469.229	66.978.808	28.307.428	29.043.515	19.058.877	19.738.446
2030	5.813.322	13.423.334	5.979.947	65.585.222	7.573.370	325.819.379	9.254.005	17.843.196	41.035.875	45.313.667	14.383.259	58.092.880	68.144.070	29.012.055	30.202.858	19.292.679	19.991.551
2031	5.944.893	14.206.665	6.049.557	66.428.391	7.667.845	331.132.587	9.428.855	18.182.772	41.840.078	46.620.753	14.553.591	59.225.218	69.331.271	29.865.932	31.619.094	19.532.242	20.248.394
2032	6.081.234	14.412.512	6.120.183	67.304.006	7.764.286	335.767.447	9.616.643	18.475.354	42.631.193	47.934.048	14.726.336	60.338.970	70.540.863	30.634.185	34.077.791	19.891.484	20.490.215
2033	6.203.505	14.679.273	6.191.840	68.193.828	7.843.850	341.119.616	9.818.732	18.774.651	43.736.264	49.294.262	14.901.534	61.490.205	72.383.597	31.617.494	36.192.223	20.146.864	20.754.507
2034	6.349.709	14.893.859	6.264.544	69.079.230	7.943.638	345.926.876	10.036.641	19.080.900	44.942.200	50.802.002	15.060.472	63.529.298	73.648.276	32.385.689	38.710.854	20.408.927	21.022.727
2035	6.501.402	15.169.378	6.338.311	69.997.840	8.045.527	350.821.559	10.517.575	19.450.587	46.141.019	52.330.042	15.221.084	64.754.282	74.993.591	33.431.990	41.770.384	20.658.640	21.294.943
2036	6.653.776	15.374.080	6.413.156	71.122.324	8.149.572	356.465.261	10.798.942	20.017.836	47.646.931	53.937.803	15.459.294	66.099.441	76.307.438	34.265.078	45.475.084	20.934.147	21.740.478
2037	7.029.138	15.658.425	6.489.096	72.075.114	8.293.368	361.828.642	11.104.852	20.350.977	48.179.207	55.611.622	15.700.696	69.056.237	77.646.242	35.241.619	63.959.301	21.217.200	22.023.915
2038	7.211.565	15.872.119	6.566.148	73.024.912	8.439.326	379.394.543	11.554.870	20.692.226	49.575.753	57.640.938	15.888.750	70.523.301	78.972.421	36.122.774	72.772.970	21.546.553	22.311.609
2039	7.401.418	16.108.521	6.644.327	74.065.756	8.551.264	385.071.827	11.923.903	21.098.351	50.623.376	59.583.102	16.079.499	72.871.230	80.361.953	37.056.047	83.594.658	21.827.450	22.603.633
2040	7.599.079	16.330.271	6.723.652	75.068.028	8.665.630	390.882.955	12.345.645	21.440.594	51.642.554	60.823.214	16.329.601	74.461.166	75.603.939	38.646.216	90.746.560	22.134.862	23.493.968
2041	7.804.951	16.556.425	6.804.139	76.905.802	8.782.492	397.020.024	13.380.391	21.810.763	52.825.167	62.821.424	16.507.519	76.116.226	76.930.980	39.698.665	105.504.362	22.432.194	23.780.716
2042	8.019.460	16.805.739	7.497.325	78.019.859	8.901.919	403.922.714	13.937.574	22.380.689	54.412.650	64.166.956	16.706.933	77.840.487	78.283.514	40.794.119	123.738.309	22.757.522	24.090.509
2043	8.243.056	17.059.762	7.588.181	79.095.876	8.986.299	412.668.606	14.550.761	22.773.640	56.446.189	66.640.961	16.909.234	79.694.565	79.643.108	41.091.714	146.164.731	23.073.431	24.404.971
2044	8.645.567	17.967.653	7.680.358	80.248.278	9.090.959	419.252.492	15.226.379	23.027.724	58.651.603	69.171.392	17.114.473	81.762.142	81.047.964	42.548.193	173.823.475	23.417.958	24.762.359
2045	8.892.789	18.238.852	7.773.874	81.477.727	9.404.978	426.061.054	15.971.618	24.453.805	60.782.474	71.157.797	17.435.310	84.568.408	82.479.990	43.948.650	207.956.077	23.792.085	25.087.809
