

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA

FILIFE FERREIRA DE OLIVEIRA LEITE

**Alternativas Tecnológicas de Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos para o Estado de
Minas Gerais no Contexto da Economia Circular**

UNIFEI
Itajubá/MG
2020

FILIFE FERREIRA DE OLIVEIRA LEITE

Alternativas Tecnológicas de Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos para o Estado de Minas Gerais no contexto da Economia Circular

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em ciências em Engenharia de Energia.

Área de concentração: Energia Sociedade e Meio Ambiente

Orientador: Prof. Dr. Jose Carlos Escobar Palacio
Co-orientador: Prof. Dr. Aldemar Martínez González

UNIFEI
Itajubá/MG
2020

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus pais Teresa e Geraldo, que sempre me incentivaram nos estudos.

Dedico também aos meus irmãos Rafael, Ana Clara, Gabriel e Maria Teresa.

Agradecimentos

Agradeço ao Professor Dr. Jose Carlos Escobar Palacio por ter sido meu orientador, por se tornar um amigo, ter contribuído com o trabalho e me dado a oportunidade de desenvolvê-lo.

Aos professores do programa de Mestrado em Engenharia de Energia, especialmente ao pessoal do NEST, pelos ensinamentos que me possibilitaram desenvolver o tema.

A Universidade Federal de Itajubá, de maneira geral, por ter oferecido as condições necessárias ao desenvolvimento das atividades relacionadas ao programa de Mestrado.

A todos os colegas da sala de pesquisa do NEST pela ajuda e pela oportunidade de trabalharmos juntos.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela Bolsa de estudos a mim concedida.

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) na qual tive a oportunidade de fazer parte do Projeto de Pesquisa PPM-00601-18.

RESUMO

Nota-se no mundo uma tendência de mudança de um sistema de economia linear para uma economia circular, que promova a recirculação de produtos em um sistema restaurativo capaz de reduzir a necessidade de extração de novas matérias-primas. Assim, a economia circular permitiria minimizar problemas ambientais provenientes da disposição inadequada de resíduos e, ainda, os relacionados a escassez de recursos. Nota-se no Brasil um crescimento na geração de resíduos sólidos urbanos que deve ser mantida nos próximos anos, o que permitiria a implementação de tecnologias de recuperação energética de resíduos (*WtE*). No entanto, ainda há pouco conhecimento nos diferentes estados do Brasil acerca dos benefícios energéticos, econômicos e ambientais que podem ser alcançados com a implementação de tecnologias *WtE* na gestão de resíduos. Neste sentido, o presente trabalho realiza um estudo para o estado de Minas Gerais, o segundo mais populoso do Brasil, onde são avaliadas alternativas tecnológicas para o tratamento e recuperação energética de resíduos sólidos urbanos em um contexto de economia circular. Diferentes tecnologias que utilizam as rotas termoquímicas e bioquímicas foram avaliadas sobre o aspecto energético e econômico a fim de determinar sua viabilidade técnica e econômica em função da população dos municípios do estado. As diferentes alternativas de tratamento foram avaliadas sob o conceito de economia circular e em termos emissões evitadas. Por fim, foi avaliada a possibilidade de formação de consórcios entre municípios. Constatou-se que em um cenário onde fossem utilizadas as alternativas viáveis economicamente e de maior geração de energia elétrica em cada faixa populacional estudada, poderiam ser gerados um total de 2.869.666 MWh ao ano e uma redução de 84% na disposição final de resíduos em aterro. Com a suposição de aplicação de consórcios em todo o estado, foi estimada uma geração elétrica de 6.651.349 MWh ao ano e uma redução de 82% na disposição de resíduos em aterro. Com a formação de consórcios seria possível viabilizar a aplicação da incineração associada à digestão anaeróbia em mais áreas do estado, o que possibilitaria um aumento no potencial para geração elétrica. Dentre as alternativas avaliadas, obteve-se um maior nível de emissões evitadas com o uso da compostagem associada a reciclagem. Pode-se constatar a importância de maiores taxas de reciclagem para adequação a economia circular e, assim, obter maiores benefícios de ordem ambiental.

Palavras-Chave: Resíduo Sólido Urbano, Economia Circular, tratamento de RSU, recuperação de energia.

ABSTRACT

A worldwide trend exists with the aim of changing from a linear economic system to a circular economy, which would promote the recirculation of products in a restorative system that is capable of reducing the need for new raw material extraction. Thus, the circular economy would allow minimization of environmental problems arising from the inadequate disposal of waste and of those related to the scarcity of resources. In Brazil, an increase in the generation of solid urban waste is occurring and will be maintained in the coming years, which should provide the impetus for allowing implementation of waste energy recovery technologies (WtE). However, minimal knowledge in the different states of Brazil about the energy, economic, and environmental benefits that can be achieved with the implementation of WtE technologies in waste management still exists. In this sense, the present work involved a study in the state of Minas Gerais, the second most populous one in Brazil, in which technological alternatives were evaluated for the treatment and energy recovery of urban solid waste in a circular economic context. Different technologies that use thermochemical and biochemical routes were evaluated with respect to energetic and economic aspects in order to determine their technical and economic viability according to the population of the state's municipalities. The different treatment alternatives were evaluated under the concept of a circular economy and in terms of avoided emissions. Finally, the possibility of forming consortia among municipalities was evaluated. Find out if a scenario in which it is used as economic alternatives and with greater generation of electricity in each population group studied, it is possible to generate a total of 2,869,666 MWh per year and a reduction of 84% in the final selection of consumption in landfill. With an assumption of application of consortia across the state, an electrical generation of 6,651,349 MWh per year was estimated and an 82% reduction in the landfill waste reserve. With the formation of consortia, it would be possible to implement an incineration application associated with anaerobic digestion in more areas of the state, or that would allow an increase without potential for electrical generation. Among the available alternatives, select a maximum avoided level with the use of the composition associated with recycling. It can be seen the importance of higher recycling rates to adapt to the circular economy and, thus, obtain greater environmental benefits.

Keywords: Municipal Solid Waste, Circular Economy, MSW treatment, energy recovery.

SUMÁRIO

1. Introdução	1
1.1 Justificativa.....	3
1.2 Objetivos	6
1.2.1 Objetivo geral	6
1.2.2 Objetivos específicos	6
2. Revisão Bibliográfica.....	7
2.1 Resíduos Sólidos Urbanos.....	7
2.1.1 Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos	8
2.1.2 Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil.....	9
2.1.3 Resíduos Sólidos Urbanos em Minas Gerais.....	11
2.2 Recuperação de energia a partir de resíduos sólidos	12
2.3 Tratamento bioquímico de resíduos	14
2.3.1 Gás de Aterro	14
2.3.2 Digestão Anaeróbia	16
2.3.3 Compostagem	20
2.4 Tratamento termoquímico de resíduos	22
2.4.4 Incineração.....	22
2.4.5 Pirólise e gaseificação.....	27
2.6 Reciclagem	31
2.7 Economia Circular e Resíduos Sólidos Urbanos.....	33
2.7.1 Definições	33
2.7.2 Estudos e Aplicações da Economia Circular	35
2.7.3. Estrutura conceitual da relação entre meio ambiente, recuperação de energia e o sistema de economia circular.....	39
3. Metodologia	41
3.1 Dados sobre população e quantidade de resíduos gerada.....	43
3.2 Caracterização do RSU	44
3.3 Alternativas tecnológicas consideradas para o tratamento dos RSU	45
3.3.1 Compostagem	45
3.3.2 Digestão Anaeróbia	46
3.3.3 Incineração.....	47
3.3.4 Gaseificação.....	49
3.3.5 Gás de aterro	52

3.4 Cenários assumidos para o cálculo do potencial de geração de energia elétrica e compostagem	54
3.4.1 Cenário 1: Compostagem associada à reciclagem.....	55
3.4.2 Cenário 2: Digestão Anaeróbia e reciclagem	56
3.4.3 Cenário 3: Alternativa 1 - Incineração e reciclagem de metais e vidros	57
3.4.4 Cenário 3: Alternativa 2 - Incineração associada à reciclagem e à digestão anaeróbia	58
3.4.5 Cenário 3: Alternativa 3 - Incineração de plástico e papel, reciclagem de metais e vidros e digestão anaeróbia da fração orgânica	59
3.4.6 Cenário 4: Alternativa 1 - Gaseificação e reciclagem	60
3.4.7 Cenário 4: Alternativa 2 - Gaseificação associada à reciclagem de metais e vidros e à digestão anaeróbia	61
3.4.8 Cenário 4: Alternativa 3 - Gaseificação associada à reciclagem (todos os recicláveis) e à digestão anaeróbia	62
3.4.9 Cenário 5: Gás de Aterro	62
3.5 Resumo dos cenários	63
3.6 Avaliação Econômica.....	64
3.6.1 Levantamento de custos e receitas para a compostagem.....	64
3.6.2 Levantamento de custos e receitas para a digestão anaeróbia	65
3.6.3 Levantamento de custos e receitas para a incineração.....	65
3.6.4 Levantamento de custos e receitas para a gaseificação	67
3.6.5 Levantamento de custos e receitas para o gás de aterro com recuperação energética.....	68
3.6.6 Análise do VPL e da Taxa Interna de Retorno	69
3.7 Tecnologias selecionadas no contexto da economia circular	70
3.8 Análise de emissões evitadas	72
3.8.1 Dados assumidos no WARM.....	72
3.8.2 Alternativas para tratamento da fração orgânica	74
3.8.3. Alternativas para o tratamento da fração inorgânica	75
3.8.4 Emissões para a gaseificação.....	76
3.8 Consórcios	78
4. Resultados e discussão	81
4.1 População e quantidade de RSU produzida anualmente	81
4.2 Potencial de cada tecnologia	82
4.2.1 Quantidade de composto produzida com a compostagem.....	82
4.2.2 Produtos da Digestão Anaeróbia	83
4.2.3 Potencial energético para a incineração.....	84
4.2.4 Potencial energético para a gaseificação	87
4.2.5 Potencial energético a partir do gás de aterro	90

4.3 Potencial de aproveitamento energético e de produção de composto para cada cenário considerado.....	91
4.3.1 Produção de composto.....	91
4.3.2 Potencial para geração de energia elétrica.....	92
4.4 Avaliação Econômica.....	102
4.4.1 Avaliação econômica da compostagem – Cenário 1	102
4.4.2 Avaliação econômica para a digestão anaeróbia – Cenário 2.....	103
4.4.3 Avaliação econômica para a incineração: Cenário 3 – Alternativas 1, 2 e 3.....	104
4.4.4 Avaliação econômica para a gaseificação: Cenários 4 – Alternativas 1, 2, 3	107
4.4.5 Avaliação econômica para o gás de aterro – Cenário 5.....	112
4.5 Análise dos cenários.....	113
4.6 Modelos para aplicação da economia circular	115
4.7 Análise dos cenários com base na economia circular	119
4.8 Análise de emissões evitadas	121
4.9 Análises para o caso de implantação de consórcios	123
5. Conclusões	137
Referências.....	140
Apêndices.....	152
Apêndice A - Emissões de gases de efeito estufa por tonelada de diferentes tipos de resíduo para cada alternativa de tratamento assumidas no WARM.....	152

Lista de figuras

Figura 2.1: Destino dos resíduos sólidos ao longo dos anos. Fonte: elaborado a partir de Brasil (2018).	10
Figura 2.2: Estimativa de emissões no setor de Tratamento de resíduos no Brasil. Fonte: adaptado de Brasil (2016).	11
Figura 2.3: Conversão de energia e produtos gerados a partir de RSU. Fonte: Adaptado de Ogunjuyigbe et al. (2017).	13
Figura 2.4: Representação esquemática da coleta processamento e usos do biogás de aterro. Fonte: USEPA (2017).	15
Figura 2.5: Grupos tróficos envolvidos em processos anaeróbios. Fonte: Coleran (1991) apud Wellinger (2013).	16
Figura 2.6: Diagrama de fluxo da Digestão Anaeróbia. Fonte: adaptado de International (2005). ...	17
Figura 2.7: Fluxo de materiais para um processo típico de digestão anaeróbia. Fonte: Ostrem (2004).	18
Figura 2.8: Processo de incineração de RSU. Fonte: EPE (2014a).	22
Figura 2.9: Planta de incineração de RSU. Fonte: National Energy Education Development Project (2006) apud ENGEBIO (2010).	23
Figura 2.10: Capacidade média das plantas de incineração em diferentes países. Fonte: ISWA (2012).	24
Figura 2.11: Custo de implantação por tonelada em função da capacidade. Fonte: adaptado de Whiting (2013) e Stantec (2011).	25
Figura 2.12: Custo de operação por tonelada em função da capacidade. Fonte: adaptado de Whiting (2013) e Stantec (2011).	25
Figura 2.13: Mapa da Incineração de RSU no mundo. Fonte: Lu et al. (2017).	26
Figura 2.14: Representação de um processo de pirólise – 1: abastecimento de nitrogênio; 2: reator; 3: resfriamento; 4: separador; 5: purgador; 6: medidor de vazão de gás; 7: rotâmetro. Fonte: Artes (2013).	28
Figura 2.15: Fases do tratamento e aplicações da gaseificação. Fonte: Traduzido de Kirkels & Verbong (2011).	29
Figura 2.16: Etapas necessárias à realização da reciclagem. Fonte: Adaptado de Pavan (2010).	31
Figura 2. 17: Produtos e materiais baseados em nutrientes tecnológicos e biológicos em um sistema de economia circular. Fonte: Adaptado de EMF (2012).	34

Figura 2.18: Fases da metodologia de aplicação da Economia Circular. Fonte: traduzido de Levoso et al. (2020).	36
Figura 2.19: Estrutura conceitual da relação entre o sistema de economia circular, cadeias de suprimento em recuperação de energia e meio ambiente. Fonte: Traduzido de Pan et al. (2015).....	39
Figura 3.1: Fluxograma geral de atividades do trabalho.....	42
Figura 3.2: Fluxo de resíduos e produção de composto para o tratamento com compostagem.....	55
Figura 3.3: Fluxo de resíduos, produção de composto e biogás produzido para o tratamento com a digestão anaeróbia.....	56
Figura 3.4: Fluxo de resíduos para o tratamento com incineração para a composição gravimétrica de ABRELPE (2011).	57
Figura 3.5: Fluxo de resíduos com incineração para a composição gravimétrica de PMGIRS-BH (2016).	57
Figura 3.6: Fluxo de resíduos para o tratamento com incineração associada à reciclagem e à digestão anaeróbia.....	58
Figura 3.7: Fluxo de resíduos para o tratamento com incineração de papel e plástico associada à digestão anaeróbia.....	59
Figura 3.8: Fluxo de resíduos para o tratamento com a gaseificação.	60
Figura 5. 9: Fluxo de resíduos para o tratamento com a gaseificação associada à reciclagem de metais e vidros e à digestão anaeróbia.	61
Figura 3.10: Fluxo de resíduos para o tratamento com a gaseificação associada à reciclagem (todos os recicláveis) e à digestão anaeróbia.	62
Figura 3.11: Fluxograma para a recuperação energética com gás de aterro.	62
Figura 3.12: Fronteiras do sistema conforme a metodologia AM0025 para a gaseificação. Fonte: Adaptado de UNFCCC (2012).....	76
Figura 3.13: Consórcios hipotéticos de acordo com as microrregiões de Minas Gerais.	79
Figura 4.1: Mapa de classes populacionais.	81
Figura 4.2: Produção de composto produzida com a compostagem em função da população.	82
Figura 4.3: Produção de composto produzida com a digestão anaeróbia em função da população. .	83
Figura 4.4: Potência disponível e energia elétrica gerada anualmente em função da população.	84
Figura 4.5: Potência disponível e eletricidade anual gerada com a incineração com a composição média dos resíduos dos municípios brasileiros de ABRELPE (2011) e para a composição gravimétrica de PMGIRS-BH (2016).	85
Figura 4.6: Potência instalada e eletricidade gerada anualmente com a incineração de madeira, têxteis e couro.	86

Figura 4.7: Potência instalada e eletricidade gerada anualmente com a incineração de papel e plástico.	86
Figura 4.8: Potência disponível e energia elétrica gerada anualmente com a gaseificação de papel, matéria orgânica e plástico.....	87
Figura 4.9: Potência disponível e energia elétrica gerada anualmente com a gaseificação de papel, plástico e “outros”.....	88
Figura 4.10: Energia gerada anualmente com a gaseificação de “outros”.....	89
Figura 4.11: Potência disponível e a geração elétrica anual com o gás de aterro.....	90
Figura 4.12: Quantidade de compostos gerados anualmente nos cenários C2, C3 – A2, C3 – A3, C4 – A2, e C4 – A3.	92
Figura 4.13: Geração de energia elétrica anual para o Cenário 2.	93
Figura 4.14: Geração de energia elétrica anual para o Cenário C3 – A1.....	94
Figura 4.15: Geração de energia elétrica anual para o Cenário C3 – A2.....	95
Figura 4.16: Geração de energia elétrica anual para o Cenário C3 – A3.....	96
Figura 4.17: Geração de energia elétrica anual para o Cenário C4 – A1.....	97
Figura 4. 18: Geração de energia elétrica anual para o Cenário C4 – A2.....	98
Figura 4.19: Geração de energia elétrica anual para o Cenário C4 – A3.....	99
Figura 4.20: Geração de energia elétrica anual para o Cenário 5.	100
Figura 4.21: Potência disponível e energia elétrica total gerada anualmente em cada um dos cenários.	101
Figura 4.22: Comparativo entre os potenciais totais de cada cenário e cenário viável.....	115
Figura 4.23: Modelo de economia circular com compostagem e reciclagem do RSU.....	116
Figura 4.24: Modelo para economia circular com digestão anaeróbia e reciclagem do RSU.	117
Figura 4.25: Modelo com associação de tecnologias de tratamento térmico e biológico de RSU. a. associação com a compostagem; b. associação com a digestão anaeróbia.	118
Figura 4.26: Comparativo entre da redução máxima possível para cada cenário.....	119
Figura 4.27: Redução no depósito em aterro com o cenário de viável de maior redução.	120
Figura 4.28: Gráfico de emissões evitadas em cada cenário.....	122
Figura 4.29: Geração de energia elétrica anual para o Cenário C2 com a aplicação de consórcios.	124
Figura 4.30: Geração de energia elétrica anual para o C3 – A1 com a aplicação de consórcios.....	125
Figura 4.31: Geração de energia elétrica anual para o Cenário C3 – A2 com a aplicação de consórcios.....	126
Figura 4.32: Geração de energia elétrica anual para o Cenário C3-A3 com a aplicação de consórcios.....	127

Figura 4.33: Geração de energia elétrica anual para o Cenário C4 - A1 com a aplicação de consórcios.....	128
Figura 4.34: Geração de energia elétrica anual para o Cenário 4 - Alternativa 2 com a aplicação de consórcios.....	129
Figura 4.35: Geração de energia elétrica anual para o Cenário C4 - A3 com a aplicação de consórcios.....	130
Figura 4.36: Geração de energia elétrica anual para o Cenário C5 com a aplicação de consórcios.	131
Figura 4. 37: Comparativo entre o potencial para os cenários para o caso de consórcios.....	133
Figura 4.38: Redução no depósito em aterro em cada cenário com a implantação de consórcios. .	134
Figura 4.39: Emissões evitadas com cada cenário para o caso de formação de consórcios.	135

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Projetos MDL em aterros no estado do Minas Gerais. Fonte UNFCCC (2019a).....	12
Tabela 2.2: Dados para digestão anaeróbia de RSU por tipo de digestão. Fonte: PROBIOGAS (2015b).....	19
Tabela 2.3: Dados para o cálculo do investimento com digestão anaeróbia. Fonte: Fachagentur apud Remy (2018)	20
Tabela 2.4: Dados para avaliação econômica de planta de compostagem. Fonte: IPEA (2012).....	21
Tabela 2.5: Custos dos equipamentos e seções. Fonte: adaptado de Luz et al. (2015).....	30
Tabela 2.6: Indicadores de Energia Elétrica Economizada por reciclável (kWh/kg)	32
Tabela 3.1: Classificação dos municípios por faixa populacional	43
Tabela 3.2: Composição gravimétrica média dos municípios brasileiros. Fonte: ABRELPE (2011)	45
Tabela 3.3: Valores considerados para as variáveis no cálculo do potencial da digestão anaeróbia.	47
Tabela 3.4: PCI dos principais materiais que compõem o RSU. Fonte: EPE (2008)	48
Tabela 3.5: Composição gravimétrica considerada para os RSU. Fonte: PMGIRS-BH (2016)	48
Tabela 3.6: PCI do CDR. Fonte: Násner et al. (2017)	50
Tabela 3.7: Dados da fração outros utilizados no cálculo do PCI do CDR. Fonte: Adaptado de Henríquez (2016)	51
Tabela 3.8: Valores considerados para as variáveis no cálculo do potencial da gaseificação	51
Tabela 3.9: Valores de COD. Fonte: IPCC (1996)	52
Tabela 3. 10: Dados considerados para o cálculo do potencial com o gás de aterro	54
Tabela 3.11: PCI calculado para duas diferentes composições de RSU consideradas	58
Tabela 3.12: Siglas para cada cenário analisado	63
Tabela 3.13: Formas de tratamento consideradas em cada cenário e alternativa	63
Tabela 3.14: Custo de equipamentos que compõem o sistema para aproveitamento energético. Fonte adaptado de CETESB (2006).....	68
Tabela 3.15: Valores considerados para a determinação do número de drenos conforme o porte do aterro	68
Tabela 3.16: Número de drenos para cada tipo de aterro.....	69
Tabela 3.17: Matriz energética do Brasil e do estado de Washington nos EUA	73
Tabela 3.18: Aspectos assumidos no modelo WARM para quantificação das emissões com as soluções para tratamento da fração orgânica do RSU. Fonte: adaptado de USEPA (2019b).....	74

Tabela 3.19: Aspectos assumidos no modelo WARM para quantificação das emissões com as soluções para tratamento da fração inorgânica do RSU. Fonte: adaptado de USEPA (2019b).....	75
Tabela 3.20: Dados assumidos para o cálculo de emissões relativas à combustão na gaseificação ..	77
Tabela 3.21: Número de microrregiões por faixa populacional.....	80
Tabela 4.1: Quantidade de resíduos gerada anualmente por cada faixa populacional.....	81
Tabela 4.2: Taxa de geração de energia elétrica por cada tecnologia.....	91
Tabela 4.3: Capacidade das plantas de compostagem em função da população	102
Tabela 4.4: Resultados da avaliação econômica da compostagem - Cenário C1	103
Tabela 4.5: Potência instalada, produção de composto e energia gerada com a digestão anaeróbia	103
Tabela 4.6: Resultados da avaliação econômica da digestão anaeróbia - Cenário C2.....	104
Tabela 4.7: RSU disponível para tratamento, capacidade da planta de incineração e energia gerada em função da população para o Cenário C3 – A1.....	104
Tabela 4.8: Resultados da avaliação econômica da incineração conforme o Cenário C3 – A1	105
Tabela 4.9: RSU disponível para tratamento em cada planta, capacidade da planta de e energia gerada em função da população conforme Cenário C3 – A2	105
Tabela 4.10: Resultados da avaliação econômica da incineração conforme o Cenário C3 – A2	106
Tabela 4.11: RSU disponível para tratamento em cada planta, capacidade da planta de incineração e energia gerada em função da população conforme Cenário C3 – A3.....	106
Tabela 4.12: Resultados da avaliação econômica da incineração conforme o Cenário C3 – A3	107
Tabela 4.13: Capacidade para a unidade de processamento primário da planta conforme Cenário C4 – A1	107
Tabela 4.14: Número de unidades de tratamento mecânico para a gaseificação conforme o Cenário C4 – A1	108
Tabela 4.15: Número de unidades de gaseificação e de geração conforme o Cenário C4 - A1	108
Tabela 4.16: Resultados da avaliação econômica da gaseificação conforme o Cenário C4 – A1 ...	108
Tabela 4.17: Número de unidades de tratamento mecânico para a gaseificação conforme o Cenário C4 - A2.....	109
Tabela 4.18: Número de unidades de gaseificação e de geração conforme o Cenário C4 - A2	109
Tabela 4.19: Resultados da avaliação econômica da gaseificação conforme o Cenário C4 - A2 ...	110
Tabela 4.20: Número de unidades de tratamento mecânico para a gaseificação conforme o Cenário C4 - A3.....	110
Tabela 4.21: Número de unidades de gaseificação e de geração conforme o Cenário C4 - A3	111
Tabela 4.22: Resultados da avaliação econômica da gaseificação conforme o Cenário C4 - A3 ...	111
Tabela 4.23: Número de drenos conforme a capacidade do aterro	112