2046	9.150.700	18.515.148	8.057.639	82.596.188	9.536.300	433.102.487	16.794.520	25.089.136	62.624.522	73.311.463	17.647.449	87.229.214	83.939.774	45.472.947	250.099.076	24.347.256	25.418.221
2047	9.381.921	18.796.649	8.138.426	83.790.951	9.670.550	441.151.761	18.551.903	25.608.155	64.660.710	75.588.141	18.591.087	89.378.965	85.675.710	47.059.446	302.833.540	24.709.358	25.734.705
2048	10.305.370	19.083.463	8.239.309	85.081.828	9.788.895	448.415.669	19.699.255	26.084.358	66.223.090	77.268.276	18.821.246	91.648.516	87.201.746	48.902.076	367.160.240	25.160.971	26.074.810
2049	11.014.988	19.356.911	8.341.675	86.319.362	9.909.951	456.740.360	21.118.409	26.632.675	68.863.108	79.127.211	19.054.819	95.057.592	88.719.893	49.823.714	446.684.819	25.745.217	26.420.131
2050	11.014.988	19.356.911	8.341.675	86.319.362	9.909.951	456.740.360	21.118.409	26.632.675	68.863.108	79.127.211	19.054.819	95.057.592	88.719.893	49.823.714	446.684.819	25.745.217	26.420.131

Apêndice 4: Projeções dos potenciais de geração de biogás em Minas Gerais, por Território de Desenvolvimento – Cenário Pessimista (RSU_r = 0,65).

Ano	Produção de biogás por Território de Desenvolvimento – Cenário Pessimista [m ³ de CH ₄ /ano]																
	Alto Jequitinhonha	Caparaó	Central	Mata	Médio e Baixo Jequitinhonha	Metropolitana	Mucuri	Noroeste	Norte	Oeste	Sudoeste	Sul	Triângulo Norte	Triângulo Sul	Vale do Aço	Vale do Rio Doce	Vertentes
2010	2.576.309	6.781.257	3.107.975	32.596.997	4.014.700	158.419.654	4.798.105	8.422.001	18.959.609	17.719.165	7.452.238	26.637.299	31.443.954	12.015.327	12.838.891	10.216.410	10.102.401
2011	2.583.987	6.809.500	3.124.386	32.834.622	4.023.787	159.701.339	4.804.383	8.482.205	19.097.365	17.896.607	7.489.532	26.837.319	31.793.970	12.133.468	12.946.010	10.251.267	10.170.232
2012	2.591.332	6.836.691	3.138.976	33.459.319	4.032.450	160.947.140	4.810.299	8.540.248	19.230.301	18.067.871	7.525.447	27.066.833	32.132.328	12.270.766	13.074.471	10.284.790	10.235.633
2013	2.637.445	6.926.179	3.173.740	33.879.174	4.076.109	162.868.998	4.855.052	8.663.922	19.543.201	18.404.243	7.611.855	27.530.965	32.679.954	12.546.427	13.230.851	10.391.939	10.350.176
2014	2.684.867	7.017.235	3.209.009	34.305.443	4.120.583	164.874.756	4.901.498	8.789.938	19.863.330	18.739.667	7.699.444	27.943.711	33.274.433	12.841.268	13.404.157	10.501.164	10.600.526
2015	2.733.652	7.109.890	3.244.791	34.725.801	4.165.894	166.792.892	4.949.771	8.918.360	20.191.000	19.098.947	7.788.233	28.365.535	33.842.829	13.106.392	13.582.884	10.612.535	10.733.085
2016	2.783.854	7.204.176	3.317.648	35.164.968	4.212.062	168.732.947	5.000.020	9.049.257	20.563.981	19.604.527	7.878.241	28.796.769	34.421.665	13.900.934	13.767.754	10.762.786	10.867.550
2017	2.835.532	7.300.125	3.354.610	35.610.908	4.259.108	170.719.971	5.040.157	9.182.700	20.908.945	20.529.239	7.957.199	29.262.081	35.011.145	14.176.743	13.959.646	10.878.861	11.003.951
2018	2.888.749	7.397.771	3.392.108	36.461.620	4.307.054	172.866.409	5.094.701	9.318.762	21.299.272	20.996.551	8.049.415	29.823.896	36.008.615	14.510.862	14.147.215	10.997.313	11.179.061
2019	2.943.569	7.497.148	3.430.151	36.925.728	4.355.923	174.916.659	5.151.764	9.457.520	21.662.289	21.420.224	8.142.903	30.674.089	36.624.224	14.817.137	14.353.671	11.068.791	11.356.656
2020	3.036.972	7.598.291	3.468.746	37.384.875	4.405.738	177.016.195	5.211.567	9.586.805	22.034.915	21.885.529	8.225.207	31.191.995	37.251.166	15.131.901	14.570.463	11.190.593	11.499.851
2021	3.097.453	7.701.235	3.507.902	37.851.092	4.456.524	179.589.295	5.262.146	9.730.393	22.417.683	22.369.655	8.419.101	31.840.543	37.877.393	15.455.501	14.799.411	11.314.970	11.620.399
2022	3.159.888	7.806.016	3.547.627	38.336.786	4.508.305	181.779.010	5.326.701	9.876.876	22.798.920	22.996.709	8.516.817	32.381.111	38.527.572	15.788.303	15.086.477	11.429.715	11.754.882
2023	3.224.366	7.912.671	3.587.929	38.817.642	4.548.875	192.506.442	5.394.632	10.026.340	23.203.129	23.523.678	8.615.885	32.910.670	39.189.772	16.117.890	15.357.368	11.559.326	11.903.637
2024	3.290.979	8.021.240	3.628.818	39.306.113	4.602.604	195.104.159	5.453.445	10.178.879	23.593.947	24.060.834	8.716.326	33.454.165	39.864.233	16.456.849	15.651.280	11.691.804	12.054.556
2025	3.359.824	8.131.759	3.670.302	39.814.630	4.657.406	197.642.988	5.528.319	10.322.298	24.129.078	24.621.327	8.818.164	34.049.036	40.551.201	16.817.846	15.972.991	11.815.031	12.195.415
2026	3.431.003	8.231.942	3.712.390	40.368.166	4.713.309	200.777.108	5.607.564	10.517.471	24.557.080	25.606.482	8.921.420	34.745.178	41.288.882	17.177.242	16.465.173	11.953.407	12.350.611
2027	3.504.625	8.333.974	3.755.091	40.893.863	4.745.799	203.428.907	5.728.191	10.716.335	25.047.530	26.849.963	9.026.120	35.336.487	42.028.145	17.559.896	17.291.507	12.094.988	12.508.080
2028	3.580.803	8.450.074	3.798.415	41.415.332	4.803.572	206.134.991	5.821.966	10.870.883	25.504.585	27.551.681	9.132.286	35.944.558	42.756.427	17.991.546	17.770.636	12.239.898	12.667.860
2029	3.659.658	8.568.278	3.842.370	41.957.430	4.862.526	208.947.270	5.909.066	11.041.089	26.029.108	28.286.665	9.239.944	36.704.999	43.536.225	18.399.828	18.878.285	12.388.270	12.829.990
2030	3.778.659	8.725.167	3.886.965	42.630.394	4.922.691	211.782.597	6.015.103	11.598.077	26.673.319	29.453.883	9.349.118	37.760.372	44.293.646	18.857.836	19.631.857	12.540.241	12.994.508
2031	3.864.181	9.234.332	3.932.212	43.178.454	4.984.100	215.236.181	6.128.756	11.818.802	27.196.051	30.303.489	9.459.834	38.496.392	45.065.326	19.412.856	20.552.411	12.695.957	13.161.456
2032	3.952.802	9.368.133	3.978.119	43.747.604	5.046.786	218.248.840	6.250.818	12.008.980	35.510.275	31.157.131	9.572.118	39.220.330	45.851.561	19.912.220	22.150.564	12.929.465	13.318.640
2033	4.032.278	9.541.527	4.024.696	44.325.988	5.098.502	221.727.750	6.382.176	12.203.523	36.228.572	32.041.270	9.685.997	39.968.634	47.049.338	20.551.371	23.524.945	13.095.461	13.490.429
2034	4.127.311	9.681.008	4.071.954	44.901.499	5.163.365	224.852.470	6.523.817	12.402.585	37.012.430	33.021.301	9.789.307	41.294.044	47.871.380	21.050.698	25.162.055	13.265.803	13.664.773