Tabela 4.24: Potência, energia gerada, valor do investimento e o custo de operação e manutenção para o aproveitamento energético do gás de aterro – Cenário C5	112
Tabela 4.25: Resultado da avaliação econômica com a gaseificação – Cenário C5.....	113
Tabela 4.26: Comparativo entre os potenciais de geração em cada cenário, com as faixas de viabilidade de aplicação	113
Tabela 4.27: Potencial para o cenário viável	114
Tabela 4.28: Cenário mais viável para a redução na disposição em aterros	120
Tabela 4.29: Emissões para o Caso Base	121
Tabela 4.30: Comparação da energia elétrica gerada em cada cenário com destaque as faixas viáveis destacadas.....	132
Tabela 4.31: Potencial máximo viável de acordo com a população das microrregiões.....	132
Tabela 4.32: Cenário mais viável para a redução na disposição em aterros	134
Tabela 4.33: Energia gerada com o cenário de maior redução de RSU depositado em aterro	134

Abreviaturas

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

ACV – Avaliação do Ciclo de Vida

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Matriz de energia elétrica

CDR – Combustível Derivado de Resíduo

CE – Comissão Europeia

DA – Digestão anaeróbia

DEA – *Data Envelopment Analysis*

EC – Economia Circular

EUA – Estados Unidos da América

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente

GEE – Gases de efeito estufa

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

MCI – Motor de combustão Interna

MDL – Mecanismo de Desenvolvimento Limpo

NEST – Núcleo de Excelência em Geração Termelétrica e Distribuída

ONU – Organização das Nações Unidas

PIB – Produto Interno Bruto

PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos

RSU – Resíduo Sólido Urbano

SNIS – Sistema Nacional de informações Sobre Saneamento

TIR – Taxa Interna de Retorno

UE – União Europeia

UNFCCC – *United Nations Framework Convention on Climate Change*

USEPA – *United States Environmental Protection Agency*

VPL – Valor Presente Líquido

WARM – *Waste Reduction Model*

WtE – *Waste to energy*

Símbolos

CAD – Dólar canadense

$C_{O\&M}$ – Custo de operação e manutenção

CO116 – Quantidade de resíduos domésticos e públicos coletada pelo agente público

CO117 – Quantidade de resíduos domésticos e públicos coletada pelos agentes privados

CO142 – Quantidade de resíduos domésticos e públicos coletada por outros agentes executores

CO_2 – Dióxido de Carbono

CO_{2eq} – Dióxido de Carbono equivalente

COD – carbono orgânico degradável

COD_f – fração de COD dissociada

CS048 – Quantidade recolhida na coleta seletiva executada por associações ou cooperativas de catadores com parceria/apoio da Prefeitura

E – Energia elétrica gerada

η – Eficiência

E_{col} – Eficiência de coleta do biogás

F – Fração de metano no biogás

FD – Fator de disponibilidade

FCM – Fator de correção de metano

i – taxa de desconto

I – Investimento inicial

I_{BG} – Quantidade média de biogás produzido

IN021 – Índice de massa coletada

L_0 – Quantidade de metano gerada anualmente

\dot{m}_{CDR} – Vazão mássica de CDR

\dot{M}_{RSU} – Vazão mássica de RSU

MJ – Megajoule

$MtCO_{2eq}$ – Toneladas métricas de CO_{2eq}

MW – Megawatt

MWh – Megawatt-hora

PCI – Poder calorífico inferior

PCS – Poder calorífico superior

P_L – Potência disponível

Pop. Urb. – População Urbana

\dot{Q}_{BG} – Vazão de biogás

\dot{Q}_{col} – Quantidade de Biogás coletada em um ano

RDO – Resíduos Domésticos

R_o – Resíduo sólido orgânico gerado

RPU – Resíduos Públicos

U – Umidade

1. Introdução

Conforme dados de 2017 da Organização das Nações Unidas, a população mundial em meados de 2017 era de 7,6 bilhões de pessoas, em 2030 deverá atingir 8,6 bilhões, 9,8 em 2050 e 11,2 bilhões em 2100 (ONU, 2017). Uma das consequências imediatas do crescimento populacional é o aumento na geração de Resíduo Sólido Urbano (RSU). Nos últimos 30 anos, o lixo produzido no mundo foi três vezes maior que o crescimento populacional (EOS CONSULTORES, 2018).

No Brasil, em 2018, foram geradas 79 milhões de toneladas de RSU. Desse montante, 92% (72,7 milhões) foram coletados e 6,3 milhões de toneladas de resíduos ficaram sem ser recolhidos nas cidades. Do total de resíduos coletados 59,5% foi destinado a aterros sanitários e o restante 40,5% foi despejado em locais inadequados por 3.001 municípios (ABRELPE, 2019a).

A tendência no crescimento na geração de RSU no país deve ser mantida nos próximos anos e algumas estimativas mostram que o Brasil alcançará uma geração anual de 100 milhões de toneladas por volta de 2030 (AGENCIA BRASIL, 2019), o que demonstra a necessidade de implementar estratégias adequadas de gestão para a coleta e recuperação energética dos resíduos produzidos.

No Brasil tem-se como marco regulatório a Lei 11.345/2007, que estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico e para a política federal de saneamento básico (BRASIL, 2007) e, ainda, a Lei Federal 12.305/2010 que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS - (BRASIL, 2010). A PNRS no Capítulo II, XI, define gestão integrada de resíduos sólidos: “[...] o conjunto de ações voltadas para solucionar o problema dos resíduos sólidos, de forma a considerar as dimensões política, econômica, ambiental, cultural e social, com controle social e sob a premissa do desenvolvimento sustentável [...]”.

A legislação produziu nos últimos anos uma melhora quantitativa e qualitativa na cobertura de coleta de lixo no Brasil. O avanço, contudo, foi bem menor do que o necessário porque ainda existe um grande número de pessoas não atendidas por serviços de coleta, e o setor apresenta déficits consideráveis em relação à coleta seletiva, recuperação de materiais e disposição dos resíduos sólidos (ABRELPE, 2019b). Assim enquanto o mundo avança em direção a um modelo mais moderno e sustentável de gestão de resíduos, o Brasil continua apresentando as deficiências verificadas há vários anos, ficando abaixo dos indicadores médios de nações da mesma faixa de renda e desenvolvimento (ABRELPE, 2019a).

Percebe-se no mundo uma tendência por ações que visam práticas voltadas para sustentabilidade, como no caso do surgimento do conceito de economia circular. Este conceito refere-se a um sistema que tem o propósito de ser restaurativo ou regenerativo, com o objetivo de minimizar, rastrear e eliminar o uso de produtos químicos tóxicos; utilizar energia renovável e erradicar o desperdício

(EMF, 2012). Além desses propósitos, também é necessário incentivar a fabricação de produtos que não se transformem em resíduos e, em conjunto com isto, a solução mais racional para o manejo do resíduo deve ser a sua valorização focada em reduzir a necessidade de novas matérias-primas (IAQUANIELLO, 2018).

De acordo com a Comissão Europeia (COM, 2015a) a gestão de resíduos tem um papel central na economia circular já que determina o modo como é posta em prática a hierarquia de resíduos e esta hierarquia determina uma ordem de prioridade, que se inicia com a prevenção, passando pela preparação para a reutilização, a reciclagem e a recuperação de energia, até a disposição final. A transformação de resíduos em energia pode desempenhar um importante papel dentro da economia circular e fomentar padrões sustentáveis de consumo e produção (MALINAUSKAITE, et al., 2017).

No Brasil a legislação pertinente, a Lei 12.305/ 2010 em seu Artigo 9º, estabelece uma ordem para o gerenciamento de resíduos sólidos semelhante à da Comissão Europeia, ou seja, não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final dos rejeitos de modo ambientalmente adequado. Acerca da recuperação de energia, a lei supracitada traz em seu Artigo 9º § 1º que as tecnologias para recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos poderão ser utilizadas, desde que comprovada sua viabilidade técnica e ambiental e que haja a implantação de programa de monitoramento de emissão de gases tóxicos aprovado pelo órgão ambiental.

Dentro desse contexto, o dado populacional é de grande relevância para a quantificação do RSU gerado, pois isto possibilita avaliar quais são as técnicas mais adequadas para o tratamento dos resíduos em uma dada região. No que diz respeito à possibilidade de maior difusão da economia circular no contexto brasileiro, o presente trabalho visa avaliar as alternativas tecnológicas para o tratamento dos resíduos sólidos urbanos no estado de Minas Gerais, o qual, conforme o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2010), é o segundo estado mais populoso do país com pouco mais de 19,5 milhões de habitantes e é, também, o que possui maior número de municípios.

Desta forma, o estudo visa estimar o potencial de tecnologias de tratamento dos resíduos e a viabilidade para aplicação destas tecnologias por meio da classificação dos municípios por faixas populacionais para, assim, definir cenários e alternativas viáveis em cada uma delas. As alternativas foram levantadas visando a combinação de tecnologias de tratamento com a reciclagem e, conseqüentemente, foram identificadas aquelas mais adequadas no contexto da economia circular. Por fim, avaliou-se as alternativas de tratamento sob o aspecto de potencial para redução de emissões. Além disto, o trabalho avalia, sob as mesmas condições, o uso de consórcios na gestão do RSU, ou seja, quais os efeitos da aplicação destes sobre o potencial, sobre a viabilidade para aplicação das tecnologias e como podem favorecer a transição para uma economia circular.

1.1 Justificativa

Atualmente são produzidas no mundo 2,01 bilhões de toneladas de resíduos por ano, gerando uma quantidade de 1,6 bilhões de toneladas de emissões de dióxido de carbono equivalente ($\text{CO}_{2\text{eq}}$) nos sistemas de gerenciamento de resíduos sólidos, segundo estimativas realizadas no ano de 2016. Prevê-se que os resíduos aumentem para um valor de 3,40 bilhões de toneladas e as emissões associadas a eles para um valor de 2,6 bilhões de $\text{tCO}_{2\text{eq}}$ (KAZA, et al., 2018).

Mais de 80 países comprometidos com a redução de emissões através do histórico Acordo de Paris de 2017 concordaram que a melhora dos sistemas de gestão de resíduos é uma maneira de contribuir para o esforço global de redução de emissões.

Além das emissões de dióxido de carbono (CO_2) outros efeitos decorrentes da gestão inadequada de resíduos é a inutilização do solo, contaminação de fontes de água, poluição do ar e a redução da qualidade de vida das pessoas que habitam as regiões próximas pela proliferação de doenças e pragas. Por estas razões, faz-se necessário incluir numa agenda de desenvolvimento sustentável a gestão adequada dos resíduos. Desta forma, a gestão de resíduos é um dos principais fatores para a transição de uma economia linear para uma economia circular.

Na América Latina aproximadamente 90% dos resíduos coletados são destinados a locais de descarte, sejam aterros ou lixões, ou seja, não são reaproveitados nem reciclados. Esse sistema se mostra insustentável, uma vez que nos resíduos tem-se recursos que podem ser reutilizados como fontes de matéria-prima ou de energia podendo substituir o uso de combustíveis fósseis (ONU, 2018).

A respeito da utilização da reciclagem ou da recuperação energética, diversas pesquisas apontam que a reciclagem tem se mostrado a alternativa preferencial com relação a recuperação energética ao redor do mundo (KUMAR & SAMADDER, 2017). Alguns trabalhos destacam que estas formas de aproveitamento do RSU podem ser empregadas de forma conjunta em uma dada região. Conforme Achillas et al. (2011), tem-se que os países que apresentam alta taxa de recuperação de energia a partir de resíduos apresentam, também, taxas consideráveis de reciclagem, enquanto que, para os países em desenvolvimento onde o aterro sanitário é a opção de gestão de resíduos mais prevalente, as taxas de reciclagem foram baixas. A partir disto, nota-se que as alternativas não são excludentes ou competem entre si.

A reciclagem de resíduos é hoje em dia é uma das estratégias de sustentabilidade urbana, já que através dela é possível proporcionar benefícios ambientais, sanitários, sociais e econômicos na sociedade. Através dela, é possível reduzir o uso de matérias-primas novas nos processos produtivos e a quantidade de resíduos transportados para aterros ou sistemas de recuperação energética e, nos países em desenvolvimento, são criadas oportunidades de emprego e renda. No entanto, apesar de sua

relevância, ela ainda não está plenamente incorporada nos sistemas de gestão de resíduos em todo o mundo.

No Brasil, apenas 32% das cidades possuem programas ativos de reciclagem e menos de 12% dos materiais potencialmente recicláveis são coletados, apresentando taxas semelhantes a outros países em desenvolvimento, como Rússia (11%), China (20%) e África do Sul (10%), mas menor do que aqueles com economias semelhantes, como Itália (43%), França (40%) ou Canadá (32%) (CONKE, 2018). Nesse contexto, diferentes trabalhos têm realizado avaliações energéticas da implementação de tecnologias WtE nos sistemas de gestão de resíduos no Brasil (Násner, 2015 e Marsiglia, 2019) e em outros lugares do mundo (GÓMEZ et al., 2010). Outros têm realizado avaliações econômicas (LUZ, 2013; REMY, 2018 e DOS SANTOS, 2020) e a avaliação ambiental das tecnologias (LEME, 2010).

A realização de novos estudos capazes de demonstrar a importância do tratamento de resíduos tem papel importante para a determinação de alternativas menos impactantes e capazes de promover ganhos econômicos e sociais. Com isso, os estudos devem apontar, assim como a PNRS, as práticas mais adequadas para destinação do RSU.

Para resolver simultaneamente o dilema da demanda de energia, gerenciamento de resíduos e emissão de gases de efeito estufa no mundo, a cadeia de suprimento de resíduos em energia (WtE) deve ser um método viável para a economia industrial circular.

Dentro deste contexto, percebe-se uma tendência em adotar ações voltadas a implantação de um sistema restaurativo, ou seja, a substituição de um modelo de economia linear por uma economia circular, à exemplo do que é visto na Europa e China (RADA et al., 2017; MALINAUSKAITE, et al., 2017; JOSEPH et al., 2018). Conforme mostra o trabalho de Henríquez (2016), alguns países da Europa, como Alemanha, Áustria, Bélgica, Holanda, Suíça, Suécia, Dinamarca e Noruega encaminham pelo menos 50% dos resíduos para a reciclagem e para a compostagem, estes países somam, ainda, 228 plantas térmicas para geração de energia a partir de resíduos o que corresponde à metade de todas as plantas na Europa. Com isso, conseguem reduzir a disposição de RSU em aterros.

Além de possibilitar menor disposição de resíduos em aterros, a partir do conceito de economia circular, tem-se a possibilidade de atenuar os problemas com escassez de recursos para a produção de insumos e produtos, sabendo-se que estes recursos disponíveis no planeta são finitos. No Brasil ainda não há um número expressivo de estudos acerca do tratamento do RSU no contexto da economia circular. Com isto, o trabalho visa levantar os benefícios de alternativas de tratamento de resíduos quanto a redução da disposição final inadequada, da recuperação de energia, ganhos ambientais (emissões evitadas), onde são priorizadas as alternativas que mais se enquadram no conceito de economia circular.

A região de estudo escolhida para as análises é o estado de Minas Gerais que, conforme mencionado anteriormente, é o segundo mais populoso do país. Com isso, o diferencial do trabalho

está em analisar a aplicação da economia circular aliada às alternativas tecnológicas de tratamento de RSU, com as análises conduzidas sobre o aspecto de potencial de aplicação das alternativas, viabilidade econômica para aplicação e análise ambiental quanto as emissões evitadas em cada caso proposto. Isto permite verificar as possibilidades de ganhos alcançados com uma transição para uma economia circular, inclusive do ponto de vista sustentável, levando-se em conta os dados populacionais do estado de Minas Gerais. Além disso, o trabalho visa inserir este conceito de economia no contexto brasileiro, tendo em vista as características do RSU gerado.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar sobre aspectos energéticos, econômicos e ambientais diferentes alternativas tecnológicas para o tratamento dos resíduos sólidos urbanos (RSU) no estado de Minas Gerais em um contexto de economia circular.

1.2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar e classificar as cidades do estado de Minas Gerais em função de seu tamanho populacional e estabelecer, com base em microrregiões do estado, a formação de consórcios municipais.
- Caracterizar através de informações bibliográficas os resíduos sólidos urbanos produzidos.
- Definir as tecnologias que serão utilizadas nos sistemas de gestão municipal de resíduos baseados em rotas bioquímicas e termoquímicas de conversão.
- Calcular os potenciais energéticos disponíveis com as diferentes tecnologias de recuperação energética.
- Avaliar economicamente as tecnologias que podem ser implementadas através do VPL e TIR a fim de determinar a viabilidade financeira de aplicação dos sistemas.
- Criar e avaliar modelos de economia circular com o uso de tecnologias de tratamento de RSU que podem ser implementados.
- Avaliar os benefícios da aplicação do modelo de economia circular nos casos assumidos, quanto a geração de energia, através do indicador de redução da disposição de RSU em aterro e com a análise de emissões.
- Destacar as opções de tratamento que possam promover reduções significativas na quantidade de resíduos depositados em aterro.
- Verificar as possibilidades de aplicação de consórcios a fim de verificar as possibilidades de aplicação das diferentes tecnologias.

2. Revisão Bibliográfica

2.1 Resíduos Sólidos Urbanos

Os Resíduos Sólidos são definidos na Lei Federal nº12.305/2010 (BRASIL, 2010) como material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas, cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, e também, gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou que exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível.

As diferentes definições dadas aos Resíduos Sólidos urbanos visam caracterizá-los de modo a diferenciá-los de outros termos, como rejeitos. Além da Lei Federal nº12.305/2010, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) também traz na NBR 10004/2004 (ABNT, 2004) uma definição para resíduos sólidos, onde são caracterizados nesta como os resíduos nos estados sólido e semissólido, resultantes de atividades de origem industrial, agrícola, comercial, hospitalar, doméstica, de serviços e de varrição. Inclui-se na definição da norma os lodos resultantes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição.

A Lei Federal nº12.305/2010 institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que fortalece os princípios da gestão integrada e sustentável de resíduos. Propõe medidas favoráveis à formação de consórcios públicos para a gestão regionalizada de modo a promover redução de custos devido ao compartilhamento de sistemas de coleta, tratamento e destinação de resíduos sólidos. A política propõe no país a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos e a logística reversa para retorno de produtos, a prevenção, precaução, redução, reutilização e reciclagem, disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos em aterros sanitários, bem como uma série de medidas no âmbito da sustentabilidade (JACOB & BESEN, 2011).

Diversos problemas ambientais estão associados a produção de resíduos, a grande variedade e quantidade significativa de poluentes gerados causam preocupação. É necessário que se busque um controle sobre o descarte de materiais que contenham determinados poluentes, que em alguns casos não possuem um tratamento específico. Cabe, então, buscar técnicas ambientais adequadas para o gerenciamento de resíduos sólidos a partir de soluções alternativas frente aos problemas ambientais causados por esses materiais. (PERAZZINI et al., 2016).

Como forma de adequação à PNRS, que proíbe o aterramento integral dos resíduos e incentiva ações de logística integrada com vistas ao reaproveitamento de materiais e seus potenciais energéticos, tem-se a utilização de soluções tecnológicas para o tratamento das diferentes frações

reaproveitáveis do RSU (PROBIOGÁS, 2016). Neste sentido pode-se destacar, por exemplo, as tecnologias para recuperação energética, a aplicação da reciclagem e o tratamento da porção orgânica do RSU em plantas de biodigestão como formas de atingir o que a lei estabelece.

2.1.1 Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos

A gestão de Resíduos Sólidos é enfrentada de maneira diferente pelos países ao redor do mundo e o sucesso dessa gestão é limitado por alguns fatores. Em países mais ricos geram-se maiores quantidades de resíduos, contudo a gestão é tratada com atenção. Nestes lugares a questão ambiental recebe maior atenção, há mais disponibilidade de recursos econômicos e desenvolvimento tecnológico. Em países em desenvolvimento com urbanização muito acelerada, nota-se que há déficits na capacidade financeira e administrativa, o que dificulta a promoção de diversos serviços essenciais como a coleta e destinação adequada do lixo e, por consequência, dificulta garantir segurança e controle da qualidade do ambiente para a população (JACOBI & BESEN, 2011).

No Brasil, a Lei nº 12305 de 2010 em seu Artigo 3º, Inciso X, define o gerenciamento de resíduos sólidos como o conjunto de ações exercidas, direta ou indiretamente, nas etapas de coleta, transporte, transbordo, tratamento e destinação final dos resíduos de sólidos de forma ambientalmente adequada bem como disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, de acordo com plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos ou com plano de gerenciamento de resíduos sólidos.

A escolha mais adequada no gerenciamento do RSU deve levar em conta diversos fatores a começar pela legislação local. O Artigo 9º da Lei 12.305/2010 estabelece a seguinte ordem de prioridade para o gerenciamento: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final dos rejeitos de modo ambientalmente adequado. É preciso observar, também, os critérios de viabilidade técnica, econômica e ambiental para os projetos de aproveitamento energético, bem como trata o Artigo 9º em seu § 1º da mesma lei.

Dentro do aspecto gestão de resíduos tem-se buscado alternativas mais sustentáveis e neste contexto tem-se o termo Gestão Integrada de Resíduos Sólidos. O termo refere-se a um processo no qual considera-se uma ampla participação dos setores da sociedade visando conceber, implementar e administrar sistemas de manejo de resíduos sólidos urbanos de modo a se buscar maior sustentabilidade (MESQUITA JÚNIOR, 2007). Assim, na gestão integrada a opinião pública é um fator importante na decisão da melhor alternativa tecnológica a ser utilizada em uma determinada região, pois há impactos durante a implantação e, também, no processo de operação de uma instalação sobre a população dos arredores como, por exemplo, instalações que possam causar algum dano como emissão de dioxinas, furanos, gases ácidos e metais pesados (Leme et al., 2014).

Além da viabilidade técnica, econômica e da opinião pública, outro fator a ser analisado é quanto ao nível de emissões e a capacidade que as formas de manejo têm de mitigar o problema. Sabe-se que o aumento da geração de resíduos faz com que haja maior possibilidade de geração de gases de efeito estufa, se estes forem convenientemente tratados, podem levar à obtenção de certificados de redução da emissão que podem ser vendidos através de negociações no “mercado de carbono”. As Reduções Certificadas de Emissões (RCEs) são documentos emitidos pelo Conselho Executivo da *United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC) no âmbito do Protocolo de Quioto e certificam que um projeto foi capaz de produzir absorção de gás carbônico ou a redução de emissão de gases de efeito estufa através do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MESQUITA JÚNIOR, 2007).