2035	4.225.912	9.860.096	4.119.902	45.498.596	5.229.592	228.034.013	6.836.424	12.642.881	37.791.662	34.014.527	9.893.705	42.090.284	48.745.834	21.730.793	27.150.750	13.428.116	13.841.713
2036	4.454.955	9.993.152	4.168.551	46.229.511	5.297.222	231.702.419	7.019.313	13.011.594	38.770.505	35.059.572	10.048.541	42.964.636	49.599.835	22.272.301	29.558.805	13.607.195	14.131.311
2037	4.568.939	10.177.976	4.217.912	46.848.824	5.390.689	235.188.617	7.218.154	13.228.135	39.766.485	36.147.554	10.205.453	44.886.554	50.470.057	22.907.053	41.573.545	13.791.180	14.315.545
2038	4.687.517	10.316.877	4.267.996	47.466.193	5.485.562	246.606.453	7.510.666	13.449.947	40.674.240	37.466.610	10.327.688	45.840.146	51.332.074	23.479.803	47.302.430	14.005.259	14.502.546
2039	4.810.922	10.470.539	4.318.813	48.142.741	5.558.322	250.296.687	7.750.537	13.713.928	41.752.344	38.729.016	10.451.674	47.366.300	52.235.270	24.086.430	54.336.528	14.187.842	14.692.361
2040	4.939.401	10.614.676	4.370.374	48.794.218	5.632.660	254.073.920	8.024.669	13.936.386	43.178.560	48.011.089	10.614.241	48.399.758	49.142.561	25.120.041	58.985.264	14.387.660	15.271.079
2041	5.073.218	10.761.676	4.422.690	49.988.771	5.708.620	258.063.016	8.267.254	14.176.996	44.365.858	49.933.926	10.729.888	49.475.547	50.005.137	25.804.132	68.577.836	14.580.926	15.457.465
2042	5.212.649	10.923.730	4.473.262	50.712.908	5.786.247	262.549.764	9.059.423	14.547.448	45.768.223	52.108.521	10.859.506	50.596.317	50.884.284	26.516.177	80.429.901	14.792.389	15.658.831
2043	5.357.986	11.088.845	4.932.318	51.412.319	5.841.094	268.234.594	9.457.995	14.802.866	47.090.023	54.366.624	10.991.002	51.801.467	51.768.020	35.159.614	95.007.075	14.997.730	15.863.231
2044	5.619.618	11.678.974	4.992.233	52.161.381	5.909.123	272.514.120	9.897.147	15.618.020	48.523.542	56.661.405	11.124.408	53.145.392	52.681.177	36.064.075	112.985.258	15.221.673	16.095.533
2045	5.780.313	11.855.254	5.053.018	52.960.522	6.113.236	276.939.685	10.381.552	15.894.973	51.208.608	59.252.568	11.332.952	54.969.465	53.611.993	37.016.623	135.171.450	15.464.855	16.307.076
2046	5.947.955	12.034.846	5.237.465	53.687.522	6.198.595	281.516.617	10.916.438	16.307.938	53.055.939	61.952.451	11.470.842	56.698.989	54.560.853	38.007.416	162.564.399	15.825.716	16.521.844
2047	6.098.248	12.217.822	5.289.977	54.464.118	6.285.858	286.748.645	12.058.737	16.645.301	55.029.461	64.732.291	12.084.207	58.096.327	55.689.211	39.038.640	196.841.801	16.061.083	16.727.558
2048	6.698.490	12.404.251	5.355.551	55.303.188	6.362.782	291.470.185	12.804.516	16.954.833	57.345.009	67.774.379	12.233.810	59.571.535	56.681.135	40.236.349	238.654.156	16.354.631	16.948.627
2049	7.159.742	12.581.992	5.422.089	56.107.585	6.441.468	296.881.234	13.726.966	17.311.239	59.711.020	70.932.687	12.385.632	61.787.435	57.667.931	41.485.414	290.345.132	16.734.391	17.173.085
2050	7.159.742	12.581.992	5.422.089	56.107.585	6.441.468	296.881.234	13.726.966	17.311.239	59.711.020	70.932.687	12.385.632	61.787.435	57.667.931	41.485.414	290.345.132	16.734.391	17.173.085

ANEXOS

ANEXO 1 – Municípios mineiros agrupados por Território de Desenvolvimento (Adaptado de AGÊNCIA MINAS GERAIS, 2017).

ALTO JEQUITINHONHA	CAPARAÓ	Martins Soares	Simonésia	MATA	Dona Euzébia	Miraí
Alvorada de Minas	Abre Campo	Matipó	Taparuba	Além Paraíba	Dores do Turvo	Muriaé
Aricanduva	Acaiaca	Mutum	Teixeiras	Andrelândia	Ervália	Olaria
Capelinha	Alto Caparaó	Oratórios	Urucânia	Antônio Prado de Minas	Espera Feliz	Oliveira Fortes
Carbonita	Alto Jequitibá	Paula Cândido	Vermelho Novo	Aracitaba	Estrela Dalva	Orizânia
Chapada do Norte	Alvinópolis	Pedra do Anta	Viçosa	Arantina	Eugenópolis	Palma
Coluna	Amparo da Serra	Piedade de Ponte Nova	CENTRAL	Argirita	Ewbank da Câmara	Passa Vinte
Couto de Magalhães de Minas	Araponga	Pocrane	Abaeté	Astolfo Dutra	Faria Lemos	Patrocínio do Muriaé
Datas	Barra Longa	Ponte Nova	Augusto de Lima	Barão do Monte Alto	Fervedouro	Pedra Bonita
Diamantina	Cajuri	Porto Firme	Biquinhas	Belmiro Braga	Goianá	Pedra Dourada
Felício dos Santos	Canaã	Raul Soares	Buenópolis	Bias Fortes	Guarani	Pedro Teixeira
Gouvêa	Caparaó	Reduto	Cedro do Abaeté	Bicas	Guarará	Pequeri
Itamarandiba	Caputira	Rio Casca	Corinto	Bocaina de Minas	Guidoval	Piau
Leme do Prado	Chalé	Rio Doce	Curvelo	Bom Jardim de Minas	Guiricema	Pirapetinga
Materlândia	Conceição de Ipanema	Santa Cruz do Escalvado	Felixlândia	Brás Pires	Itamarati de Minas	Piraúba
Minas Novas	Diogo de Vasconcelos	Santa Margarida	Inimutaba	Caiana	Juiz de Fora	Presidente Bernardes
Presidente Kubitschek	Dom Silvério	Santana do Manhuaçu	Monjolos	Carangola	Laranjal	Recreio
Rio Vermelho	Durandé	Santo Antônio do Gramma	Morada Nova de Minas	Cataguases	Leopoldina	Rio Novo
Santo Antônio do Itambé	Guaraciaba	São João do Manhuaçu	Morro da Garça	Chácara	Liberdade	Rio Pomba
São Gonçalo do Rio Preto	Ipanema	São José do Goiabal	Paineiras	Chiador	Lima Duarte	Rio Preto
Senador Modestino Gonçalves	Jequeri	São José do Mantimento	Pompéu	Coimbra	Mar de Espanha	Rochedo de Minas
Serra Azul de Minas	Lajinha	São Miguel do Anta	Presidente Juscelino	Coronel Pacheco	Maripá de Minas	Rodeiro
Serro	Luisburgo	São Pedro dos Ferros	Santo Hipólito	Descoberto	Matias Barbosa	Rosário da Limeira
Turmalina	Manhuaçu	Sem Peixe	Três Marias	Divinésia	Mercês	Santa Bárbara do Monte Verde
Veredinha	Manhumirim	Sericita		Divino	Miradouro	Santa Rita do Jacutinga

Santana de Cataguases	Francisco Badaró	Bonfim	Maravilhas	São Joaquim de Bicas	São José do Divino	Unai
Santana do Deserto	Itaobim	Brumadinho	Mariana	São José da Lapa	Serra dos Aimorés	Uruana de Minas
Santo Antônio do Aventureiro	Itinga	Cachoeira da Prata	Mário Campos	São Sebastião do Rio Preto	Setubinha	Varjão de Minas
Santos Dumont	Jacinto	Caetanópolis	Mateus Leme	Sarzedo	Teófilo Otoni	Vazante
São Francisco do Glória	Jenipapo de Minas	Caeté	Matozinhos	Sete Lagoas	Umburatiba	NORTE
São Geraldo	Jequitinhonha	Capim Branco	Moeda	Taquaraçu de Minas	NOROESTE	Berizal
São João Nepomuceno	Joaíma	Carmésia	Morro do Pilar	Vespasiano	Arapuá	Bocaiúva