O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), prevista pelo artigo 12 do Protocolo de Quioto, é um instrumento que permite que os projetos de redução de emissões nos países em desenvolvimento obtenham créditos de redução de emissão certificada, cada um equivalente a uma tonelada de Dióxido de Carbono (CO₂), os créditos de carbono podem ser comercializadas e usadas pelos países industrializados para cumprir uma parte de suas metas de redução de emissões sob o Protocolo de Kyoto (UNFCCC, 2019).

Dentro da tarefa de gestão de resíduos, é preciso, então, visar a sustentabilidade e buscar os melhores meios para que a legislação possa ser cumprida, uma vez que nem sempre isto ocorre, sabe-se que ainda há um percentual (estimado) bastante elevado de municípios com práticas inadequadas de disposição de resíduos no Brasil (BRASIL, 2108). Em muitos casos a falta de recursos para a implantação de projetos é um fator que restringe o cumprimento da lei, por isso, mecanismos como MDL podem ser importantes no incentivo às regiões menos favorecidas. Assim, a gestão de resíduos sólidos é algo que requer estudos acerca da melhor decisão a ser tomada em uma determinada região, uma vez que envolve questões ambientais, técnicas, econômicas e sociais.

2.1.2 Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil

O documento “Diagnóstico de Resíduos Sólidos” do SNIS de 2018 apontou elevada cobertura do serviço regular de coleta domiciliar para o Brasil no ano de 2016, idêntica às observadas em 2014 e 2015, igual a 98,6% da população urbana, o que representa um déficit de atendimento de aproximadamente 2,7 milhões de habitantes das cidades brasileiras, onde 21,8% destes são moradores da região Sudeste, 44,7% da região nordeste, 21,1 da região Norte e outros 12% divididos entre a região Sul e Centro-Oeste (BRASIL, 2018).

Quanto à disposição final a Figura 2.1 apresenta um gráfico que retrata a evolução das quantidades de resíduos domésticos (RDO) mais os resíduos públicos (RPU) destinados a lixões, aterros e unidades de triagem e compostagem nos anos de 2013 a 2016.

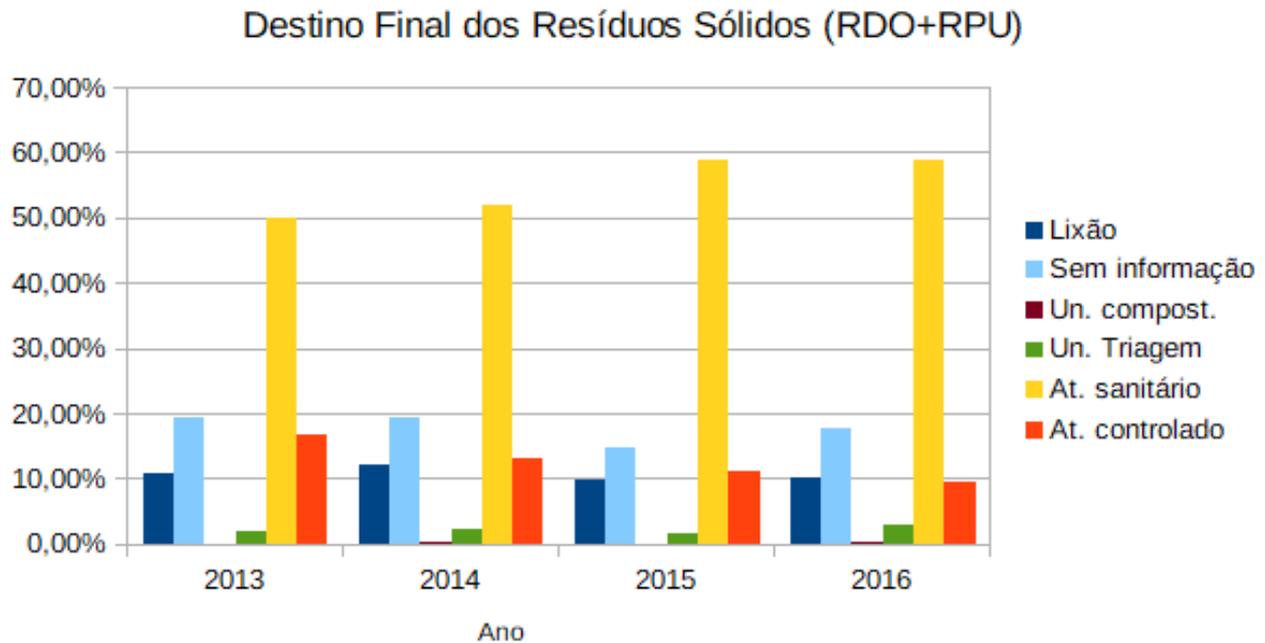


Figura 2.1: Destino dos resíduos sólidos ao longo dos anos. Fonte: elaborado a partir de Brasil (2018).

A Figura 2.1 mostra que em 2016 um percentual de aproximadamente 17% não apresenta informação, isto se refere aos pequenos municípios, ou seja, de até 30 mil habitantes se for admitido que $\frac{3}{4}$ desta parcela sem informação seja encaminhada para lixões, pode-se dizer que 66,8% da massa total coletada no país é disposta de forma adequada, em aterros sanitários, sendo o restante distribuído por destinações em lixões e aterros controlados (BRASIL 2018). Nota-se, ainda, a partir da Figura 2.1, que objetivo da PNRS - Lei nº 12.305/10 - de eliminar todos os lixões até o ano 2014 não foi alcançado.

A partir de estimativas, tem-se a variação das emissões relativas ao tratamento de resíduos sólidos ao longo dos anos no Brasil conforme a Figura 2.2. As emissões da disposição de resíduos sólidos, assim como, do tratamento de esgotos domésticos variam basicamente pelo aumento da população, onde para o caso da disposição de resíduos sólidos tem-se o fator crescimento pelo aumento da geração de lixo e o decréscimo por conta de implantação de projetos MDL no país desde 2004 (BRASIL, 2016).



Figura 2.2: Estimativa de emissões no setor de Tratamento de resíduos no Brasil. Fonte: adaptado de Brasil (2016).

Conforme visto anteriormente, os projetos MDL tem papel de reduzir emissões e, ainda, se mostra como uma forma de obtenção de recursos para implantação de projetos. Isto é importante haja visto a necessidade que o país ainda possui de evitar a destinação de resíduos para lixões, que se trata de uma alternativa ambientalmente inapropriada.

2.1.3 Resíduos Sólidos Urbanos em Minas Gerais

Para o Estado de Minas Gerais, de acordo com a Fundação João Pinheiro (FJP, 2017), em estudo apresentado para o ano de 2014, observou-se que 28,6% dos resíduos eram destinados a aterros controlados, 15,1% para aterros sanitários, 16,2% para unidades de triagem, 15,8% para unidades de compostagem, 18,6% para lixões, 1,6% para incineração sem aproveitamento energético, 0,6% para incineração com recuperação energética e os 3,1% restantes correspondiam a outras formas de destinação e a municípios que não responderam à pesquisa ou que não se sabe o destino final.

A partir do ano de 2011 o estado de Minas Gerais começou a registrar projetos MDL com mitigação de emissões por resíduos sólidos junto a UNFCCC. A Tabela 2.1 mostra os projetos de MDL no setor de resíduos sólidos, onde os três projetos que se encontram registrados até o momento são de aproveitamento de gás de aterro para a geração de energia, os registros se encontram em UNFCCC (2019a).

Tabela 2.1: Projetos MDL em aterros no estado do Minas Gerais. Fonte UNFCCC (2019a)

Projeto	Registrado	Município	Redução de emissões *	Ref. (UNFCCC)
CTRS / BR.040	4 de junho de 2011	Belo Horizonte	13160	3464
Uberlândia aterros I e II	12 de setembro de 2012	Uberlândia	99124	7110
Projeto Macaúbas				
Gás de Aterro	31 de julho de 2013	Sabará	377528	9063

* média anual dada em toneladas métricas de CO₂ equivalente por ano (MtCO₂eq./ano)

Minas Gerais é o estado com maior número de municípios, nota-se, no entanto, que no sentido de desenvolver projetos com capacidade de redução de emissões comprovada, o estado ainda possui poucos projetos UNFCCC (2019a). Assim, cabem mais estudos a fim de explorar o recurso energético do RSU como forma de promover a redução de emissões e diminuir a quantidade de resíduos depositados em aterros, que podem inclusive gerar receita aos municípios, haja vista o grande número de municípios que o estado possui.

Tanto no Brasil como em Minas Gerais ainda há um desafio no que diz respeito a melhorar a gestão dos resíduos sólidos urbanos de modo a deixar de utilizar a prática de disposição em lixões e, ainda, poder reverter benefícios com as práticas alternativas. Mesmo nos locais onde já existe um modo de disposição adequado de acordo com a legislação, cabem estudos para melhoria das instalações como, por exemplo, projetos de recuperação energética.

2.2 Recuperação de energia a partir de resíduos sólidos

As tecnologias de recuperação de energia a partir de Resíduo Sólido (*Waste to Energy* – WtE) têm recebido atenção e se tornado uma alternativa dentro dos sistemas de gestão de resíduos sólidos. O termo WtE é comumente associado à incineração, mas reúne diversas outras tecnologias que possibilitam a conversão de resíduos em energia, seja na forma de eletricidade, calor ou combustível (EUROPEAN COMMISSION, 2017). As tecnologias WtE devem ser implantadas de modo a promover a reutilização completa dos materiais e da energia contida nos fluxos de resíduos de forma sustentável e, neste contexto, a recuperação de gás de aterro, digestão anaeróbia, a incineração, a gaseificação e a pirólise têm atraído muita atenção (RAJAEIFAR et al., 2019). A Figura 2.3 ilustra as diferentes rotas tecnológicas para conversão energética a partir de RSU.

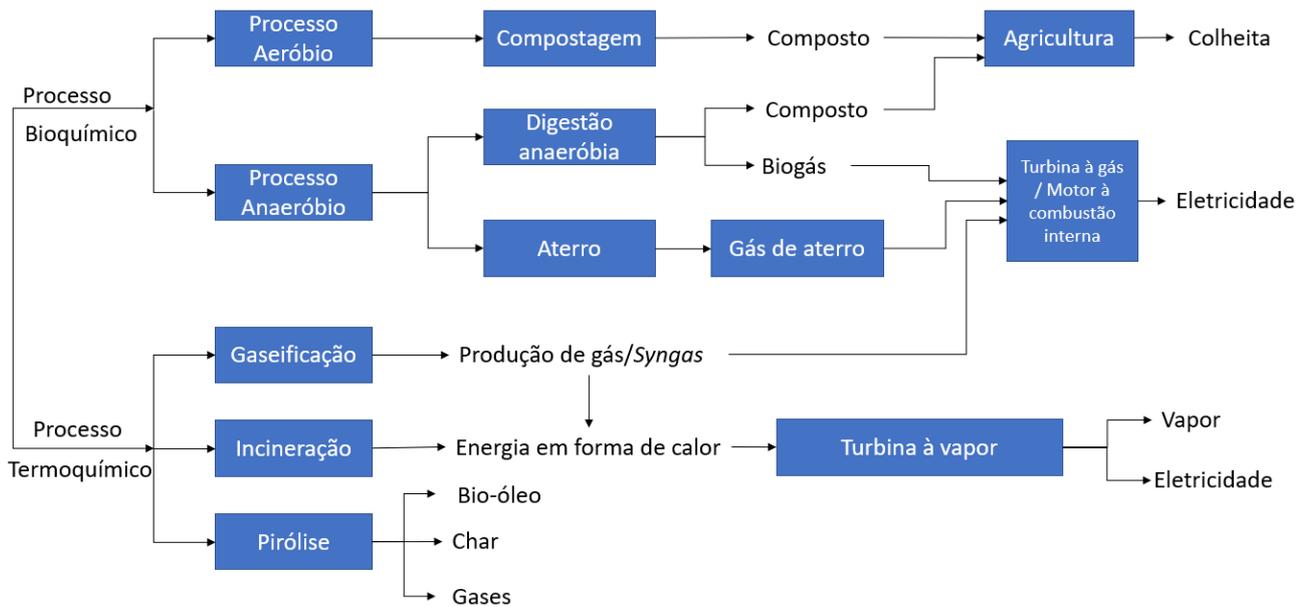


Figura 2.3: Conversão de energia e produtos gerados a partir de RSU. Fonte: Adaptado de Ogunjuyigbe et al. (2017).

As tecnologias são agrupadas em duas rotas, sendo uma bioquímica e outra termoquímica. O processo bioquímico consiste na decomposição biológica da porção orgânicos do lixo sob ação microbiana na presença de oxigênio (processo aeróbico) ou na ausência de oxigênio (anaeróbico), o processo termoquímico consiste na decomposição térmica da matéria produzindo, por exemplo, óleo combustível ou gás (OGUNJUYIGBE et al., 2017). Alguns autores, a exemplo de Ouda et al. (2016), trazem, ainda, a rota de conversão físico-química, cuja tecnologia correspondente é a transesterificação que é capaz de produzir biodiesel.

Conhecidas as opções de tecnologias para conversão de energia, as organizações, agências e governos devem optar pela mais adequada dentro da localidade. A escolha deve levar em conta alguns fatores como a energia disponível, o fluxo de resíduos da comunidade em questão, condições de financiamento, custos de capital e operacionais, disponibilidade de materiais, disponibilidade de terreno e, ainda, o nível de risco à comunidade ou ao operador da instalação (ROGOFF & SCREVE, 2011). Na Europa, as opções mais difundidas para melhorar o tratamento de resíduos são a incineração de resíduos em uma planta WtE e a digestão anaeróbica, a gaseificação apresenta-se mais favorável para implantação nos países do sul da Ásia (IEA, 2014).

No Brasil a Lei Federal nº12.305/2010 em seu Art. 9º § 1º, referente ao gerenciamento dos resíduos sólidos, institui que tecnologias visando à recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos poderão ser utilizadas desde que comprovadas sua viabilidade técnica e ambiental e que, ainda, haja a implantação de programa de monitoramento de emissão de gases tóxicos aprovado pelo órgão ambiental (BRASIL, 2010).

Atualmente o número de usinas de geração de energia a partir de RSU em operação no Brasil não é expressivo, tendo em visto o número de municípios que o país possui e o número de usinas que utilizam outras fontes de geração, como as que utilizam petróleo, potencial hidráulico ou potencial eólico, por exemplo. Alguns impasses impedem a melhor difusão desses tipos de usina no país, como questões políticas, pois observa-se que alguns se opõem a implantação de projetos de recuperação de energia por temerem que catadores percam sua fonte de renda (BANCO MUNDIAL, 2018). O número de usinas de geração em operação, que utilizam RSU como fonte é de 23, que somadas possuem uma capacidade instalada de aproximadamente 143 MW, destas, 21 funcionam a partir da produção de biogás e duas a partir do carvão (o qual é produzido a partir do RSU) (ANEEL, 2019).

2.3 Tratamento bioquímico de resíduos

2.3.1 Gás de Aterro

O gás gerado pela disposição de resíduos em aterro é composto principalmente de metano, dióxido de carbono e pequenas frações de amônia e sulfeto de hidrogênio (UNFCCC, 2018). Sabe-se, no entanto, que o metano é um gás com grande potencial de aquecimento global quando liberado para a atmosfera. Com isso, a recuperação do gás de aterro é uma alternativa importante na redução de emissão de gases poluentes e para países em desenvolvimento pode constituir uma fonte de receita ao gerar créditos de carbono no Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), do protocolo de Kyoto (TERRAZA et al., 2010; SILVA, 2017; BARROS et al., 2018).

Sabe-se que 66,8% da massa total de resíduos coletada no Brasil é destinada a aterros (BRASIL, 2018), com isso, a recuperação de gás de aterro seria uma boa alternativa para redução das emissões de poluentes para a atmosfera. O estado de Minas Gerais, por sua vez, possui três projetos de MDL com o aproveitamento de gás de aterro registrados junto a UNFCCC, que somados apresentam uma capacidade de redução de emissões de 476.652 MtCO₂eq./ano (UNFCCC, 2019a).

Os sistemas para recuperação do gás podem ser passivos ou ativos, ou seja, nos sistemas passivos tem-se a captura através de gradientes naturais de pressão, concentração e densidade; os sistemas ativos utilizam equipamentos mecânicos que fornecem o gradiente de pressão para captura (UNFCCC, 2018). O sistema de captura e as formas de uso do gás gerado no aterro são mostrados na Figura 2.4.

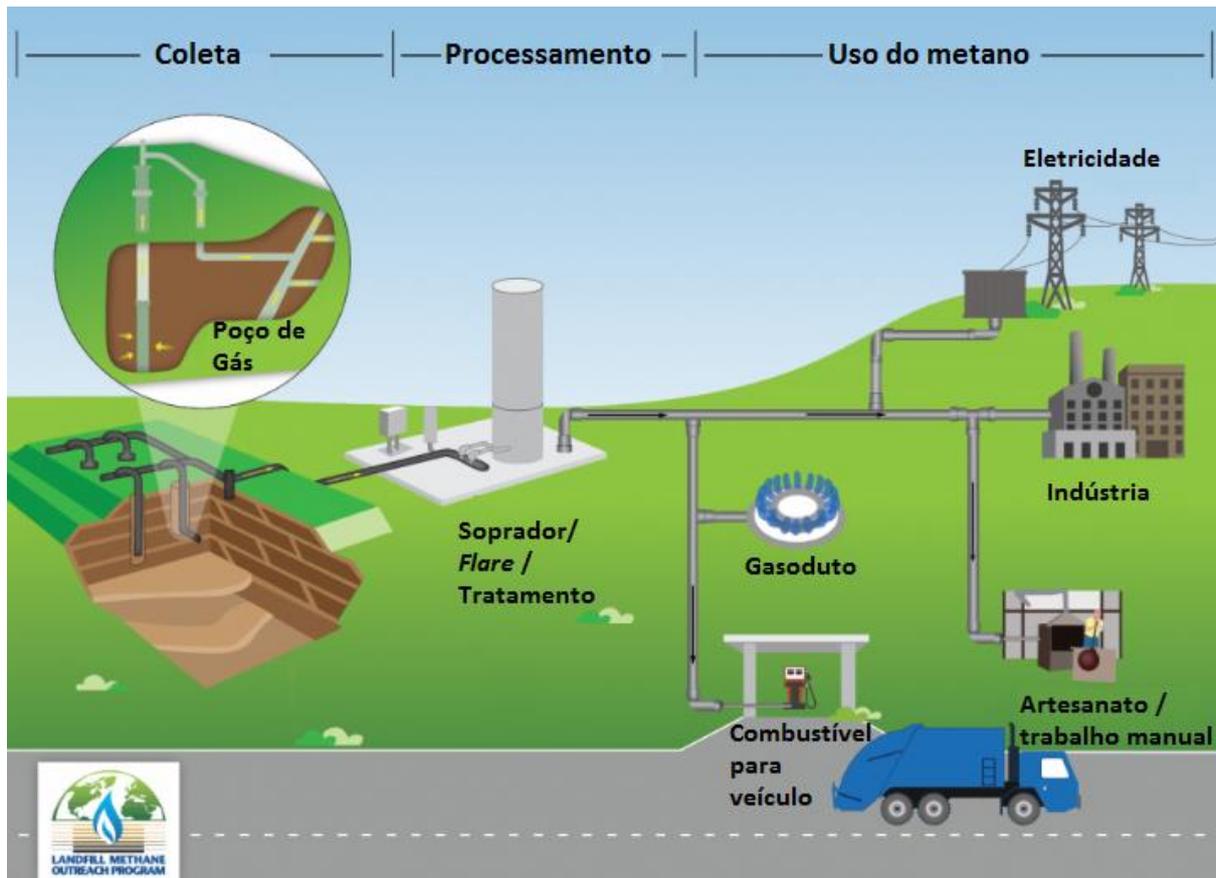


Figura 2.4: Representação esquemática da coleta processamento e usos do biogás de aterro. Fonte: USEPA (2017).

Desta forma, pela Figura 2.4, tem-se que o gás produzido no aterro (nas camadas do aterro) é capturado e conduzido ao processamento para tratamento, que ocorre por meio de tubulações verticais e horizontais que conduzem o gás. Os usos do biogás de aterro podem ser, então, para geração de eletricidade, uso industrial, em trabalhos manuais ou artesanais e, também, como combustível.

Quanto ao potencial e a viabilidade da geração de energia a partir da recuperação do gás de aterro, o trabalho de Barros et al. (2014) estimou uma geração de energia elétrica, entre 484,77 e 4.401,77 GWh para o ano de 2030 no Brasil. Além disso, o trabalho mostrou que seria necessário a formulação de políticas que incentivem esta alternativa de geração de energia no país afim de viabilizar projetos em locais com populações menores de 200.000 habitantes.

Apesar dos projetos de recuperação de energia a partir do biogás de aterro apresentarem capacidade de redução de emissões, conforme pode ser visto na Tabela 2.1, pode-se notar algumas desvantagens com a destinação de resíduos à aterros no que diz respeito à eficiência e custos. Os aterros sanitários apresentam problemas de manutenção e mão de obra, o custo de transporte e o aumento da população também podem dificultar na correta execução desta alternativa dentro da gestão de resíduos (SIPRA et al, 2018). Além disso, não é possível a captura total do gás de aterro de 100%, pois tem-se emissões fugitivas (JUNG et al., 2009; KENDALL, 2012; AMINI et al., 2013).

2.3.2 Digestão Anaeróbia

O processo de digestão anaeróbia promove a conversão da matéria orgânica em biogás e este, por sua vez, é composto de metano (50-70%) e dióxido de carbono (30-50%), sulfeto de hidrogênio também está contido no biogás em concentrações que variam conforme a característica da matéria-prima (WELLINGER, 2013). A matéria orgânica biodegradável é convertida em biogás após a passagem por quatro estágios: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (DIVYA et al., 2015).

As bactérias responsáveis pela digestão da matéria orgânica são agrupadas em diferentes níveis tróficos conforme a Figura 2.5, que também mostra os produtos em cada fase da decomposição da matéria.

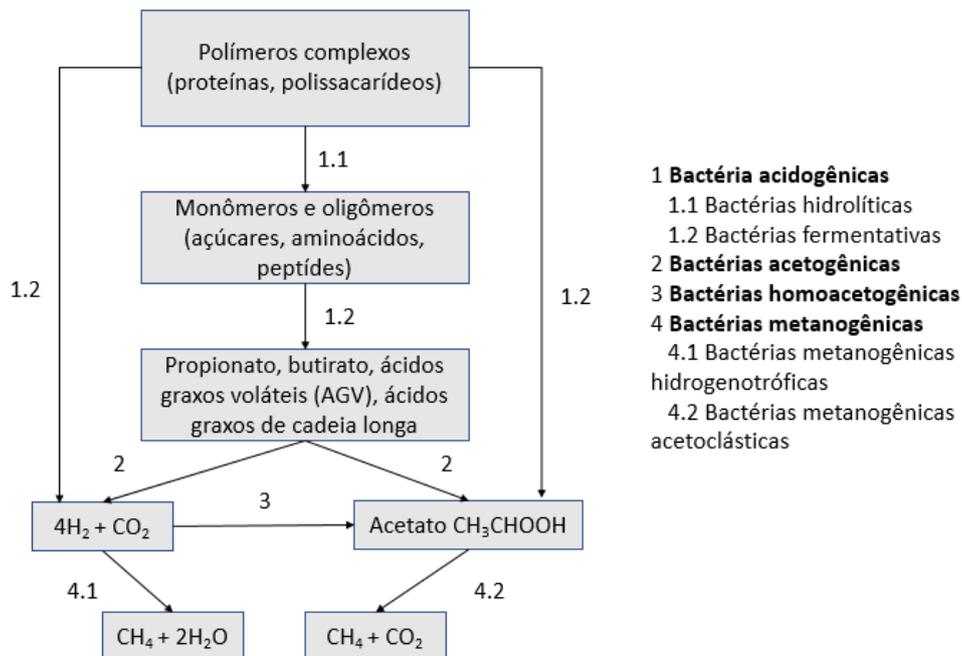


Figura 2.5: Grupos tróficos envolvidos em processos anaeróbios. Fonte: Coleran (1991) apud Wellinger (2013).