São Sebastião da Vargem Alegre	Jordânia	Catas Altas	Nova Era	MUCURI	Arinos	Bonito de Minas
Senador Cortes	José Gonçalves de Minas	Conceição do Mato Dentro	Nova Lima	Águas Formosas	Bonfinópolis de Minas	Botumirim
Senador Firmino	Mata Verde	Confins	Nova União	Angelândia	Brasilândia de Minas	Brasília de Minas
Silveirânia	Medina	Congonhas do Norte	Ouro Preto	Ataléia	Buritiz	Buritizeiro
Simão Pereira	Monte Formoso	Contagem	Papagaios	Bertópolis	Cabeceira Grande	Campo Azul
Tabuleiro	Novo Cruzeiro	Cordisburgo	Paraopeba	Campanário	Carmo do Paranaíba	Capitão Enéas
Tocantins	Padre Paraíso	Crucilândia	Passabém	Carlos Chagas	Chapada Gaúcha	Catuti
Tombos	Palmópolis	Dionísio	Pedro Leopoldo	Catuji	Dom Bosco	Claro dos Poções
Ubá	Pedra Azul	Dom Joaquim	Pequi	Crisólita	Formoso	Cônego Marinho
Vieiras	Ponto dos Volantes	Esmeraldas	Piedade dos Gerais	Franciscópolis	Guarda-Mor	Coração de Jesus
Visconde do Rio Branco	Rio do Prado	Ferros	Prudente de Moraes	Frei Gaspar	João Pinheiro	Cristália
Volta Grande	Rubim	Florestal	Raposos	Fronteira dos Vales	Lagamar	Curral de Dentro
MÉDIO E BAIXO JEQUITINHONHA	Salto da Divisa	Fortuna de Minas	Ribeirão das Neves	Itaipé	Lagoa Formosa	Engenheiro Navarro
Águas Vermelhas	Santa Maria do Salto	Funilândia	Rio Acima	Itambacuri	Lagoa Grande	Espinosa
Almenara	Santo Antônio do Jacinto	Ibirité	Rio Manso	Ladainha	Matutina	Francisco Dumont
Araçuaí	Virgem da Lapa	Igarapé	Rio Piracicaba	Machacalis	Natalândia	Francisco Sá
Bandeira	METROPOLITANO	Inhaúma	Sabará	Malacacheta	Paracatu	Fruta de Leite
Berilo	Araçuaí	Itabira	Santa Bárbara	Nanuque	Patos de Minas	Gameleiras
Cachoeira de Pajeú	Baldim	Itabirito	Santa Luzia	Nova Módica	Presidente Olegário	Glaucilândia
Carai	Barão de Cocais	Itambé do Mato Dentro	Santa Maria de Itabira	Novo Oriente de Minas	Riachinho	Grão Mogol
Comercinho	Bela Vista de Minas	Jaboticatubas	Santana de Pirapama	Ouro Verde de Minas	Rio Paranaíba	Guaraciama
Coronel Murta	Belo Horizonte	Jequitibá	Santana do Riacho	Pavão	Santa Rosa da Serra	Ibiaí
Divisa Alegre	Belo Vale	João Monlevade	Santo Antônio do Rio Abaixo	Pescador	São Gonçalo do Abaeté	Ibiracatu
Divisópolis	Betim	Juatuba	São Domingos do Prata	Poté	São Gotardo	Icaraí de Minas
Felizburgo	Bom Jesus do Amparo	Lagoa Santa	São Gonçalo do Rio Abaixo	Santa Helena de Minas	Tiros	Indaiabira

Itacambira	Pedras de Maria da Cruz	Bom Despacho	Oliveira	Doresópolis	Bandeira do Sul	Cristina
Itacarambi	Pintópolis	Bom Sucesso	Onça de Pitangui	Fortaleza de Minas	Boa Esperança	Cruzília
Jaíba	Pirapora	Camacho	Pains	Guapé	Bom Repouso	Delfim Moreira
Janaúba	Ponto Chique	Campo Belo	Pará de Minas	Guaranésia	Borda da Mata	Divisa Nova
Januária	Porteirinha	Cana Verde	Passa Tempo	Guaxupé	Botelhos	Dom Viçoso
Japonvar	Riacho dos Machados	Candeias	Pedra do Indaiá	Ibiraci	Brazópolis	Elói Mendes