Assim, dentro de reatores a degradação da fração orgânica reproduz o processo semelhante ao que ocorre na produção de gás em aterros, porém sob condições controladas (GÓMEZ et al., 2010). Numa primeira fase, materiais particulados complexos (polímeros) são convertidos em materiais mais simples (moléculas menores) pela ação de exoenzimas excretadas pelas bactérias fermentativas hidrolíticas e, posteriormente, estas moléculas menores são metabolizadas no interior de células, através do metabolismo fermentativo, dando origem a ácidos orgânicos (principal produto) pela ação de bactérias fermentativas acidogênicas (CHERNICHARO, 2007).

As bactérias acetogênicas convertem intermediários fermentativos em substratos metanogênicos, gás hidrogênio (H_2), CO_2 , ácidos acéticos e compostos de carbono, as bactérias do processo devem agir em conjunto com bactérias que utilizam H_2 , uma vez que o hidrogênio é tóxico a elas (Wellinger, 2013). Após a acetogênese tem-se a metanogênese como nova etapa do processo. A metanogênese ocorre por ação de organismos *Archaea* (CHERNICHARO, 2007; METCALF & EDDY, 2015). A produção de metano se dá, então, por meio de dois grupos de organismos, um grupo utiliza hidrogênio como doador de elétrons e CO_2 como receptor de elétrons, estes são os metanogênicos hidrogenotróficos, o outro grupo é o dos metanogênicos acetoclásticos, estes dividem o acetato em metano e CO_2 (METCALF & EDDY, 2015).

Chernicharo (2007) destaca, ainda, a fase de sulfatogênese, onde, bactérias redutoras de sulfato, reduzem sulfato, sulfito e outros compostos sulfurados a sulfeto, ou seja, o principal produto proveniente da ação destas bactérias é o sulfeto de hidrogênio.

O tratamento de resíduos através da Digestão Anaeróbia pode ser resumido conforme a Figura 2.6 que traz o diagrama de fluxo geral com a entrada de matéria prima e produtos obtidos.

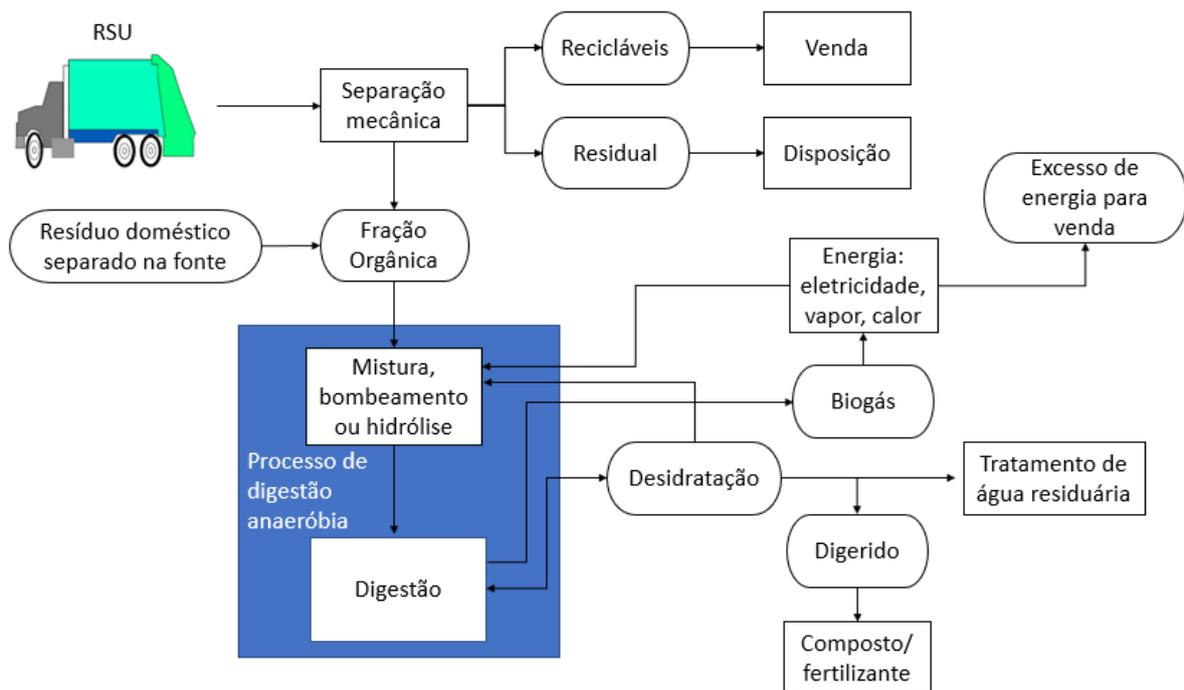


Figura 2.6: Diagrama de fluxo da Digestão Anaeróbia. Fonte: adaptado de International (2005).

As tecnologias empregadas no processo de Digestão Anaeróbia podem variar, conforme a capacidade, condições operacionais ou aspectos construtivos, por exemplo. A Figura 2.7 mostra o fluxo de materiais em termos quantitativos, com a entrada de matéria orgânica e a produção de biogás como produto final.

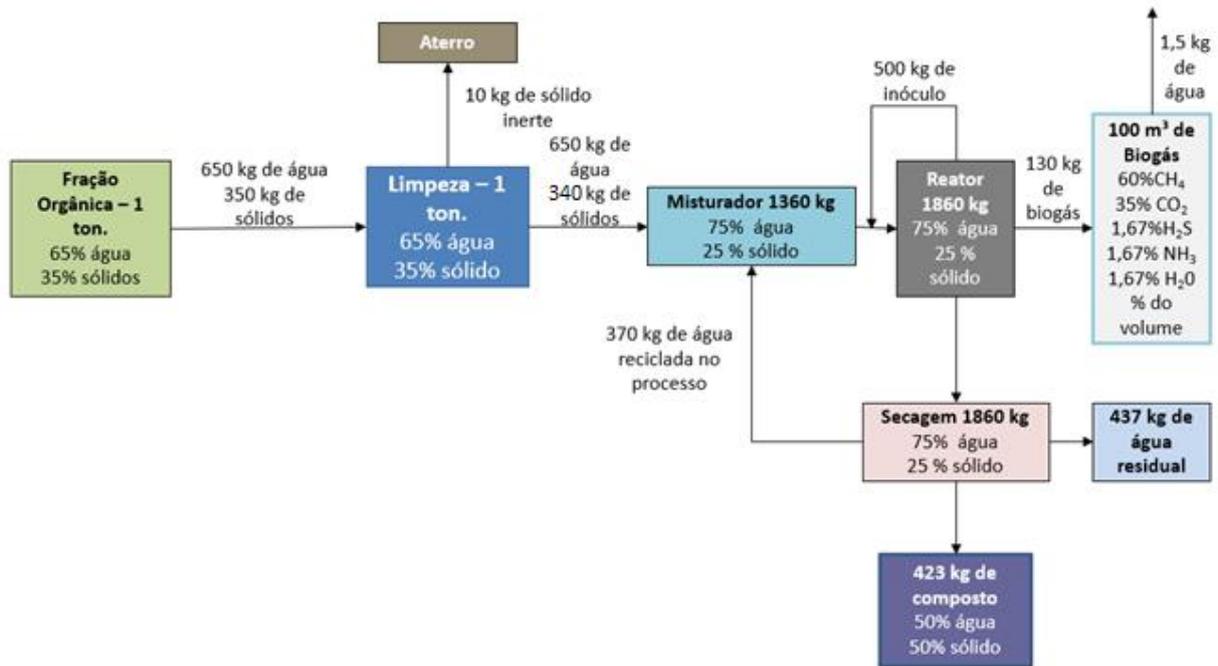


Figura 2.7: Fluxo de materiais para um processo típico de digestão anaeróbia. Fonte: Ostrem (2004).

Assim, nota-se através do balanço mostrado na Figura 2.7 que é possível produzir 100 m³ de biogás (que contém aproximadamente 60% de metano em sua composição, podendo variar a concentração) para cada tonelada de matéria orgânica do RSU. O processo gera, ainda, 423 kg de produto digerido.

No que diz respeito às condições operacionais, os digestores anaeróbios podem ser operados em condições termofílicas ou mesofílicas. Atualmente, a maioria dos digestores é operada sob condições mesofílicas, ou seja, de 25 a 40° C, em detrimento da digestão anaeróbia termofílica que ocorre na faixa de 45 a 70° C (PECES et al., 2013).

A matéria-prima deve permanecer no digestor durante um determinado tempo para que possa ser digerida, este é o tempo de retenção, que é medido pela DQO e DBO da saída do efluente. O tempo apropriado depende da matéria-prima, condições ambientais e uso pretendido do digestor (OSTREM & THEMELIS, 2004). Outro aspecto operacional que pode ser diferenciado é a adição de água junto aos resíduos sólidos na alimentação do digestor. Quando não há adição de água, tem-se a digestão seca e a digestão úmida no caso contrário (PROBIOGÁS, 2015a). Os principais dados para cada tipo de digestão são listados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Dados para digestão anaeróbia de RSU por tipo de digestão. Fonte: PROBIOGAS (2015b)

	Digestão úmida (CSTR, Mistura)	Digestão seca contínua	Digestão seca descontínua
Condições para emprego da tecnologia	Umidade > 85% > 15.000 hab. [ca. 3000t/a]	Umidade < 75% > 80.000 hab. [ca. 15.000 t/a]	Umidade < 65% > 5.000 hab. [ca. 5.000 t/a]
Substratos	Restos de alimentos [restaurantes, mercados, feiras e açougues]	"RSU em geral e qualquer outro lixo orgânico"	
Subst. inorgânicas	Não aceitável	Parcialmente aceitável	Aceitável
Pré-tratamento	Coletado por separado e homogeneizar, triturar, e/ou misturar com efluentes	Selecionar na planta, triturar, misturar com efluentes no processo	Selecionar na planta, triturar os resíduos, entrada seca, irrigação com inóculo
Co-substratos	Substrato de caixa de gordura	"Efluentes líquidos e pastosos especialmente para aumentar a umidade dos substratos secos"	
Concentração de sólidos no reator	10 - 15%	25 -30%	35 - 45%
Produção específica de CH₄	50 - 350 Nm ³ CH ₄ /t 25 - 175 L CH ₄ /hab./d	50 - 250 Nm ³ CH ₄ /t 25 - 125 L CH ₄ /hab./d	35 - 90 Nm ³ CH ₄ /t 20 - 40 L CH ₄ /hab./d
Planta [m³/h CH₄]	25 - 750 m ³ /h CH ₄	100 - 1.850 m ³ /h CH ₄	25 - 1.250 m ³ /h CH ₄
Investimento total R\$/m³ CH₄ *	12.000 - 35.000 R\$/m ³ CH ₄	22.500 - 31.500 R\$/m ³ CH ₅	22.500 - 40.500 R\$/m ³ CH ₆
Custos O&M em % do investimento	9% - 17%	9% - 12%	9% - 12%
Tempo - construção	10 -15 meses	12 -18 meses	9 -12 meses
Tempo - comissionamento	4 - 6 meses	3 - 6 meses	1- 3 meses
Vida útil da instalação civil	15 - 20 anos	20 - 25 anos	
Vida útil - equipamentos	5 - 10 anos	7 - 15 anos	
Vida útil média	10 - 15 anos	13 - 20 anos	
Vantagens	Aproveitamento energético dos resíduos úmidos e sua higienização. Redução de Emissões e inconvenientes de aterros.	Aproveitamento energético dos resíduos municipais com pouco pré-tratamento; Redução de emissões; Redução da disposição em aterros; Higienização dos resíduos.	
Desvantagens	Exige a separação e triagem das frações orgânicas; desafio de comercialização dos fertilizantes	Investimento inicial para a planta relativamente alto; municípios ainda não têm experiências, estruturas para O&M	

*Condições específicas para o cálculo de custo /investimento nas áreas: Custos só consideram o tratamento a partir dos digestores (não a coleta, a separação e outros tipos de pré-tratamento)

Desta forma é possível destacar através da Tabela 2.2 que os investimentos em plantas de cada um dos tipos são praticamente da mesma ordem, sendo que para a digestão úmida, em alguns casos, pode ser o menor dentre eles. Quanto a produção específica a digestão úmida pode alcançar maiores valores, ou seja, podendo chegar a 175 L CH₄/habitante/dia (em condições normais de temperatura e pressão), enquanto a digestão seca pode chegar a 125 L CH₄/habitante/dia e para a digestão seca descontínua pode chegar a 40 L CH₄/habitante/dia.

O investimento em plantas para a geração de eletricidade a partir da Digestão anaeróbia podem variar de acordo com a potência ou capacidade de processamento desejada. A Tabela 2.3 apresenta o investimento em função da potência elétrica instalada, utilizando-se a conversão de Euro (€) para Real (R\$) de R\$ 4,38 de 03 de junho de 2019 data da realização do estudo.

Tabela 2.3: Dados para o cálculo do investimento com digestão anaeróbia. Fonte: Fachagentur apud Remy (2018)

Potência elétrica	Investimento específico [€/kWel]	Investimento Específico [R\$/kWel]
75 kW	9000	41220,00
150 kW	6500	29770,00
250 kW	6000	27480,00
500 kW	4600	21068,00
1MW	4000	18320,00

Esta é, então, uma tecnologia possível de ser aplicada a diferentes condições de projeto, tendo em vista a variedade de tecnologias envolvidas e as condições de operação e capacidades que cada projeto pode possuir.

2.3.3 Compostagem

A compostagem é um processo de reciclagem da matéria orgânica gerando compostos estabilizados a partir da degradação biológica da matéria orgânica em condições aeróbicas (WEI et al., 2017). Trata-se de um processo de tratamento mais simplificado de uma fração do RSU. Este processo pode ser dividido em duas fases, onde na primeira, chamada “bioestabilização”, ocorre a redução da temperatura da matéria de 65 °C para a temperatura ambiente, fase que dura de 45 a 60 dias, a segunda fase dura cerca de 30 dias e é onde ocorre a humificação e a mineralização da matéria (IBAM, 2001).

O processo se inicia com a fragmentação do RSU orgânico, que depois é colocado em leiras (montes), que devem ser revolvidas com uma frequência pré-estabelecida, até que ocorra a bioestabilização da matéria e, assim, possa ser peneirada e aplicada ao solo (IBAM, 2001). O composto gerado pode fornecer nutrientes para solos empobrecidos e ajudar na agricultura. Assim, a

matéria orgânica do RSU pode ser uma boa fonte de nitrogênio e, além deste nutriente, o composto gerado pode conter fósforos e outros macronutrientes (ALMENDRO-CANDEL, 2019).

Segundo dados do SNIS de 2019 para o Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos – 2017, no Brasil foram recebidas 246,4 mil toneladas de resíduos sólidos foram recebidas em 68 unidades de compostagem, das quais 3 eram na região Nordeste, 52 na região sudeste, 10 na região sul e 3 na região centro-oeste (BRASIL, 2019). Assim, tem-se que o número de instalações ainda é relativamente baixo no país.

Um dos impasses para melhor implantação da tecnologia pode estar na dificuldade de comercialização de compostos, conforme destacado em PROBIOGÁS (2015b) que se refere ao composto, que também é produzido com a digestão anaeróbia. Vale destacar que este composto não é classificado como um tipo de fertilizante, mas sim como um artifício para melhora de solos. Porém, a Lei 12.305 de 2010 em seu Art. 36, inciso V, diz que cabe ao titular dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos: implantar sistema de compostagem para resíduos sólidos orgânicos e articular com os agentes econômicos e sociais de que forma o composto produzido deverá ser utilizado (BRASIL, 2010). Assim, nota-se que, apesar da pouca aplicação deste tipo de tratamento de resíduos no país, a legislação procura incentivar a prática já que produz benefícios ambientais no âmbito da responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos como esta mesma lei destaca.

Sobre os custos de implantação para a compostagem, a Tabela 2.4 apresenta o valor do investimento, o custo operacional e a receita conforme a capacidade da planta.

Tabela 2.4: Dados para avaliação econômica de planta de compostagem. Fonte: IPEA (2012)

Itens	Capacidade da planta de compostagem		
	3 t/d	10 t/d	20 t/d
Área Requerida (m ²)	335	1070	2210
Custo fixo da Planta ¹ (US\$)	7.440,00	24.800,00	49.600,00
Custo operacional da planta ²	4.960,00	16.540,00	33.080,00
Mão de obra/planta	6	20	40
Produção composto/dia (kg)	750,00	2.500,00	5.000,00
Receita anual venda de composto ³ (US\$)	8.640,00	28.800,00	57.600,00

¹ Não inclui o custo da terra ou aluguel

² Custo de operação por ano incluindo salário do gerente da planta

³ Para 1t de material compostável são produzidos 250 kg de composto

Deve-se destacar que o estudo do IPEA (2012,) considera uma produção de composto de 250 kg para cada tonelada de material compostável para a composição da receita da planta. O estudo considera, assim, o custo fixo da planta, o custo operacional e as receitas como função direta da capacidade da planta.

2.4 Tratamento termoquímico de resíduos

2.4.4 Incineração

A incineração é uma das formas mais conhecidas de obtenção de energia a partir de resíduos. O processo de geração de energia elétrica, neste caso, é semelhante ao de usinas térmicas convencionais de ciclo Rankine e o potencial de geração depende do poder calorífico do RSU e da eficiência de conversão de calor em eletricidade (EPE, 2008). A Figura 4.8 ilustra o processo de incineração de resíduos sólidos.



Figura 2.8: Processo de incineração de RSU. Fonte: EPE (2014a).

Dentre as vantagens com a recuperação energética com a incineração tem-se a redução de volume de resíduos em aterros e eliminação de agentes patogênicos, como desvantagem, tem-se emissões tóxicas não apenas de dioxinas, mas também de furanos, gases ácidos e metais pesados (LEME et al., 2014). A Figura 2.8 ilustra um sistema com depuração de gases que permite minimizar os danos com a utilização da incineração.

Na Figura 2.9 é mostrado um esquema para uma planta de incineração a partir da combustão em grelha.

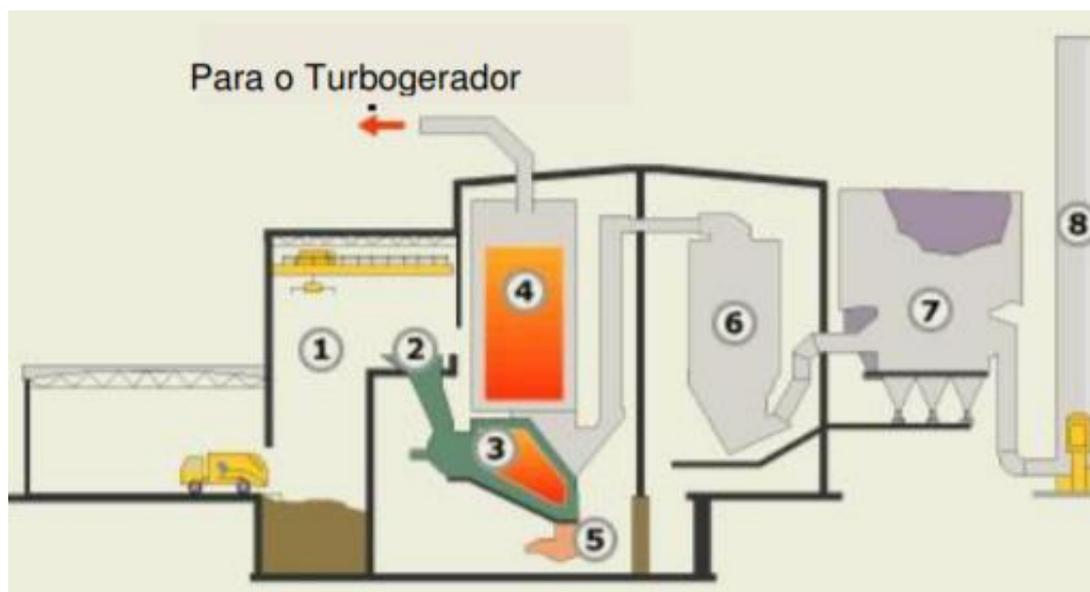


Figura 2.9: Planta de incineração de RSU. Fonte: National Energy Education Development Project (2006) apud ENGEBIO (2010).

A queima do RSU em grelhas corresponde a forma mais simples e comum de tratamento térmico (ENGEBIO, 2010). A partir da Figura 2.9 tem-se que, em um primeiro momento, o resíduo é descarregado na usina (representado pelo número 1) de onde é levado até as moegas (número 2), a partir destas o RSU é empurrado para o interior do incinerador, representado pelo número 3, de forma gradual. O calor produzido pela queima do resíduo é utilizado na caldeira, indicada com o número 4, para aquecimento de água, o vapor gerado é, então, conduzido por tubulações para um sistema de turbina e gerador, onde é possível gerar eletricidade. O número 5 indica o sistema coletor de escórias, resultantes da incineração, que são resfriadas com água, passando posteriormente por separadores eletromagnéticos que promovem a extração de metais para reciclagem. O número 6, da Figura 2.9, corresponde ao sistema de tratamento e remoção de poluentes dos gases de combustão e nos filtros (número 7) tem-se a retenção de partículas finas e, por fim, são lançados ao meio ambiente através da chaminé (número 8).

A capacidade das plantas de incineração pode variar, em alguns países grandes usinas são comuns e, em outros, as menores são mais comuns, como mostrado pela ISWA (2012). A Figura 2.10 mostra a capacidade média das plantas de cada país em um estudo feito pela ISWA.

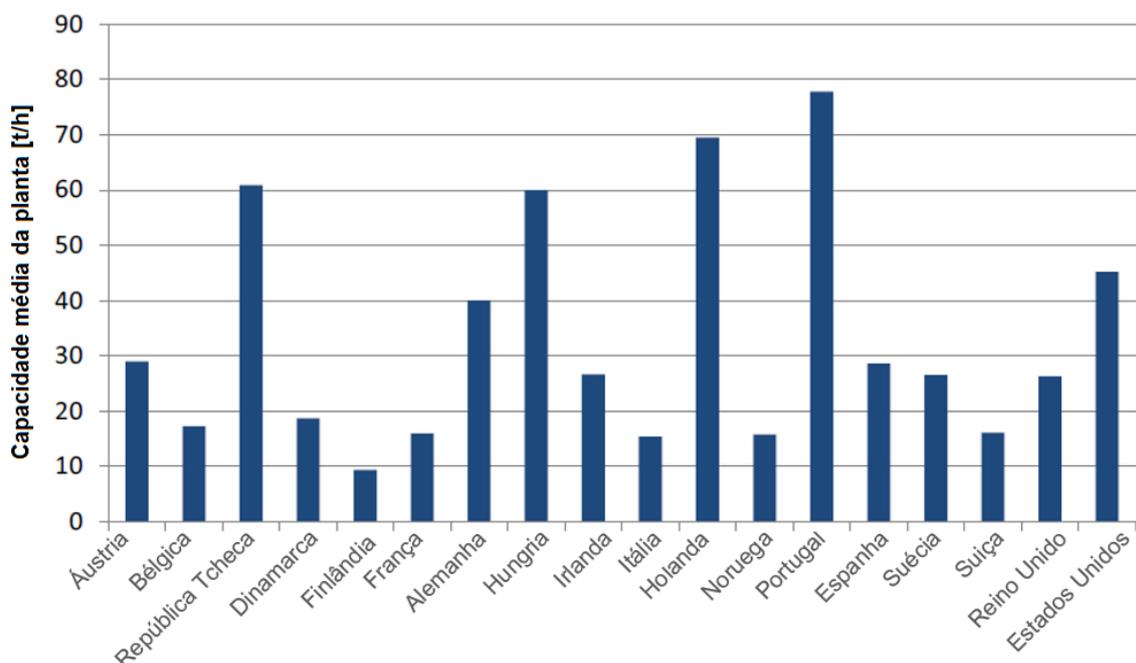


Figura 2.10: Capacidade média das plantas de incineração em diferentes países. Fonte: ISWA (2012).

Através da Figura 2.10, nota-se que a República Tcheca, Hungria, Holanda e Portugal possuem plantas de maior capacidade, com 60 toneladas por hora ou mais. Países como Bélgica, Dinamarca, França, Itália, Noruega e Suíça possuem plantas com capacidades inferiores a 20 toneladas por hora em média. Assim, em países da Europa e nos estados Unidos, nota-se que a capacidade das plantas, em média, varia entre 10 e 80 toneladas por hora.

Os custos para implantação e de operação variam em função da escala da planta. A Figura 2.11 mostra a variação no custo de implantação em função da capacidade instalada para plantas de menor escala. A obtenção de dados de custos para implantação e operação de plantas é extremamente difícil e a comparação de dados de custos entre regiões geográficas é uma prática incerta (WHITING, et al., 2013). A Figura 2.12, mostra a variação para o custo de operação em função da capacidade instalada em plantas de menor escala. Os dados das Figuras 2.11 e 2.12 foram obtidos a partir de 14 plantas europeias conforme Stantec (2011).

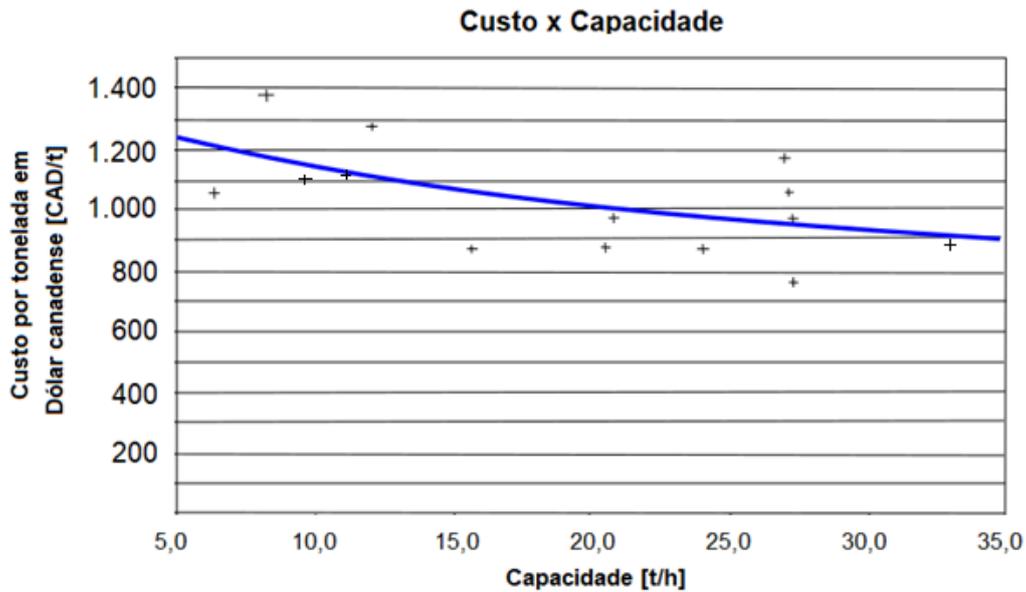


Figura 2.11: Custo de implantação por tonelada em função da capacidade. Fonte: adaptado de Whiting (2013) e Stantec (2011).

Pela Figura 2.11 tem-se que em plantas de menor capacidade os custos para implantação variam entre 900 e 1.200 dólares canadenses, o que corresponde a valores entre R\$ 2.601,00 e R\$ 3.468,00 por tonelada, conforme cotação de 3 de junho de 2019 (data atual do estudo). Os custos de implantação são, então, dados para plantas com capacidade entre 5 e 35 toneladas por hora. Os símbolos pontilhados no gráfico correspondem aos dados levantados de usinas da Europa, como mencionado. Os custos operacionais são dados na Figura 2.12

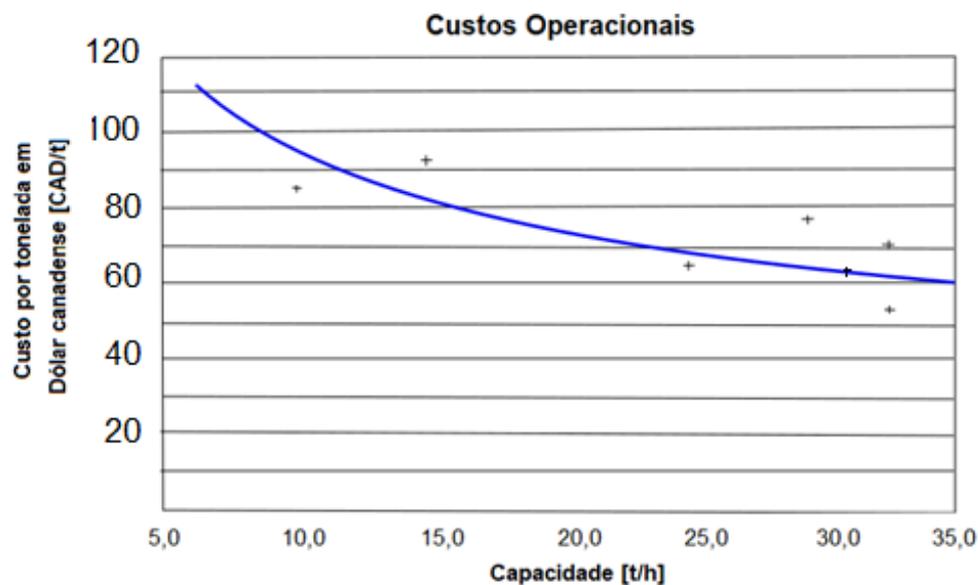


Figura 2.12: Custo de operação por tonelada em função da capacidade. Fonte: adaptado de Whiting (2013) e Stantec (2011).

Os custos operacionais podem variar entre 60 e 110 dólares canadenses por tonelada, ou entre R\$ 173,40 e R\$ 317,90 por tonelada (conforme cotação do dia 3 de junho de 2019). Para o Brasil, conforme FEAM (2012), seriam viáveis plantas com capacidade mínima de 500 toneladas por dia, com potencial de gerar entre 0,4 e 0,6 MWh de eletricidade por tonelada de RSU. Conforme Saveyn et al. (2015), a eficiência média para geração de eletricidade em plantas de incineração fica entre 22 e 29% e em casos de otimização pode chegar a 33%.

Em países com atividade econômica mais avançada, nota-se que há um maior investimento em plantas de incineração de RSU, com a maior parte das instalações localizadas na Europa, nos EUA e no leste da Ásia (LU et al., 2017). A figura 2.13 mostra a distribuição da incineração de RSU no mundo em termos de capacidade diária, dada em megagramas por dia (Mg/d, equivalente a tonelada por dia).

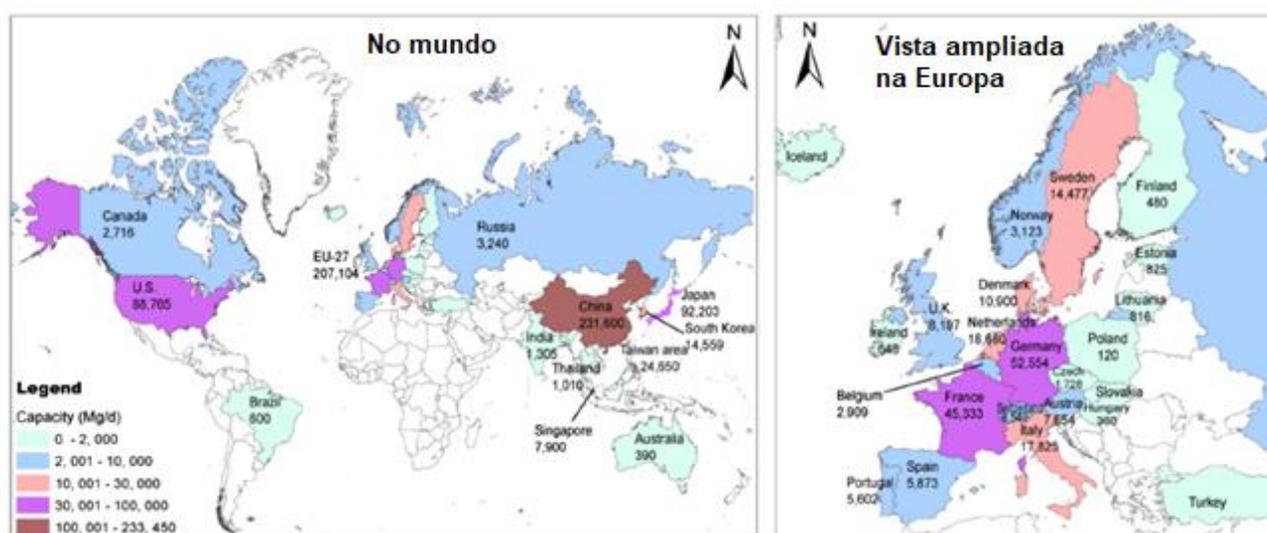


Figura 2.13: Mapa da Incineração de RSU no mundo. Fonte: Lu et al. (2017).

Nota-se, então, através do mapa da Figura 2.13, que países do hemisfério sul fazem menor uso da tecnologia se comparados aos do hemisfério norte. O Brasil, com processamento de 600 Mg/dia (ou 600 t/dia) apresenta uma utilização em uma escala similar à Austrália, com 390 Mg/dia. Os países com destaque na maior utilização da tecnologia são: a China, com 231.600 toneladas de processamento ao dia sendo, assim, o maior nível de utilização; os EUA, a França; a Alemanha e o Japão, ou seja, países que possuem um destaque econômico no cenário internacional. Há países que dificilmente utilizam a incineração do RSU como caso dos países da África e da maior parte dos países da América Latina.

Uma das barreiras para a utilização da incineração seria quanto aos níveis de poluição. Porém, com a geração de energia, estudos sugerem que a incineração seria capaz de reduzir emissões

indiretamente, pois ao gerar calor e eletricidade poderia substituir o uso de combustíveis fósseis, porém, haveria a necessidade de se verificar o efeito conjunto da utilização desta prática (TABATA, 2013). Outro problema seria quanto ao custo de implantação da tecnologia em algumas regiões. No Brasil, por exemplo, a incineração com recuperação energética é considerada cara, mas alguns fatores podem torná-la uma opção viável, como o aumento no preço da eletricidade, os aterros sanitários em fim de vida e a falta de espaço para construção de novos aterros (BANCO MUNDIAL, 2018).

2.4.5 Pirólise e gaseificação

A pirólise é o processo físico-químico no qual a biomassa é aquecida a temperaturas entre 500 e 800°C sob condições não oxidantes produzindo-se, então, uma fração sólida (carvão) e uma fração volátil, denominada licor pirolenhoso que é composto por gases e vapores orgânicos condensáveis (CORTEZ, LORA & GÓMEZ, 2008). Em vários países ela tem sido muito utilizada para a produção de carvão vegetal a partir de madeira e para reciclagem de pneus (FEAM, 2012).

Tem-se que a proporção dos produtos gerados através da pirólise pode variar conforme alguns parâmetros, como o tipo de material que alimenta o sistema (*feedstock*), o tipo de reator, a temperatura do processo e a taxa de aquecimento (WILLIAMS & SLANEY, 2007). Se a pirólise é conduzida a baixas taxas de aquecimento (de 0,1 a 1 °C / s), até uma temperatura da ordem de 400 a 500 °C e com longo tempo de residência (entre 5 e 30 min), tem-se, então, a pirólise lenta (TRIPATHI et al., 2016). Se a taxa de aquecimento é aumentada, a temperatura final do processo é alterada e utiliza-se menores tempos de residência, tem-se as pirólises rápida, flash e ultrarrápida, nestes casos, tem-se a menor da formação de carvão e mais produção de bioóleo (CORTEZ, LORA & GÓMEZ, 2008).

A carbonização é um tipo de pirólise dos mais conhecidos e mais abordados em diversos trabalhos. A carbonização é uma forma de pirólise que está em uso há milhares de anos, nela a biomassa é aquecida lentamente, em período de tempo prolongado, na ausência de oxigênio e a uma temperatura relativamente baixa (~ 400 °C), o que favorece a formação de carvão (BASU, 2010).

Para efeito ilustrativo, a Figura 2.14 mostra um layout de um processo de pirólise, a figura foi apresentada por Artes et al. (2013) para um processo em escala de laboratório, onde mostra o processo e os produtos obtidos. Nela é destacada a produção de Char (biochar), extraído no reator, através de um sistema de separação obtém-se as frações líquida (bioóleo) e de gases.

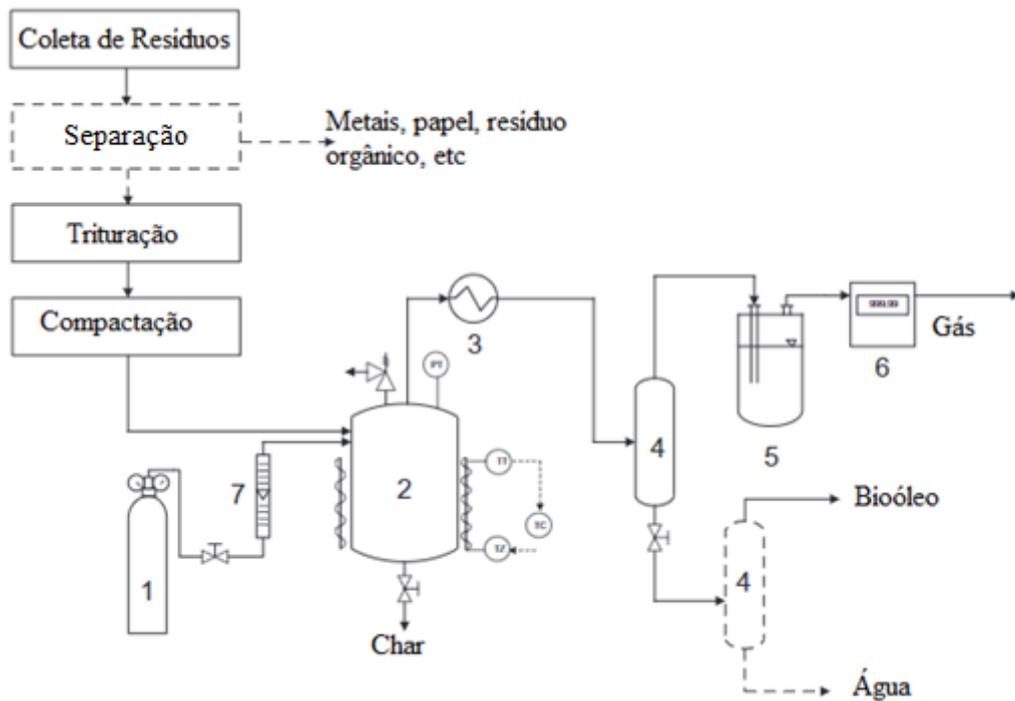


Figura 2.14: Representação de um processo de pirólise – 1: abastecimento de nitrogênio; 2: reator; 3: resfriamento; 4: separador; 5: purgador; 6: medidor de vazão de gás; 7: rotâmetro. Fonte: Artes (2013).

A pirólise do RSU ainda não é uma tecnologia amplamente utilizada no gerenciamento de resíduos ao redor do mundo. Embora seus conceitos estejam consolidados, os detalhes do processo como um todo ainda são alvo de inúmeros estudos e divergências (FEAM, 2012). Mas vale observar que ela tem se tornado atraente frente ao problema de encontrar novos locais para instalações de incineradores ou aterros sanitários, o que a torna interessante em pequenas cidades que evitariam transportes a longa distância e em grandes cidades que podem tratar o RSU de forma distribuída (CHEN et al., 2018). Se comparada com a incineração e com a gaseificação, tem-se que uma das vantagens da pirólise é o fato de ser capaz de menores quantidades de NO_x e SO_2 , que são potencialmente danosos à atmosfera (SIPRA et al., 2018).

Outra forma conhecida de conversão termoquímica do RSU é a gaseificação. Esta consiste na conversão de resíduos em gases de síntese através de reações de oxidação do resíduo com uma quantidade de agente oxidante inferior à utilizada na combustão estequiométrica (ARENA, 2012). A gaseificação oferece vantagens sobre a incineração, já que é capaz transformar 80% da energia química do combustível usado, neste caso o resíduo, em energia química na fase gasosa, onde o *syngas* resultante pode ter diversas aplicações, como em caldeiras a vapor e motores a gás, convertido em calor e eletricidade (WHITING, K. et al., 2013). O gás gerado pode ter maior ou menor poder calorífico, de forma que, ao utilizar ar no processo, produz-se um gás de menor poder calorífico ($\sim 5 \text{ MJ/Nm}^3$) e ao utilizar oxigênio puro ou misturas de oxigênio ou ar com vapor de água obtém-se gás

com poder calorífico entre 10 e 15 MJ/Nm³ (CORTEZ, LORA & GÓMEZ, 2008). Assim, conforme as condições operacionais pode-se obter maior ou menor conteúdo energético dependendo da produção desejada.

O equipamento a ser utilizado para a conversão energética também pode ser definido em função do tipo de processo aplicado. A oxidação parcial com ar gera um gás com maior teor de nitrogênio e um poder calorífico baixo para ser utilizado, de maneira geral, em uma turbina a gás, sendo comum a utilização em motores a combustão interna, embora, recentemente o mercado já ofereça turbinas a gás de nova geração, capazes de queimar eficientemente *syngas* com esta característica (ARENA, 2012).

A tecnologia de gaseificação difere-se, também, quanto aos tipos de gaseificadores utilizados, os quais podem ser: gaseificadores *downdraught*, *updraught*, de leito fluidizado e fluxo cruzado (KIRKELS & VERBONG, 2011; THAKARE & NANDI, 2016). A Figura 2.15 destaca o processo de gaseificação, os tipos de biomassa que podem ser utilizados e as principais aplicações da tecnologia.



Figura 2.15: Fases do tratamento e aplicações da gaseificação. Fonte: Traduzido de Kirkels & Verbong (2011).

É comum a gaseificação do combustível derivado de resíduo (CDR), onde o resíduo passa primeiramente por um pré-tratamento mecânico (LUZ, 2015; NÁSNER et al., 2017). Na sequência ocorre a gaseificação seguida da limpeza do gás e este, por sua vez, pode ser utilizado de diversas formas. Um dos maiores desafios técnicos para maior difusão das tecnologias de gaseificação em escala comercial no mercado pode estar no sistema de limpeza do gás de síntese que deve ser otimizada e a menores custos (TEIXEIRA, 2014). Contudo, a limpeza do gás não se mostra como o único fator capaz de elevar os custos da gaseificação. Para que o gaseificador alcance melhores níveis de desempenho, sobretudo com a formação mínima de alcatrão, é necessário que seja alimentado com RSU sob condições específicas, o que requer um pré-tratamento que pode, em muitos casos, elevar o custo (BOSMANS, 2013).

Acercas dos tipos de gaseificação, Kirkels & Verbong (2011) destacaram em seu estudo que para a gaseificação de biomassa, as tecnologias *downdraught* e de leito fluidizado com ar atmosférico são as alternativas escolhidas mais frequentemente, enquanto a tecnologia de leito fixo tem menor participação no mercado, apresentando maior aplicação na Índia e na China.

De modo geral, tem-se poucos dados de custo de implantação de projetos de pirólise e gaseificação. O Japão possui algumas plantas em operação que poderiam fornecer indicativos, mas que não poderiam ser assumidos para as diferentes partes do mundo, pelo fato de que neste país tem-se um maior esforço por parte dos dirigentes para incentivar estes tipos de tecnologias para reaproveitamento dos resíduos, como no caso da gaseificação (WHITING, 2013). Contudo, para a gaseificação o estudo de Luz et al. (2015), apresenta os custos para equipamentos que compõem uma planta de gaseificação de RSU, conforme mostrado na Tabela 2.5.

Tabela 2.5: Custos dos equipamentos e seções. Fonte: adaptado de Luz et al. (2015)

Estágios	Taxa de processamento (t/h)	Custo da instalação (US\$)	Potência do equip. (CV)
Separação Primária	0,4	92.187 ^(b)	35
	2,1	311.111 ^(b)	60
	4,2	286.667 ^(b)	70
	10,0	969.778 ^(b)	180
	16,7	1.568.889 ^(b)	240
Tratamento Mecânico (produção de briquetes)	0,5	102.978 ^(b)	60
	0,8	144.356 ^(b)	75
	1,0	159.022 ^(b)	90
	1,5	184.622 ^(b)	110
	2,0	216.933 ^(b)	135
Equipamentos	Energia térmica gerada (kWt/h)	Custo da instalação (US\$)	
Gaseificação e limpeza do gás	500,0	111.111 ^(b)	5
	1000,0	191.111 ^(b)	7
Equipamentos	Energia elétrica gerada (KVA/kW)	Custo da instalação (US\$)	
Gerador elétrico	120/96 ^(a)	64.814 ^(b)	-
	330/264 ^(a)	153.680 ^(b)	-

^(a): Relação KVA/kW obtida de Green Energy - Energia Sustentável Green Energy (2019)

^(b): Custos, seções e equipamentos obtidos de Luz et al. (2015)

Pela Tabela 2.5, tem-se os custos dados em dólar em função da capacidade dos equipamentos que compõem os diferentes estágios das plantas. Os estágios considerados, são: a separação primária; o tratamento mecânico, com a produção de briquetes; o sistema de gaseificação propriamente dito, com gaseificador e sistema de limpeza de gás e por fim o gerador elétrico.

Observa-se, no entanto, que há um número reduzido de plantas de grande porte para a recuperação de energética instaladas no mundo, apesar de se mostrarem tecnologias bem estabelecidas na indústria petroquímica e de energia (RAJAEIFAR et al., 2017). No caso da pirólise, em específico, nota-se que as informações atuais sobre desenvolvimento da tecnologia, caracterização de produtos e principalmente da poluição gerada (questões ambientais) ainda não são suficientes para apoiar as aplicações da tecnologia (CHEN et al. 2018).

2.6 Reciclagem

A reciclagem pode ser definida conforme a Lei 12.305 de 2010, Artigo 3º, inciso XIV, como o processo pelo qual os resíduos sólidos são transformados em insumos ou novos produtos após alteração das propriedades físicas, físico-químicas ou biológicas destes resíduos (BRASIL, 2010). A reciclagem é um sistema que visa aperfeiçoar o uso de recursos com o objetivo de gerar menos resíduos de forma lucrativa (DAHLIN et al., 2017 apud ALMASI et al., 2019).