Jequitaiá	Rio Pardo de Minas	Carmo da Mata	Perdigão	Itamogi	Bueno Brandão	Espírito Santo do Dourado
Joaquim Felício	Rubelita	Carmo do Cajuru	Pimenta	Itaú de Minas	Cabo Verde	Estiva
Josenópolis	Salinas	Carmópolis de Minas	Piracema	Jacuí	Cachoeira de Minas	Extrema
Juramento	Santa Cruz de Salinas	Cláudio	Pitangui	Juruáia	Caldas	Fama
Juvenília	Santa Fé de Minas	Conceição do Pará	Quartel Geral	Monte Belo	Camanducaia	Gonçalves
Lagoa dos Patos	Santo Antônio do Retiro	Córrego Danta	Santana do Jacaré	Monte Santo de Minas	Cambuí	Heliódora
Lassance	São Francisco	Córrego Fundo	Santo Antônio do Amparo	Muzambinho	Cambuquira	Ibitiúra de Minas
Lontra	São João da Lagoa	Cristais	Santo Antônio do Monte	Nova Resende	Campanha	Ijaci
Luislândia	São João da Ponte	Divinópolis	São Francisco de Paula	Passos	Campestre	Ilicínea
Mamonas	São João das Missões	Dores do Indaiá	São Gonçalo do Pará	Piumhi	Campo do Meio	Inconfidentes
Manga	São João do Pacuí	Estrela do Indaiá	São José da Varginha	Pratópolis	Campos Gerais	Ingaí
Matias Cardoso	São João do Paraíso	Formiga	São Sebastião do Oeste	São João Batista do Glória	Careaçu	Ipuíuna
Mato Verde	São Romão	Igaratinga	Serra da Saudade	São José da Barra	Carmo da Cachoeira	Itajubá
Mirabela	Serranópolis de Minas	Iguatama	Tapiraí	São Pedro da União	Carmo de Minas	Itamonte
Miravânia	Taiobeiras	Itaguara	SUDOESTE	São Roque de Minas	Carrancas	Itanhandu
Montalvânia	Ubaí	Itapecerica	Alpinópolis	São Sebastião do Paraíso	Carvalhópolis	Itapeva
Monte Azul	Urucuaia	Itatiaiuçu	Alterosa	São Tomás de Aquino	Carvalhos	Itumirim
Montes Claros	Vargem Grande do Rio Pardo	Itaúna	Arceburgo	Vargem Bonita	Caxambu	Itutinga
Montezuma	Várzea da Palma	Japaraíba	Bom Jesus da Penha	SUL	Conceição das Pedras	Jacutinga
Ninheira	Varzelândia	Lagoa da Prata	Capetinga	Aiuruoca	Conceição do Rio Verde	Jesuânia
Nova Porteirinha	Verdelândia	Leandro ferreira	Capitólio	Alagoa	Conceição dos Ouros	Lambari
Novorizonte	OESTE	Luz	Carmo do Rio Claro	Albertina	Congonhal	Lavras
Olhos-d'Água	Aguanil	Martinho Campos	Cássia	Alfenas	Consolação	Luminárias
Padre Carvalho	Araújos	Medeiros	Claraval	Andradas	Coqueiral	Machado
Pai Pedro	Arcos	Moema	Conceição da Aparecida	Areado	Cordislândia	Maria da Fé
Patis	Bambuí	Nova Serrana	Delfinópolis	Baependi	Córrego do Bom Jesus	Marmelópolis

Minduri	Senador Amaral	Indianópolis	Pirajuba	Naque	Gonzaga	Sobrália
Monsenhor Paulo	Senador José Bento	Ipiacu	Planura	Periquito	Governador Valadares	Tarumirim
Monte Sião	Seritinga	Iraí de Minas	Pratinha	Piedade de Caratinga	Guanhães	Tumiritinga
Munhoz	Serrania	Ituiutaba	Sacramento	Pingo-d'Água	Itabirinha	Virginópolis
Natércia	Serranos	Monte Alegre de Minas	Santa Juliana	Santa Bárbara do Leste	Itanhomi	Virgolândia
Nepomuceno	Silvianópolis	Monte Carmelo	São Francisco de Sales	Santa Rita de Minas	Itueta	VERTENTES