Um fator importante que favorece a reciclagem do RSU é a separação deste na fonte (nas casas, por exemplo) e se executada corretamente, esta separação pode reduzir o custo de coleta e descarte de resíduos (ALMASI et al., 2019). A etapa seguinte é a coleta seletiva, definida na Lei 12.305 de 2010 como o processo onde os resíduos sólidos previamente separados conforme sua constituição ou composição são coletados (BRASIL, 2010). A Figura 2.16 traz uma representação esquemática das etapas envolvidas no processo de reciclagem e os agentes presentes em cada uma delas.

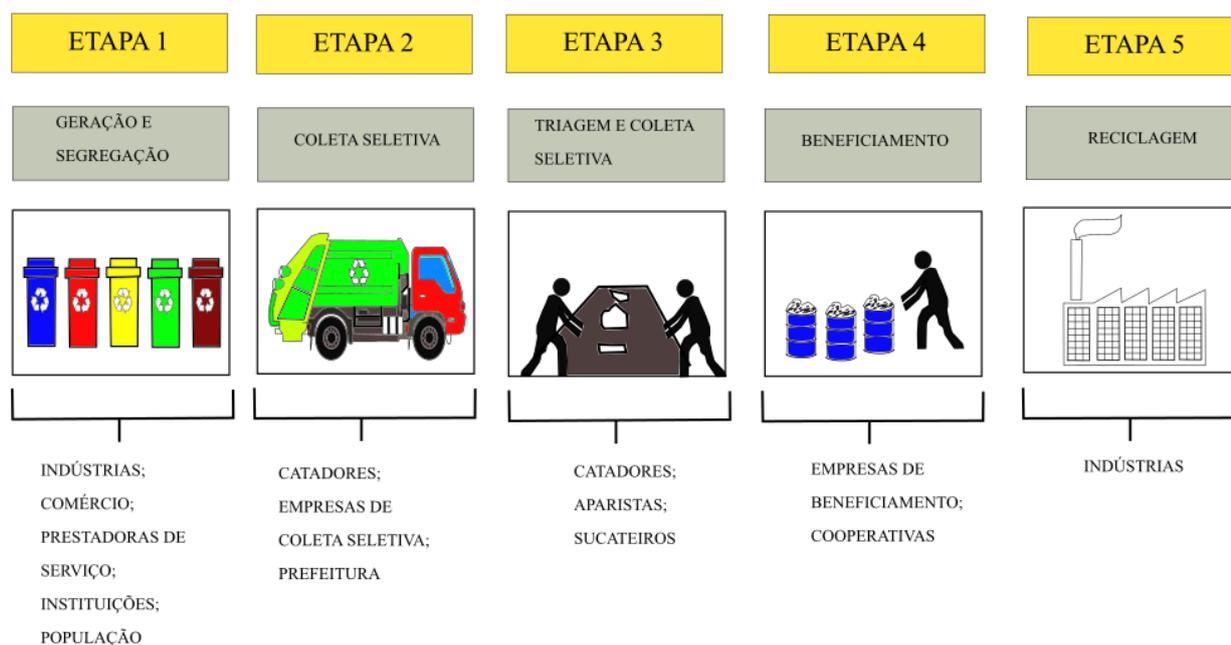


Figura 2.16: Etapas necessárias à realização da reciclagem. Fonte: Adaptado de Pavan (2010).

Na “Etapa 1” tem-se a geração e separação do RSU; na “Etapa 2” a coleta do material separado; na “Etapa 3” a triagem e classificação em tipos de materiais; na “Etapa 4” pode haver algum tipo de beneficiamento e na “Etapa 5” ocorre a reciclagem e reinserção do material no processo produtivo (Pavan, 2010). Assim, nota-se que é fundamental que as fases de separação e coleta sejam bem-sucedidas para que se possa alcançar bons resultados com a reciclagem.

Os cidadãos têm, então, um importante papel no sistema de gestão de resíduos principalmente no que diz respeito à reciclagem e isto pode representar um desafio, pois é preciso que haja

conscientização da população (ABRELPE, 2019c). Conforme uma pesquisa realizada no Brasil, com 1.816 pessoas de todos os Estados e Distrito Federal no ano de 2018, cujos dados são apresentados pela Abrelpe (2019c), tem-se que 75% das pessoas revelaram não separar seus resíduos em casa e 66% das pessoas afirmaram saber pouco ou nada a respeito de coleta seletiva, o estudo revelou, também, que há desconhecimento sobre materiais que podem ser reciclados, onde, por exemplo, 60% afirmaram não reconhecer garrafas PET como um tipo de plástico reciclável. É necessário, portanto, que haja melhor conscientização da população principalmente sobre quais materiais podem ser reciclados para que possam ser adequadamente separados e coletados e, assim, melhorar a taxa de reciclagem no país e alcançar benefícios.

Como benefícios da reciclagem, tem-se a redução na demanda por fontes naturais de matéria-prima e, além disso, permite a conservação de energia, pois é comum que a transformação de material reciclado consuma menos energia que a transformação do insumo primário como toda a energia demandada pode ser convertida em eletricidade equivalente, utiliza-se, para tal, o fator de eficiência típico das máquinas térmicas (EPE, 2014b). A Tabela 2.6 traz a energia conservada com a reciclagem dos diferentes tipos de materiais para o caso de utilização da matriz de energia elétrica do Brasil, os diferentes valores mostrados se devem a aplicação de diferentes metodologias de construção de indicadores, no estudo mostrado nesta tabela foi adotada uma eficiência de conversão para energia elétrica de 35%, considerando como média para o caso brasileiro.

Tabela 2.6: Indicadores de Energia Elétrica Economizada por reciclável (kWh/kg)

Eletricidade Economizada [kWh/kg] - 35% de Eficiência	Brasil	Canadá		Austrália	Estados Unidos	
	Calderoni (1991)	Morris min (1996)	Morris max (1996)	Warnken ISE (2007)	EPA min (2008)	EPA max (2008)
Papéis	0,715	0,370	0,598	0,274	0,187	0,422
Plástico	0,969	1,117	1,641	1,13	1,047	1,047
Vidro	0,111	0,090	0,069	0,223	0,033	0,033
Metais (alumínio e ferrosos)	1,052	0,264	1,611	0,657	1,122	1,122

Fonte: EPE (2014b)

Nota-se, a partir da Tabela 2.6, que para o papel é possível ter um mínimo de 0,187 kWh/kg de material reciclado e um máximo de 0,715 kWh/kg. Para o plástico tem-se um mínimo de economia de 0,969 kWh/kg e um máximo de 1,641 kWh/kg. Para o vidro pode haver um mínimo de 0,033 kWh/kg e máximo de 0,111 kWh/kg e, por fim, os metais podem economizar no mínimo 0,264 kWh/kg e no máximo 1,611 kWh por kg reciclado. Assim, a partir de diferentes considerações propostas pelos diferentes autores, pode-se chegar a valores distintos de conservação de energia elétrica. Contudo, todas as metodologias mostram que a partir da reciclagem de quaisquer dos materiais listados é possível obter economia de energia elétrica.

Assim, a reciclagem apresenta-se como uma boa alternativa para solucionar problemas relativos ao tratamento do RSU. Levando-se em conta que a utilização de energia de origem fóssil produz emissão de CO₂ para a atmosfera, a reciclagem ao proporcionar o retorno dos resíduos à cadeia produtiva reduz o consumo de energia e matéria-prima contribuindo para atenuar as emissões de CO₂ (LINO & ISMAIL, 2011). Desta forma, os benefícios da reciclagem podem ser de ordem econômica – reduz a necessidade de exploração de nova matéria-prima e economizar energia; social – já que oferece oportunidades de trabalho, como no caso dos catadores; e de ordem ambiental – potencial de redução das emissões.

No Brasil ainda há uma certa dificuldade em desenvolver a prática da reciclagem do RSU. As barreiras, para tal prática no país, residem em diversos fatores que vão desde a falta de conhecimento dos moradores sobre os aspectos operacionais dos programas de reciclagem, como horários de coleta e destino dos resíduos separados por fonte; insuficiência de instalações e de veículos de coleta; concentração geográfica de indústrias de reciclagem ou mesmo déficit nos incentivos fiscais para a indústria de reciclagem e para produtos que utilizam material reciclado (CONKE, 2018).

2.7 Economia Circular e Resíduos Sólidos Urbanos

2.7.1 Definições

A Economia Circular (EC) pode ser compreendida como uma resposta às desvantagens de uma economia linear, ou seja, a economia circular é aquela na qual o valor dos produtos, materiais e recursos é mantido pelo maior tempo possível, minimizando a geração de resíduos (COM, 2015a). A economia linear pode ser compreendida como aquela baseada no modelo “pegue-use-descarte”, este modelo econômico é, então, associado ao desperdício, pois faz com que a maior parte do valor dos materiais que são utilizados seja “perdida” em aterros (EMF, 2017).

Não há evidências claras da origem ou criador do conceito de economia circular, este conceito evoluiu de maneira diferente ao redor do mundo e, por exemplo, na Alemanha, no início dos anos 90, foi introduzido na política ambiental visando abordar questões associadas ao uso de matérias-primas e recursos naturais para o crescimento econômico sustentável (GENG, 2008 apud WINANS, 2017). Na China, em meados dos anos 2000, a aplicação do conceito de EC foi introduzido com ênfase na reciclagem de resíduos gerados pós-consumo e no desenvolvimento de loops fechados baseados em resíduos (WINANS, 2017).

A implementação da Economia Circular (EC) ao redor do mundo ainda se encontra em um estágio inicial de desenvolvimento e tanto no aspecto teórico quanto no prático, a EC tem focado principalmente na economia ambiental e na ecologia industrial, com maior ênfase na inovação

tecnológica (uso de tecnologias mais limpas), bem como na reciclagem, em vez da reutilização (GHISELLINI, 2016). A saber, a economia ambiental pode ser definida como aquela que busca administrar os recursos naturais e ambientais, a partir do princípio de que estes são escassos e que a capacidade da natureza em absorver a poluição é limitada (RIEIRA, 2005). As ações voltadas à ecologia industrial buscam implementar processos estratégicos para minimizar impactos de produtos e processos na indústria afim de promover a sustentabilidade (PEREIRA, 2017).

A partir do princípio de menor geração de resíduos a Figura 2.17 ilustra o conceito de EC e como os “nutrientes biológicos” e “nutrientes tecnológicos” percorrem o ciclo em um uma economia circular, de modo a gerar menor quantidade de resíduos.

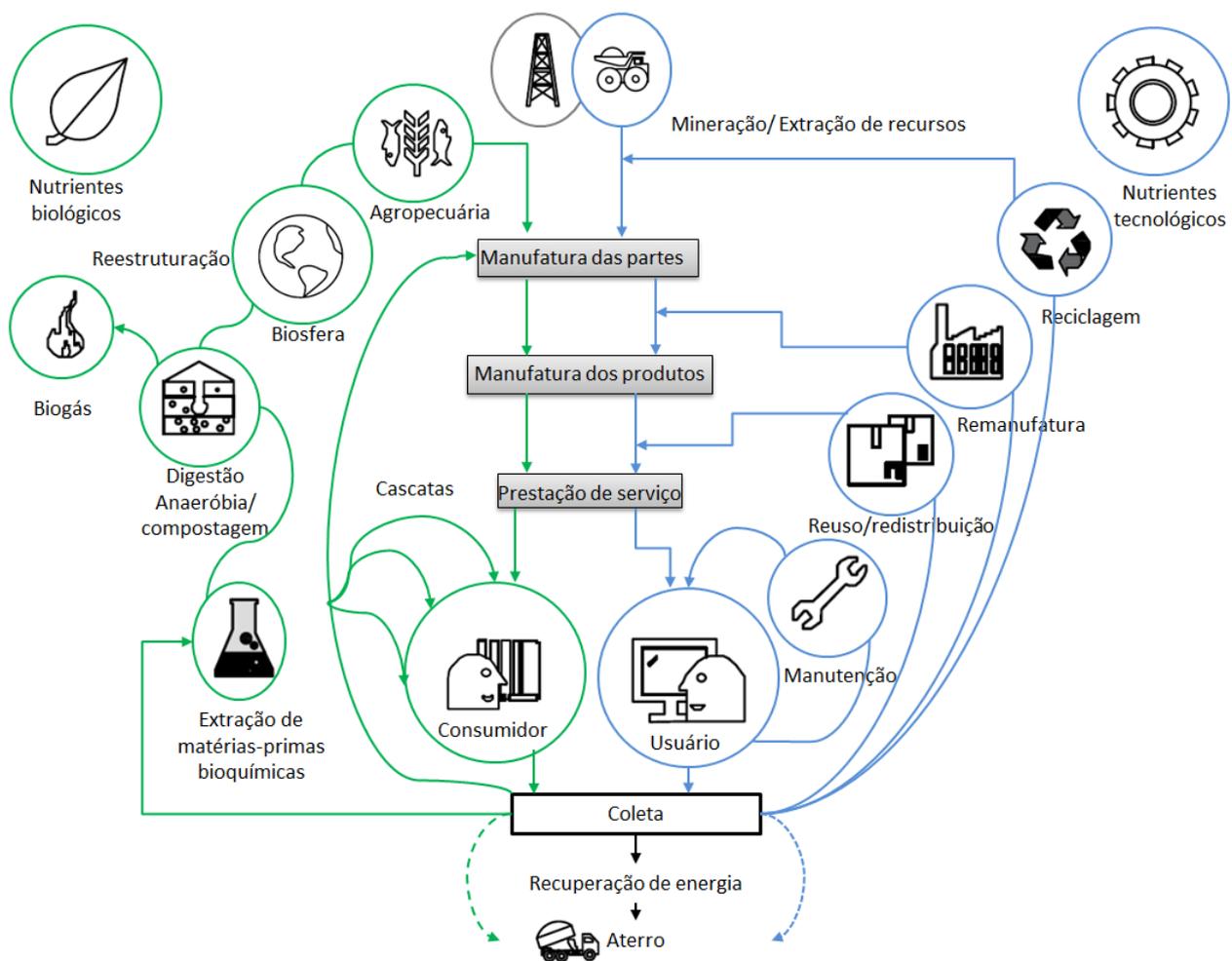


Figura 2. 17: Produtos e materiais baseados em nutrientes tecnológicos e biológicos em um sistema de economia circular. Fonte: Adaptado de EMF (2012).

A utilização de nutrientes tecnológicos e biológicos percorrendo o ciclo em diferentes aplicações antes da extração de nova matéria-prima completam os princípios centrais de uma economia circular restaurativa (EMF, 2012). Como mostra a Figura 2.17, dos nutrientes tecnológicos pode-se extrair

matéria-prima de origem bioquímica e reintegrá-los à biosfera. Os nutrientes da esfera tecnológica podem ser devolvidos ao sistema através de manutenção diretamente ao usuário, de reuso (reintegrando o sistema de prestação de serviços), de remanufatura (manufatura de produtos) ou de reciclagem (que engloba a manufatura das partes). Assim, além de produzir menos resíduos, o ciclo permite que haja menos necessidade de extração de novas matérias-primas.

Os princípios 3R (Redução, Reutilização e Reciclagem) devem fazer parte do processo de manejo de RSU, eles têm importância hierárquica diferente, sendo a redução o princípio que deve ser priorizado dentro de um sistema de economia circular (Su et al., 2013). Assim, o modelo de economia engloba os princípios 3R de modo a gerar menos resíduos e aproveitar recursos em um ciclo conforme mostrado na Figura 2.17.

2.7.2 Estudos e Aplicações da Economia Circular

Esta seção traz alguns dos principais e mais recentes estudos acerca da aplicação do modelo de EC em diferentes países. Pode-se destacar inicialmente, que há uma grande quantidade de estudos sobre aplicação de EC na China, o país tem mostrado grande interesse no tema devido à problemas de ordem social, ambiental e de saúde, que eventualmente ocorrem por conta de seu padrão de desenvolvimento econômico acelerado e contínuo (GHISELLINI, et al., 2016). Por outro lado, no Brasil há poucas publicações acerca de aplicação de EC e, além disso, o país não apresenta diretrizes neste sentido (DE OLIVEIRA et al., 2018). Assim, a fim de favorecer a aplicação da EC no país é importante analisar as formas de tratamento de resíduos praticadas e identificar as melhores alternativas dentro deste conceito de economia.

O trabalho de Winans et al. (2017) apresenta uma revisão da literatura acerca da aplicação de EC dividido em três temas: instrumentos e abordagens políticas; cadeias de valor, fluxos de materiais e aplicações específicas de produtos e inovação tecnológica, organizacional e social. Os autores concluíram no estudo que os casos reais de sucessos e fracassos do conceito de EC mostram que as iniciativas relacionadas à EC exigem abordagens integradas para implementação e avaliação. Instrumentos econômicos e regulatórios, que estariam no campo político, como subsídios e incentivos fiscais, funcionam quando os governos têm objetivos claros para os processos políticos avaliados e regulamentados, devendo atingir metas de curto e longo prazo.

Ao abordar a aplicação da economia circular em centros urbanos, o trabalho de Levoso et al. (2020) propõe uma metodologia, a partir de uma revisão da literatura e uma análise de estudos de caso específicos. A metodologia é estabelecida em quatro fases em que o território é explorado, de modo a permitir a identificação e seleção de iniciativas em áreas com maior potencial de economia circular.

Ao final é então estabelecido um roteiro para implementação. A Figura 2.18 apresenta o resumo das fases incluídas nesta metodologia.

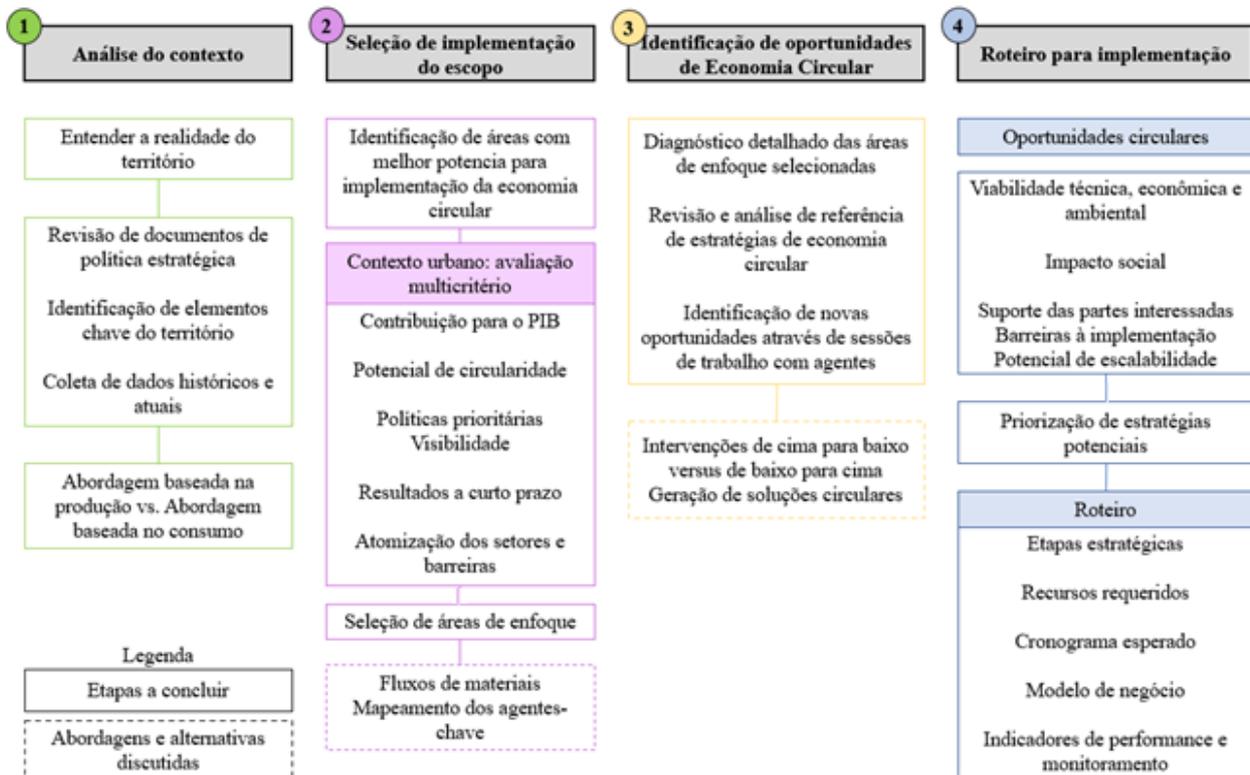


Figura 2.18: Fases da metodologia de aplicação da Economia Circular. Fonte: traduzido de Levoso et al. (2020).

Conforme a Figura 2.18, a tarefa deve ter início sob um aspecto de análise do contexto levando-se em conta a realidade do território em estudo, com o levantamento de informações, documentações e dados. Em seguida deve-se proceder à identificação das áreas de melhor potencial para aplicação da economia circular, possíveis contribuições para o PIB etc., assim, pode-se compor o escopo. A terceira etapa deve identificar as oportunidades com a economia circular com o diagnóstico detalhado das áreas com a revisão e análise de referências de estratégias de economia circular, de modo a levantar as melhores práticas. Por fim, identificadas as oportunidades, deve-se realizar a avaliação destas do ponto de vista técnico, econômico e ambiental e, assim, priorizar aquelas de maior potencial. Para a construção do roteiro alguns elementos devem estar presentes como as etapas estratégicas; os recursos requeridos; o cronograma, que por sua vez está relacionado às etapas; o modelo de negócio; os indicadores de performance e o monitoramento, para identificação do cumprimento dos objetivos estabelecidos para a implementação proposta.

Tem-se alguns estudos com enfoque em indicadores e métodos para avaliar a aplicação da economia circular. O método de Análise por Envoltória de Dados (*Data Envelopment Analysis – DEA*) foi

utilizado no trabalho de Halkos e Petrou (2019) para avaliar as eficiências dos 28 Estados Membros da União Européia (UE) no que diz respeito ao tratamento de RSU. Foram utilizados oito parâmetros para comparação entre os Estados: geração de resíduos sólidos urbanos (RSU), taxa de ocupação, formação de capital, produto interno bruto (PIB), densidade populacional e, pela primeira vez, emissões de óxido de enxofre (SOx), óxido de nitrogênio (NOx) e gases de efeito estufa (GEE). O estudo destaca que os resultados obtidos através da aplicação da DEA retratam uma crise financeira que atingiu a Europa, que passou a fazer uso de opções de tratamento mais sustentáveis para conseguir uma transição para uma economia circular, onde o valor de produtos, materiais e recursos precisaria ser mantido na economia pelo maior tempo possível. Além disso, o estudo mostrou que os países com maior taxa de reciclagem foram a Áustria, Bélgica, Alemanha, Holanda e Suécia e que os países que são mais eficientes, de acordo com a DEA, geralmente apresentam uma maior taxa de reciclagem. A Alemanha foi destacada no estudo como um país eficiente sob a maioria das estruturas da DEA e como um dos países da UE com mais emprego de incineração, reciclagem de materiais e compostagem tratando apenas uma pequena quantidade de resíduos em aterros sanitários.

Para quantificar a viabilidade ambiental do conceito de economia circular, no trabalho de Deschamps et al. (2018) a metodologia de avaliação do ciclo de vida (ACV) foi utilizada. No estudo são comparados dois cenários diferentes, o modelo de produção de concreto comercial convencional e um modelo de processo de produção de concreto utilizando-se pó de vidro, ou seja, com o vidro pós consumo. O objetivo, com isto, era encontrar um destino útil para os resíduos de vidro destinados aos aterros, que consiste em um fator preocupante para o governo de Quebec (Canadá). Como resultado, o estudo obteve que em uma abordagem circular, ou seja, com o concreto a base de pó de vidro aplicado à calçada de Montreal (caso real estudado) poderiam ser alcançados benefícios ambientais. Através da ACV constatou-se reduções em todos os indicadores ambientais de ponto médio e ponto final. Para o concreto contendo pó de vidro obteve-se o resultado de uma redução de 20% na emissão de gases de efeito estufa (em CO₂eq) em comparação com o concreto convencional.

O estudo de Su et al. (2013), apontou o interesse em desenvolver a EC na China, onde tanto o esgotamento de recursos quanto as questões ambientais são graves. O estudo visava avaliar, sobre diferentes aspectos, o desempenho da EC em Dalian, cidade onde o governo tomou uma série de iniciativas para implementar as estratégias de EC, este desempenho foi comparado com outras três cidades no país, Pequim, Xangai e Tianjin. Os autores avaliaram alguns indicadores, como consumo de água, consumo de energia, geração de resíduos per capita, taxa de disposição segura de resíduos e outros. No que diz respeito aos resíduos, o estudo mostrou que Dalian reduziu o lixo municipal em 17% em 2010 quando comparado a 2005, a maior redução entre todas as cidades, Xangai e Tianjin falham em reduzir os níveis de geração de resíduos. Contudo, o trabalho de Su et al. (2013) avaliou a aplicação da EC mais sobre o aspecto de legislações e incentivos do que aspectos práticos, ou seja,

não apresenta dados sobre taxa de reciclagem ou outro modo de tratamento de resíduos e não explicita, também, as medidas para conservação de energia.

O trabalho de Liu et al. (2017), também na China, mostra que há realizações notáveis no desenvolvimento da economia circular no país na última década, e conta com mais de 200 normas e leis nacionais que estabeleceram a sistemática da economia circular, como resultado é observada uma eficácia da reciclagem e utilização de resíduos. O estudo destacou as taxas de reciclagem de lixo eletrônico e de veículos em final de vida, estes tiveram um aumento de 24,64 e 32,4% em 2010 para 34,6 e 45,7% em 2014, respectivamente. Por fim, como uma das formas de alcançar a redução de resíduos, a recuperação de recursos e o descarte seguro, o trabalho de Liu et al. (2017) destacou a importância de se ter instalações domésticas de coleta seletiva, instalações de separação e descarte de resíduos.

Malinauskaite, et al. 2017, ao estudarem as formas de tratamento de resíduos sólidos e economia circular em alguns países que compõem a União Europeia, concluíram que a deposição em aterro ainda é um problema na maioria dos Estados-Membros, especialmente na Grécia (81%) e na Letônia (79%), seguida pela Lituânia e Espanha (55% cada). Os autores destacaram ainda, que a Estônia é o país que destina menor quantidade de RSU a aterros (somente 5% em 2015), o que se deve principalmente à recuperação de energia, que aumentou de 16% em 2012 para 56% em 2014.

É preciso destacar que na Europa, há um conjunto de diretrizes para transição para uma Economia Circular, a Comissão Europeia (CE), através de um plano de ação da União Europeia para Economia Circular, traz uma série de objetivos a serem cumpridos em longo prazo a fim de reduzir a deposição em aterro e aumentar a preparação para a reutilização e a reciclagem dos principais fluxos de resíduos, como resíduos urbanos e resíduos de embalagens (COM, 2015a). Em avaliações de impactos presentes no documento disponibilizado pela CE (COM, 2015b), espera-se que com a adoção de medidas propostas para gestão de resíduos sólidos nos Estados-Membros possa-se gerar mais de 170.000 postos de trabalho diretos até 2035 e, ainda, poderão ser evitados mais de 600 milhões de toneladas de gases com efeito de estufa.

O estudo de Tisserant et al. (2017), apontou que a Austrália, o Canadá e os Estados Unidos apresentam mais ações de reciclagem do que a UE, por outro lado a fração de resíduos sólidos urbanos destinada a aterros é duas vezes maior do que na UE. Nos países europeus, as tecnologias de mercado que devem ser ainda mais utilizadas como alternativas para recuperar produtos são a digestão anaeróbia, a pirólise e a gaseificação, porém, para que a destinação final dos resíduos deixe de ser os aterros é necessário que os governos tomem algumas medidas, como introduzir uma alta taxa de impostos para aterros sanitários, assim, a recuperação de energia passaria a ser mais economicamente viável (MALINAUSKAITE, et al., 2017).

A partir de uma análise das publicações referentes ao tema em diferentes regiões do mundo, nota-se que a reciclagem é frequentemente citada como um dos principais meios capazes de favorecer a transição para uma EC quanto ao gerenciamento de RSU. É preciso implantar e tornar eficiente a coleta seletiva e isto representa um desafio. Alguns estudos, como o de Ferronato et al. (2019), apontam a importância de catadores para a introdução da EC, destacados pelos autores como profissionais informais responsáveis por grande parte das atividades de reciclagem. Neste contexto, sabe-se que a China apresenta problemas com o RSU que é frequentemente misturado devido à falta de conscientização sobre a classificação de resíduos para reciclagem, como há uma quantidade significativa de catadores e funcionários informais de reciclagem que adquirem e compram os materiais recicláveis, a taxa de reciclagem é significativa (LIU et al., 2017).

2.7.3. Estrutura conceitual da relação entre meio ambiente, recuperação de energia e o sistema de economia circular

Para o estudo da gestão de resíduos sob o conceito de economia circular faz-se necessário entender a relação entre este sistema de economia, as formas de aproveitamento dos resíduos, que inclui a recuperação de energia, e o meio ambiente. Esta relação pode ser observada através da Figura 2.19 do trabalho de Pan et al. (2015).

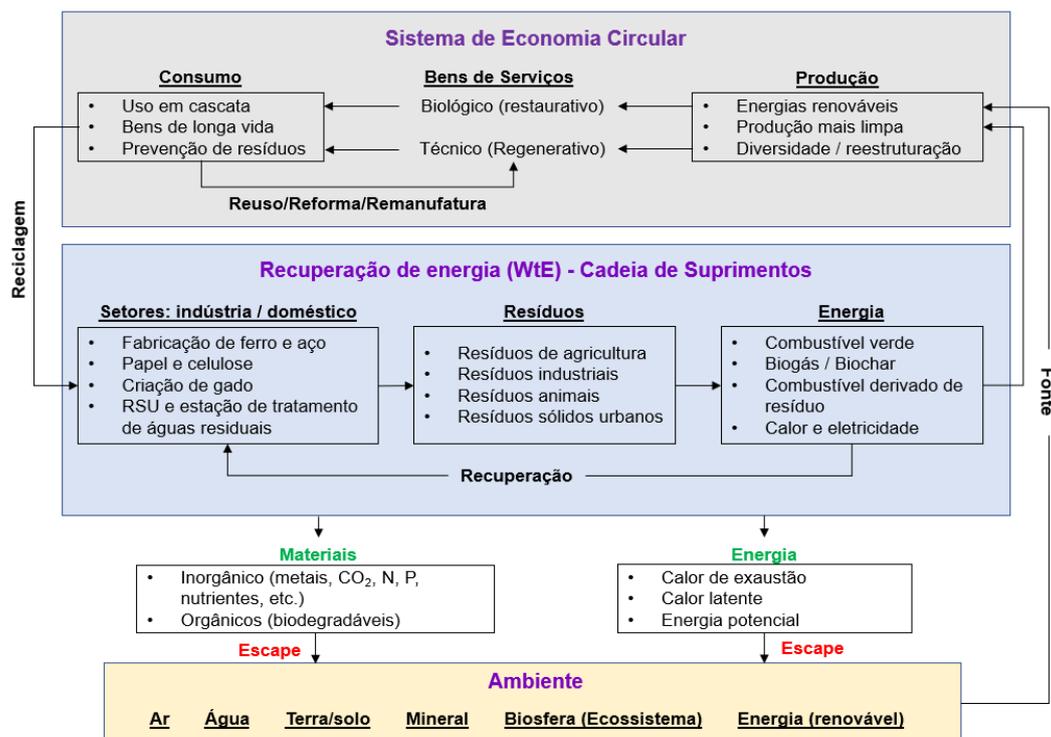


Figura 2.19: Estrutura conceitual da relação entre o sistema de economia circular, cadeias de suprimento em recuperação de energia e meio ambiente. Fonte: Traduzido de Pan et al. (2015).

Pode-se notar em um sistema de economia circular deve ser mantido um comportamento restaurativo. Porém, este comportamento deve ser mantido na relação com a recuperação de energia e com o meio ambiente. A cadeia de suprimentos necessita de energia e pode receber materiais pós-consumo através do processo de reciclagem. O meio ambiente, por sua vez, pode receber insumos materiais ou energéticos que podem ser utilizados como novas fontes de energia para a produção de novos bens e serviços.

Conforme observado na Figura 2.19, o ambiente ao oferecer fontes de energia renovável ao sistema de produção, que por sua vez gera bens de consumo, contribui para o sistema de economia circular. De forma semelhante, a partir do sistema de economia circular, pode-se empregar insumos provenientes da reciclagem no setor industrial e doméstico, que produz resíduos e estes podem ser recuperados sob a forma de energia e, assim, pode ser reaplicada no sistema produtivo.

Desta forma, o ciclo não se completaria somente dentro do sistema que envolve a produção e o consumo, ou seja, é necessário que haja uma interação entre a recuperação de energia e cadeia de suprimentos com o meio ambiente e destes com o sistema produtivo (constituente do sistema de economia circular) para que seja solucionado o problema da escassez de recursos e minimização de impactos ao ambiente, como a emissão de CO₂, por exemplo. Então, uma menor quantidade de materiais liberados e depositados no ambiente favorece, a aplicação de um modelo de economia circular.

3. Metodologia

A fim de avaliar os benefícios do tratamento do RSU com a aplicação do conceito de economia circular, foram levados em conta os dados populacionais mais recentes do IBGE (2018) e, ainda, dados sobre a produção média de resíduos conforme o SNIS (2019). Para cada tecnologia de tratamento foram calculados os potenciais energéticos e a viabilidade econômica, considerando as rotas bioquímicas e termoquímicas.

A partir das tecnologias consideradas, alguns cenários foram criados a fim de verificar as melhores alternativas que poderiam ser implementadas em função do tamanho populacional. Os cenários foram criados associando o emprego das tecnologias à reciclagem a fim de incorporar o conceito de economia circular à gestão de RSU. Sabe-se que, conforme o IBGE (2018), o estado de Minas Gerais é composto por municípios de portes diferentes, onde a população destes municípios varia entre 786 habitantes, caso do município de Serra da Saudade, até 2.501.576 habitantes como em Belo Horizonte, na capital do estado. Por isso, os municípios foram classificados em classes populacionais e os cenários foram aplicados à estas classes.

Após a análise das tecnologias nos municípios, avaliou-se a aplicação destas para o caso de municípios agrupados em consórcios, que também foram separados em classes populacionais para realização das estimativas. Para melhor caracterização dos resultados o *software* QGIS (2017) foi utilizado para elaboração de mapas temáticos.

As seções seguintes trazem as hipóteses assumidas, a metodologia empregada, bem como o memorial de cálculo aplicado no trabalho. A Figura 3.1 apresenta o fluxograma geral da metodologia utilizada no trabalho.

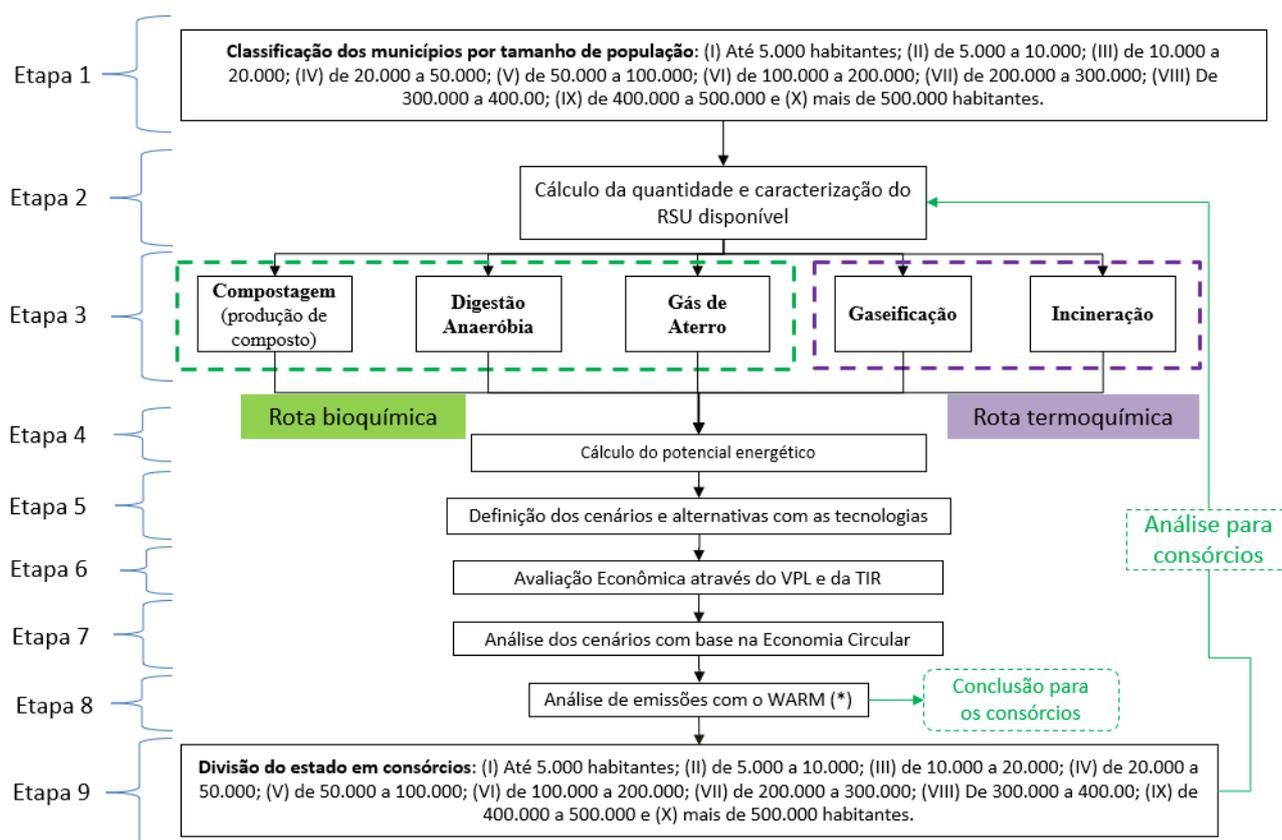


Figura 3.1: Fluxograma geral de atividades do trabalho.

Assim, conforme a Figura 3.1, inicialmente foram levantados os dados populacionais dos 853 municípios e estes foram classificados por tamanho de população (Etapa1). A Etapa 2 constitui no cálculo das quantidades de RSU geradas conforme a população. Na Etapa 3 foram selecionadas as tecnologias a serem analisadas. Selecionou-se três rotas bioquímicas para tratamento do RSU: (I) a compostagem, (II) a digestão anaeróbia e o (III) aterro com recuperação de biogás (para queima em *flare* e para geração de energia). Além disso, o trabalho comparou também o uso de duas rotas termoquímicas: (IV) a incineração e a (V) gaseificação. A pirólise é considerada uma tecnologia que ainda se encontra em desenvolvimento (CHEN et al., 2018), por isso não foi analisada no trabalho.

Na Etapa 4 foi realizado o cálculo do potencial para geração de energia nos casos em que era possível gerá-la, ou seja, a partir do gás de aterro, da digestão anaeróbia, da incineração e da gaseificação. Para o caso da compostagem avaliou-se quantidade de composto produzida. Com as tecnologias e as alternativas de uso destas, foram definidos cenários (Etapa 5).

Em seguida, na Etapa 6 foi feita a avaliação de viabilidade econômica através do VPL e da TIR com as tecnologias e suas alternativas de uso. Estes cenários foram avaliados do ponto de vista de Economia Circular na Etapa 7, onde foram definidos os mais adequados dentro deste conceito.

A Etapa 8 consiste em avaliar as emissões evitadas com os projetos, tomando-se como caso base um cenário com envio de todo o RSU gerado enviado para aterro com recuperação do gás e queima em flare, ou seja, sem recuperação energética. Para isso, foi utilizado o *software Waste Reduction Model (WARM)*, exceto para estimativa das emissões com a gaseificação. Como o WARM não aborda a gaseificação entre as alternativas de tratamento, utilizou-se a metodologia AM0025 (UNFCCC, 2012) para estimativa das emissões relativas às frações do RSU destinadas à gaseificação.

Na Etapa 9 procedeu-se à divisão do estado em consórcios conforme as microrregiões que compõe o estado de acordo com o IBGE. Assim, foram feitas as análises seguindo-se as etapas 2, 3, 4, 5, 6 e 8 para a divisão em consórcios. A etapa 6 levou em conta a viabilidade econômica calculada para o caso dos municípios de forma isolada, de modo que os cálculos não foram refeitos e sim aproveitados para as faixas populacionais dos consórcios formados. Como a Etapa 7 consistia apenas em avaliar os cenários do ponto de vista da economia circular, não se repetiu esta etapa, pois foram mantidos os cenários e alternativas para o caso dos consórcios.

Assumindo-se inicialmente que nem todas as tecnologias seriam viáveis para aplicação em municípios de quaisquer faixas populacionais, verificou-se a possibilidade de se constituir consórcios, a fim de reunir uma maior quantidade de resíduos para tratamento. Assim, após avaliadas as tecnologias e cenários para os municípios do estado, analisou-se o potencial de aplicação das tecnologias para o caso da formação de consórcios, dividindo-se o estado por microrregiões.

3.1 Dados sobre população e quantidade de resíduos gerada

Os dados populacionais dos municípios do estado de Minas Gerais foram obtidos através de estimativas de IBGE (2018) para a data de referência de 1º de julho de 2018. Os 853 municípios do estado foram classificados em faixas populacionais conforme a Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Classificação dos municípios por faixa populacional

Faixa – intervalo	Número de municípios
Até 5.000 habitantes	233
De 5.001 até 10.000	243
De 10.001 até 20.000	193
De 20.001 até 50.000	113
De 50.001 até 100.000	39
De 100.001 até 200.000	19
De 200.001 até 300.000	5
De 300.000 até 400.000	2
De 400.001 até 500.000	2
500.001 ou mais	4

Utilizou-se o limite superior de cada faixa populacional para o cálculo da quantidade de resíduos a ser tratada, ou seja, partindo de 5.000 habitantes referente a faixa “Até 5.000 habitantes”, 10.000 para a faixa “De 5.001 até 10.000 habitantes”, e assim por diante. Para a última classe, ou seja, 500.001 assumiu-se o limite superior de 3.000.000 de habitantes, que engloba a população do município de Belo Horizonte, capital do estado e município mais populoso, com 2.501.576 habitantes.

A quantidade de resíduos gerada em uma região pode ser obtida conforme o SNIS (2019) através do índice de massa coletada, que é um indicador que pode ser calculado a partir de informações disponíveis no site do SNIS conforme a Equação 3.1:

$$IN021 = \left(\frac{CO116+CO117+CS048+CO142}{Pop. urb.} \right) \cdot \left(\frac{1000}{365} \right) \quad (3.1)$$

Onde:

IN021 = índice de massa coletada (kg/habitante/dia)

CO116 = Quantidade de resíduos domésticos (RDO) e públicos (RPU) coletada pelo agente público (Tonelada/ano)

CO117 = Quantidade de RDO e RPU coletada pelos agentes privados (toneladas/ano)

CS048 = Quantidade recolhida na coleta seletiva executada por associações ou cooperativas de catadores com parceria/apoio da Prefeitura (Toneladas/Ano)

CO142 = Quantidade de RDO e RPU coletada por outros agentes executores (tonelada/ano)

Pop. Urb. = População Urbana [habitantes]

(1000/365) = Conversão de toneladas/ hab. /ano para kg/hab./dia

Os indicadores “CO116”, “CO117”, “CS048”, “CO142” e “Pop. Urb.” de todos os municípios que disponibilizaram as informações no SNIS (2019) foram obtidos. Posteriormente, considerou-se um índice de massa coletada médio para o estado e a partir da multiplicação do índice pela população tem-se a quantidade de resíduos a ser considerada.

3.2 Caracterização do RSU

Os dados sobre a composição gravimétrica do RSU foram obtidos de ABRELPE (2011), e corresponde à composição média dos municípios brasileiros. A Tabela 3.2 mostra a composição gravimétrica utilizada no trabalho.

Tabela 3.2: Composição gravimétrica média dos municípios brasileiros. Fonte: ABRELPE (2011)

Material	Participação (%)
Metais	2,9
Papel, Papelão e <i>TetraPak</i>	13,1
Plástico	13,5
Vidro	2,4
Matéria Orgânica	51,4
Outros	16,7
Total	100

Observa-se que 51,4% dos resíduos gerados correspondem a matéria orgânica e que até 31,9% dos resíduos têm a possibilidade de serem reciclados, porção correspondente a metais; papel, papelão e *TetraPak*; plástico e vidro. A composição gravimétrica é importante para determinar as alternativas para o tratamento, como no caso da compostagem e digestão anaeróbia, que são alternativas capazes de tratar a fração orgânica do RSU produzidos nas cidades.

3.3 Alternativas tecnológicas consideradas para o tratamento dos RSU

As alternativas apresentadas nas seções seguintes podem ser integradas à reciclagem para o tratamento dos resíduos de modo a promover a economia circular, para isso, algumas considerações são feitas. Considerou-se que nem todos os metais e vidros poderiam ser reciclados, tendo em vista que existe uma fração reciclável e não reciclável, por exemplo, o latas de aerossol, latas de tinta, latas de pesticidas e inseticidas, pilhas, baterias e esponjas de aço, ainda, dentre os vidros tem-se espelho, porcelana, cerâmica, lâmpada, cristal e vidro como materiais não recicláveis MMA (2019). Por isso, foi assumido que é possível reciclar somente 50% dos metais e dos vidros.

Foi considerado que a recuperação energética através do gás de aterro não estaria em conformidade com a economia circular, já que não estaria priorizando o reuso ou reciclagem, por exemplo. Porém, foi avaliado seu potencial e sua viabilidade de aplicação. Após isto, pôde ser comparado com as demais alternativas.

3.3.1 Compostagem

Calculou-se a produção de composto considerando-se uma produção de 250 kg para cada tonelada de material compostável (IPEA, 2012). Levando-se em conta a composição gravimétrica da Tabela 3.2, tem-se 0,514 toneladas de matéria orgânica para cada tonelada de resíduo. Respeitando-se esta

relação, para cada tonelada de RSU tem-se 0,514 toneladas de material orgânico e conseqüentemente 0,128 toneladas de composto.