Olímpio Noronha	Soledade de Minas	Nova Ponte	Tapira	Santana do Paraíso	Jampruca	Alfredo Vasconcelos
Ouro Fino	Tocos do Moji	Patrocínio	Uberaba	São Domingos das Dores	José Raydan	Alto Rio Doce
Paraguaçu	Toledo	Prata	União de Minas	São João do Oriente	Mantena	Antônio Carlos
Paraisópolis	Três Corações	Romaria	Veríssimo	São Sebastião do Anta	Marilac	Barbacena
Passa Quatro	Três Pontas	Santa Vitória	VALE DO AÇO	Timóteo	Mathias Lobato	Barroso
Pedralva	Turvolândia	Serra do Salitre	Açucena	Ubaporanga	Mendes Pimentel	Capela Nova
Perdões	Varginha	Tupaciguara	Antônio Dias	Vargem Alegre	Nacip Raydan	Caranaíba
Piranguçu	Virgínia	Uberlândia	Belo Oriente	VALE DO RIO DOCE	Nova Belém	Carandaí
Piranguinho	Wenceslau Braz	TRIÂNGULO SUL	Bom Jesus do Galho	Água Boa	Paulistas	Casa Grande
Poço Fundo	TRIÂNGULO NORTE	Água Comprida	Braúnas	Aimorés	Peçanha	Catas Altas da Noruega
Poços de Caldas	Abadia dos Dourados	Araxá	Bugre	Alpercata	Resplendor	Cipotânea
Pouso Alegre	Araguari	Campo Florido	Caratinga	Alvarenga	Sabinópolis	Conceição da Barra de Minas
Pouso Alto	Araporã	Campos Altos	Coronel Fabriciano	Cantagalo	Santa Efigênia de Minas	Congonhas
Ribeirão Vermelho	Cachoeira Dourada	Carneirinho	Córrego Novo	Capitão Andrade	Santa Maria do Suaçuí	Conselheiro Lafaiete
Santa Rita de Caldas	Campina Verde	Comendador Gomes	Dom Cavati	Central de Minas	Santa Rita do Itueto	Coronel Xavier Chaves
Santa Rita do Sapucaí	Canápolis	Conceição das Alagoas	Dores de Guanhães	Conselheiro Pena	São Félix de Minas	Cristiano Ottoni
Santana da Vargem	Capinópolis	Conquista	Entre Folhas	Coroaci	São Geraldo da Piedade	Desterro de Entre Rios
São Bento Abade	Cascalho Rico	Delta	Iapu	Cuparaque	São Geraldo do Baixio	Desterro do Melo
São Gonçalo do Sapucaí	Centralina	Fronteira	Imbé de Minas	Divino das Laranjeiras	São João do Manteninha	Dores de Campos
São João da Mata	Coromandel	Frutal	Inhapim	Divinolândia de Minas	São João Evangelista	Entre Rios de Minas
São José do Alegre	Cruzeiro da Fortaleza	Ibiá	Ipaba	Engenheiro Caldas	São José da Safira	Ibertioga
São Lourenço	Douradoquara	Itapagipe	Ipatinga	Fernandes Tourinho	São José do Jacuri	Ibituruna
São Sebastião da Bela Vista	Estrela do Sul	Iturama	Jaguaraçu	Frei Inocêncio	São Pedro do Suaçuí	Itaverava
São Sebastião do Rio Verde	Grupiara	Limeira do Oeste	Joanésia	Frei Lagonegro	São Sebastião do Maranhão	Jeceaba
São Tomé das Letras	Guimarânia	Pedrinópolis	Marliéria	Galiléia	Sardoá	Lagoa Dourada
Sapucaí-Mirim	Gurinhata	Perdizes	Mesquita	Goiabeira	Senhora do Porto	Lamim

Madre de Deus de Minas
Nazareno
Ouro Branco
Paiva
Piedade do Rio Grande
Piranga
Prados
Queluzito
Resende Costa
Ressaquinha
Rio Espera
Ritópolis
Santa Bárbara do Tugúrio
Santa Cruz de Minas
Santa Rita do Ibitipoca
Santana do Garambéu
Santana dos Montes
São Brás do Suaçuí
São João del Rei
São Tiago
São Vicente de Minas
Senhora de Oliveira
Senhora dos Remédios
Tiradentes