3.3.2 Digestão Anaeróbia

A digestão anaeróbia pode produzir composto e biogás (que pode ser utilizado para a produção de eletricidade) conforme as proporções mostradas na Figura 2.7, da Seção 2.3.2, que indica a produção em função de uma tonelada de resíduo orgânico. As quantidades de Biogás gerada e coletada em um ano são dadas pelas Equações 3.2 e 3.3 conforme proposto por Dos Santos et al. (2019):

$$\dot{Q}_{BG} = R_o \cdot I_{BG} \quad (3.2)$$

Onde:

\dot{Q}_{BG} = Biogás gerado por ano (m³/ano)

R_o = Resíduo sólido orgânico gerado em toneladas por dia, que é fração orgânica multiplicada pela quantidade de resíduos (t/ano)

I_{BG} = Quantidade média de biogás produzido, conforme a Figura 2.7 (m³/tonelada de RSU orgânico).

$$\dot{Q}_{col} = \dot{Q}_{BG} \cdot E_{col} \quad (3.3)$$

Onde:

\dot{Q}_{col} = Quantidade de biogás coletada (m³/ano)

E_{col} = Eficiência de coleta do biogás (%)

A partir disto, calculou-se o potencial para geração de energia elétrica. A potência disponível no biogás é dada pela Equação 3.4:

$$P_L = \dot{Q}_{col} \cdot \eta \cdot PCI_{BG} \cdot F \cdot \left(\frac{1}{31536} \right) \quad (3.4)$$

Onde:

P_L = Potência disponível no biogás (kW)

\dot{Q}_{col} = Vazão de biogás coletada (m³/ano)

η = Eficiência térmica do Motor de Combustão Interna (%)

PCI_{BG} = Poder Calorífico Inferior do biogás = PCI do metano (MJ/m³)

F = Fração de metano no Biogás (%)

$(1/31536) =$ Fator de conversão de MJ.ano^{-1} para kW

A energia elétrica gerada é calculada através da Equação 3.5.

$$E = \frac{P_L \cdot 8000}{10^3} \quad (3.5)$$

Onde: E é a Energia elétrica gerada em MWh.ano^{-1} ; 8000 é o número de horas de operação do MCI por ano (DALMO et al., 2019); 10^3 é o valor para transformação de kWh em MWh. A Tabela 3.3 traz os dados considerados para o cálculo do potencial para a digestão anaeróbia.

Tabela 3.3: Valores considerados para as variáveis no cálculo do potencial da digestão anaeróbia

Variável	Valor considerado	Fonte:
I_{BG}	$100 \text{ m}^3 / \text{t}_{RSU}$	Ostrem (2004)
E_{col}	90%	Dos Santo et al. (2019)
H	33%	CETESB (2006)
PCI do metano	$35,53 \text{ MJ/m}^3$	Dalmo et al. (2019)
F	0,6	Ostrem (2004)
Produção de composto	$423\text{kg de composto} / \text{t}_{RSU}$	Ostrem (2004)

3.3.3 Incineração

Para obter o potencial energético disponível nos resíduos partir da incineração com recuperação energética é necessário obter o PCI da mistura de RSU. O PCI foi obtido, conforme Lino & Ismail (2018) e Dos Santos et al. (2019), pela Equação 3.6.

$$PCI_{total} = \sum_i^m E_i \cdot PCI_i \quad (3.6)$$

Onde:

PCI_{total} = Poder Calorífico Inferior total dos RSU (kcal/kg)

PCI_i = Poder Calorífico Inferior do elemento (i) (kcal/kg)

E_i = Fração do elemento combustível (i) na mistura de RSU (%)

A Tabela 3.4 apresenta o PCI de cada elemento (i).

Tabela 3.4: PCI dos principais materiais que compõem o RSU. Fonte: EPE (2008)

Material	PCI (kcal/kg)
Matéria orgânica	1310
Madeira	2520
Têxteis e couro	3480
Papel Papelão	4030
Plástico	6300

A Tabela 3.5 a composição gravimétrica média conforme PMGIRS-BH (2016).

Tabela 3.5: Composição gravimétrica considerada para os RSU. Fonte: PMGIRS-BH (2016)

Material	Percentual
Matéria orgânica	43,05%
Madeira	0,25%
Têxteis e couro	2,07%
Papel, Papelão	15,66%
Plástico	12,35%
Vidro	3,14%
Metais	3,23%
Pedra cerâmica	1,48%
Diversos	18,78%

A potência elétrica produzida pela recuperação energética dos RSU utilizando a tecnologia de incineração foi obtida através da Equação 3.7.

$$P_{inc} = PCI_{total} \cdot 4,184 \cdot 10^{-3} \cdot \eta \cdot \dot{M}_{RSU} \cdot \frac{1000}{86400} \quad (3.7)$$

Onde:

P_{inc} = Potência elétrica produzida pela planta de incineração (kW)

PCI_{total} = Poder Calorífico Inferior total dos RSU (kcal/kg)

$4,184 \times 10^3$ = fator para conversão de kcal/kg para MJ/kg

η = eficiência elétrica líquida da planta

\dot{M}_{RSU} = Massa total dos RSU (kg/dia)

$\frac{1000}{86400}$ = conversão de MJ.dia⁻¹ para kW

A energia elétrica gerada foi calculada através da Equação 3.8.

$$E = \frac{P_{inc} \cdot 8000}{10^3} \quad (3.8)$$

Onde:

E = Energia elétrica gerada em MWh.ano⁻¹

8000 = Número de horas de operação da planta por ano (WHITING et al., 2013).

Para a incineração, inicialmente, calculou-se um potencial máximo para geração de energia elétrica, onde não foi priorizada a reciclagem de materiais. Para o caso da composição gravimétrica média dos municípios brasileiros assumiu-se, inicialmente, o envio de matéria orgânica, papéis e plásticos para a incineração, a fim de avaliar o potencial máximo com as características de resíduos conhecidas. Para o caso da composição detalhada de Belo Horizonte, assumiu-se o envio de matéria orgânica, madeira, têxteis e couro, plástico e papel, inicialmente.

Assumiu-se para o cálculo da potência uma eficiência líquida para a planta de 26%, conforme FEAM (2012). Após o cálculo do potencial máximo, avaliou-se o potencial ao enviar somente as frações de madeira e de têxteis e couro para a incineração, respeitando-se a prioridade de reciclagem, bem como envio da fração orgânica para o tratamento com compostagem ou digestão anaeróbia. Neste segundo caso foi feito o cálculo somente para a composição gravimétrica do município de Belo Horizonte que contém os dados necessários para tal. Este caso seria, então, mais adequado à economia circular.

3.3.4 Gaseificação

Para o cálculo do potencial energético com a gaseificação considerou-se, então, a retirada da fração correspondente a “vidro”, “outros” e aos “metais” na fase de pré-tratamento. Após isso tem-se a remoção de umidade do resíduo e em seguida a briquetagem, a partir disto tem-se a massa de Combustível Derivado de Resíduo (CDR) utilizada na gaseificação (NÁSNER, et al. 2017).

O potencial foi calculado de forma semelhante ao apresentado em Dalmo et al. (2019) conforme a Equação 3.9, ou seja, em função da massa de CDR, eficiência da planta de gaseificação e do PCI do CDR.

$$P_{gaseif} = \dot{m}_{CDR} \cdot PCI_{CDR} \cdot \eta_g \cdot \frac{1000}{86400} \quad (3.9)$$

Onde:

$P_{gaseif.}$ = Potência elétrica obtida do gás da gaseificação (kW)

\dot{m}_{CDR} = Massa de CDR (kg.dia⁻¹) onde, conforme Násner et al. (2017) a massa de CDR é de aproximadamente 34% da massa de resíduos que entra no sistema de pré-tratamento devido a perdas ao passar pelas operações de secagem, moagem e briquetagem.

PCI_{CDR} = Poder calorífico do CDR (MJ/kg)

η_g = Eficiência térmica da planta de gaseificação (%)

$\frac{1000}{86400}$ = conversão de MJ.dia⁻¹ para kW

A Tabela 3.6 apresenta o PCI para o CDR considerado, conforme Násner et al. (2017).

Tabela 3.6: PCI do CDR. Fonte: Násner et al. (2017)

Parâmetro	Composição [%]			Poder Calorífico [MJ/kg]
	Papel	Plástico	Matéria Orgânica	CDR
Umidade	10	0	60	12,00
Carbono	44	60	48	49,40
Hidrogênio	6	7	6	6,50
Oxigênio	44	23	38	36,10
Nitrogênio	0	0	2	1,50
Enxofre	0	0	0,3	0,30
-	-	-	-	-
PCI [MJ/kg]	19,83	31,82	12,45	15,2

A energia elétrica gerada pela gaseificação foi obtida através da Equação 3.10:

$$E = \frac{P_{gaseif} \cdot FD \cdot 8760}{10^3} \quad (3.10)$$

Onde:

8760 = Número de horas de um ano

FD = Fator de disponibilidade da planta (%)

E = Energia gerada em MWh.ano⁻¹

Para a fração “outros” do RSU o PCI do CDR foi calculado através da Equação 3.11 (GUTIERREZ, 2016 apud DALMO et al., 2019).

$$PCI_{CDR} = PCS \cdot \left(1 - \frac{U}{100}\right) - 2,444 \cdot \left(\frac{U}{100}\right) - 2,444 \cdot \left(\frac{H}{100}\right) \cdot \left(8,936 \cdot \left(1 - \frac{U}{100}\right)\right) \quad (3.11)$$

Onde:

PCI_{CDR} = Poder Calorífico do CDR (MJ/kg)

PCS = Poder Calorífico Superior (MJ/kg), que neste caso foi obtido conforme a Equação 3.12 de Dulong apud Násner (2015)

U = umidade (%)

H = concentração mássica de hidrogênio (%)

$$PCS = 337,3 \cdot C + 1418,9 \cdot \left(H - \frac{O}{8}\right) + 93,1 \cdot S + 23,3 \cdot N \cdot \frac{1}{1000} \quad (3.12)$$

Onde:

C = concentração mássica de carbono (%)

H = concentração mássica de hidrogênio (%)

S = concentração mássica de enxofre (%)

N = concentração mássica de nitrogênio (%)

$\frac{1}{1000}$ = fator de conversão de kJ/kg para MJ/kg

Os dados para o cálculo do PCI_{CDR} e do PCS são dados na Tabela 3.7.

Tabela 3.7: Dados da fração outros utilizados no cálculo do PCI do CDR. Fonte: Adaptado de Henríquez (2016)

Componente	Umidade (U)	Carbono (C)	Hidrogênio (H)	Oxigênio (O)	Nitrogênio (N)	Enxofre (S)
Composição (%)	0	26,3	3	2	0,5	0,2

A Tabela 3.8 traz os dados considerados para o cálculo do potencial para geração de energia elétrica utilizando a tecnologia de gaseificação.

Tabela 3.8: Valores considerados para as variáveis no cálculo do potencial da gaseificação

Variável	Valor considerado	Fonte:
PCI _{CDR} : para fração orgânica mais papel e plástico	15,2 MJ/kg	Násner et al. (2017)
PCI _{CDR} : para fração de papel + plástico + outros	14,9 MJ/kg	Henríquez (2016)
PCI _{CDR} : para fração	Calculado através da Equação 3.11	
η_g	19,30%	Dalmo et al. (2019)
FD	0,83	Whiting et al. (2013, p.186)
$\dot{m}_{CDR}^{(*)}$	34% da massa de RSU destinado ao tratamento	Násner et al. (2017)

(*) massa após o pré-tratamento

3.3.5 Gás de aterro

Ao considerar a recuperação do biogás produzido em aterro, o presente trabalho considerou que todo o RSU produzido é enviado para aterro e o biogás produzido e recuperado é utilizado para a geração de energia elétrica utilizando a tecnologia de Motor de Combustão Interna. Para o cálculo do potencial energético com gás de aterro utilizou-se a metodologia do Painel Intergovernamental Sobre Mudanças Climáticas (IPCC). A Equação 3.13 Permite calcular a produção anual de metano:

$$L_0 = RSU_{anual} \cdot COD \cdot COD_f \cdot FCM \cdot F \cdot \frac{16}{12} \quad (3.13)$$

Onde:

L_0 = Quantidade de metano gerada anualmente (kg CH₄/ano)

RSU_{anual} = Quantidade de resíduo gerada anualmente (kg/ano)

COD = carbono orgânico degradável (kg de C por kg de RSU), calculado conforme a Equação 3.14

COD_f = fração de COD dissociada

FCM = Fator de correção de metano

F = Fração de CH₄ em volume no gás de aterro (%)

$\frac{16}{12}$ = Fator estequiométrico para conversão de carbono em CH₄.

A Equação 3.14 apresenta o cálculo do carbono orgânico degradável:

$$COD = \Sigma (COD_i \times W_i) \quad (3.14)$$

Onde:

COD_i = a fração de carbono orgânico degradável do tipo de resíduo i

W_i = a fração do tipo de resíduo

Assim, para o cálculo do COD foi utilizada a composição gravimétrica da Tabela 3.2 e os dados da Tabela 3.9.

Tabela 3.9: Valores de COD. Fonte: IPCC (1996)

Tipo de Resíduo (Wi)	Massa de CODi
Matéria orgânica	15%
Resíduo de jardins	17%
Papel/papelão/ tetrapak	40%
Madeira	30%

Desta forma a vazão anual de metano (m^3/ano) é obtida pela Equação 3.15:

$$\dot{Q}_{Col} = \frac{\dot{L}_0}{\rho_{CH_4}} \cdot E_{col} \quad (3.15)$$

Onde:

\dot{Q}_{Col} = vazão anual de metano (m^3/ano)

ρ_{CH_4} = massa específica do metano (kg/m^3)

E_{col} = eficiência do sistema de coleta do biogás (%)

Assim, a potência elétrica disponível no biogás foi calculada conforme a Equação 3.16.

$$P = Q_{Col} \cdot \eta \cdot PCI_{CH_4} \cdot \left(\frac{1}{31536} \right) \quad (3.16)$$

Onde:

P = Potência elétrica

Q_{col} = Quantidade de metano coletada (m^3/ano)

η = é a eficiência da conversão para motor de combustão interna

PCI_{CH_4} = Poder calorífico inferior do metano (MJ/m^3)

$\frac{1}{31536}$ = fator de conversão de $\text{MJ} \cdot \text{ano}^{-1}$ para kW

A eficiência da conversão de energia depende do tamanho do motor e da carga, ou seja, se o motor opera com a carga nominal, pode-se converter entre 33 e 40% da energia primária em energia elétrica (SILVEIRA et al., 2015). A Fabricante Dreyer & Bosse (2014), apresenta uma linha de motores a combustão (com a utilização de biogás) para operação em plantas de cogeração, onde as potências variam entre 75 e 2.000 kW_{el} . com eficiências entre 36,2% e 42,0%, respectivamente. No entanto, como a eficiência pode variar de acordo com a potência elétrica instalada e com a carga, assumiu-se no trabalho uma eficiência média de 33% (observados os dados disponíveis na literatura) a fim de não haver uma superestimativa no potencial elétrico.

A energia elétrica gerada com o gás de aterro foi calculada através da Equação 3.17, onde considerou-se 8000 horas de operação anual, assim como assumido por Gómez et al. (2010).

$$E = \frac{P \cdot 8000}{10^3} \quad (3.17)$$

Onde:

E = Energia elétrica gerada em GWh.ano⁻¹

8000 = Número de horas de operação dos MCI por ano

10^3 = Coeficiente para transformação de kWh em MWh

A Tabela 3.10 traz os dados considerados para o cálculo do potencial com o gás de aterro.

Tabela 3.10: Dados considerados para o cálculo do potencial com o gás de aterro

Variável	Valor considerado	Fonte:
COD_f	0,5	IPCC (2001)
FCM	1,0 (*)	Scarlat et al. (2015)
F	0,5	IPCC (2001)
ρ_{CH_4}	0,7167	Akunna (2018)
E_{col}	75%	Scarlat et al. (2015)
η	33%	CETESB (2006), Silveira et al. (2015)
PCI do metano	35,53 MJ/m ³	Dalmo et al. (2019)

(*) Para aterro controlado.

3.4 Cenários assumidos para o cálculo do potencial de geração de energia elétrica e compostagem

Além do uso de cada tecnologia, verificou-se a possibilidade de associação entre as tecnologias. Para a incineração, conforme a Lei 12.305, que diz que é preciso priorizar a reciclagem frente as opções de recuperação de energia, avaliou-se a possibilidade de incinerar somente algumas frações do RSU. Assim as três opções de incineração do RSU foram:

- Incineração das frações de “matéria orgânica”, “madeira”, “têxteis e couro”, “papel/papelão” e “plástico”;
- Incineração das frações de “madeira” e “têxteis e couro”;
- Incineração das frações de “plástico” e “papel”, para uma situação hipotética onde não fosse possível priorizar a reciclagem desses materiais, reciclando-se, portanto, somente metais e vidros.

Para a gaseificação, inicialmente, avaliou-se a gaseificação das frações de “matéria orgânica”, “papel” e “plástico”, ou seja, para uma maior quantidade de resíduos. Outra avaliação foi para o caso onde não fosse utilizada a matéria orgânica, para que se pudesse avaliar seu potencial aliado a outras tecnologias como a digestão anaeróbia e com a compostagem. Assim, utilizou-se as frações de rejeitos (outros); papel e plástico, com PCI de 14,9 MJ/kg, condição também assumida no trabalho de HENRÍQUEZ (2016).

A terceira possibilidade com a gaseificação seria em um caso no qual fosse priorizada a reciclagem dos materiais em conformidade com a Lei 12.305 e 2010. Assim, seria utilizada a fração “outros dos resíduos com a reciclagem das frações de papel e plástico; a matéria orgânica ficaria disponível para utilização na compostagem ou na digestão anaeróbia. Desta forma, os cenários assumidos para cálculo de potencial de aplicação são mostrados nas subseções seguintes.

3.4.1 Cenário 1: Compostagem associada à reciclagem

O Cenário 1 considera a aplicação da rota bioquímica de digestão aeróbia (compostagem) para a produção de composto em conjunto com um sistema de reciclagem. O fluxograma com a destinação dos resíduos assumido para a produção de composto com a compostagem é mostrado na Figura 3.2, onde parte do resíduo que não é compostável é destinada à reciclagem, de modo a reduzir o volume depositado em aterro.

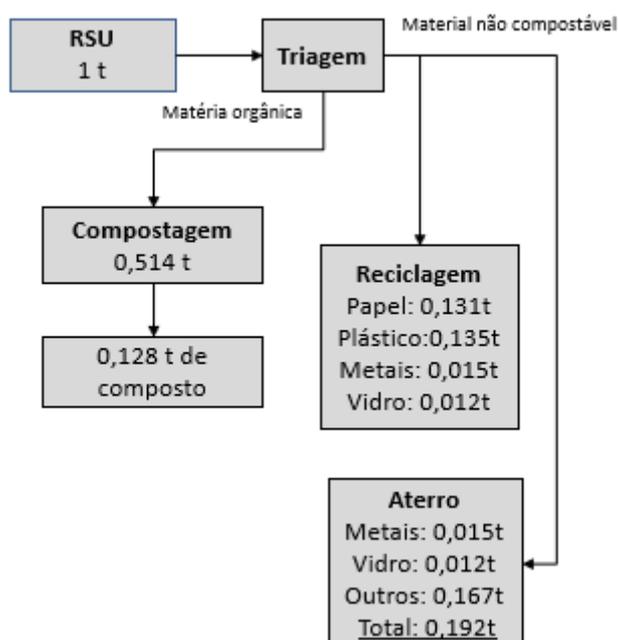


Figura 3.2: Fluxo de resíduos e produção de composto para o tratamento com compostagem.

Assim, neste cenário a fração orgânica, que corresponde a 51,4% do RSU, é enviada para a compostagem, 50% dos metais e o 50% dos vidros são enviados para a reciclagem, conforme as considerações da Seção 3.3, isso corresponde a um percentual de 1,5% e 1,2% dos resíduos, ou seja, percentual de metais e vidros, respectivamente. Além disso, assumiu-se que a reciclagem de papel (13,1%) e de plástico (13,5%). Para o aterro seriam enviados os 50% restantes de metais e 50% dos vidros, além da fração “outros”, totalizando 19,2 % do RSU depositado em aterro.

3.4.2 Cenário 2: Digestão Anaeróbia e reciclagem

Para este cenário foi utilizada outra rota bioquímica de tratamento de resíduos, através da tecnologia de digestão anaeróbia junto à reciclagem. O fluxograma da destinação dos resíduos no Cenário 2 é apresentado na Figura 3.3.

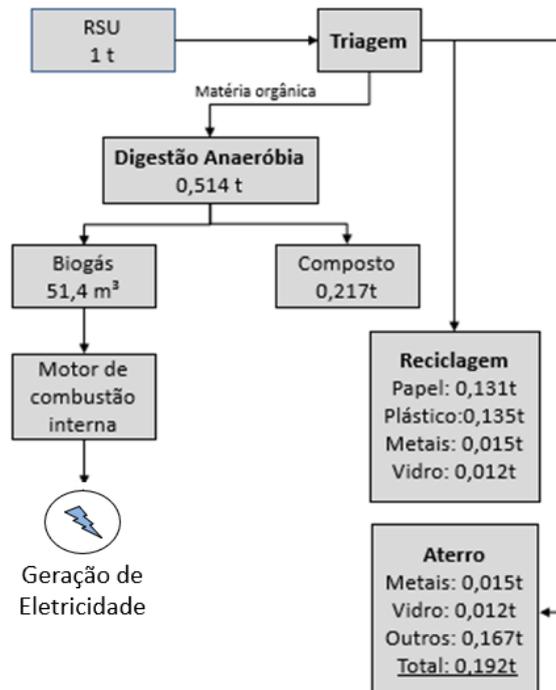


Figura 3.3: Fluxo de resíduos, produção de composto e biogás produzido para o tratamento com a digestão anaeróbia.

Para este cenário, tem-se o envio da fração orgânica (51,4%) dos RSU para a digestão anaeróbia, produzindo metano que posteriormente é utilizado em Motor de Combustão Interna e o composto produzido pode ser utilizado para a aplicação em solos. Assim como no Cenário 1, 50% dos metais e 50% dos vidros foram enviados à reciclagem, assim como papel e plástico, o que constitui um total de 29,3% do RSU sendo enviado para a reciclagem. O restante dos resíduos que corresponde a 19,2% é enviado para o aterro, este percentual é constituído de 50% dos metais e 50% dos vidros não passíveis de reciclagem e, também, pela fração outros.

3.4.3 Cenário 3: Alternativa 1 - Incineração e reciclagem de metais e vidros

O Cenário 3 considera a utilização da rota termoquímica através da tecnologia de incineração com recuperação energética dos RSU para geração de eletricidade em conjunto com um sistema de reciclagem de metais e vidros.

Dentro deste Cenário foram consideradas 3 alternativas para o emprego da incineração. A primeira delas considera que uma maior fração do RSU é incinerada. As outras duas, visam aliar o desempenho da tecnologia de incineração em conjunto com a digestão anaeróbia para a produção de energia, onde a Alternativa 2 visa uma maior taxa de reciclagem do que a Alternativa 3. Nestas alternativas a etapa de triagem tem um papel fundamental na separação dos resíduos para as plantas de produção de energia, de reciclagem e para o envio final de alguns materiais não aproveitáveis para o aterro.

A Figura 3.4 apresenta o fluxograma do RSU para o Cenário 3 - Alternativa 1 conforme a composição dos RSU apresentada em ABRELPE (2011). Figura 3.5 apresenta o fluxo de resíduos para o mesmo cenário, mas, neste caso com a composição conforme PMGIRS-BH (2016).

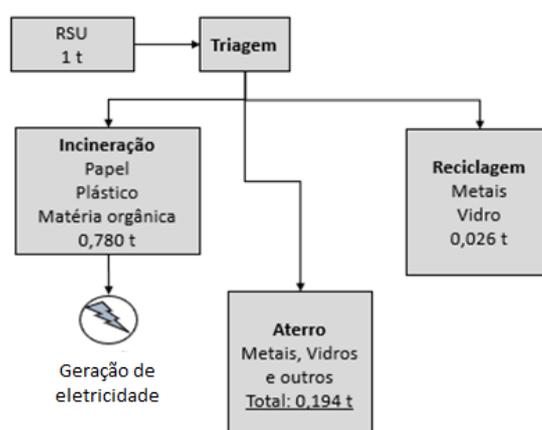


Figura 3.4: Fluxo de resíduos para o tratamento com incineração para a composição gravimétrica de ABRELPE (2011).

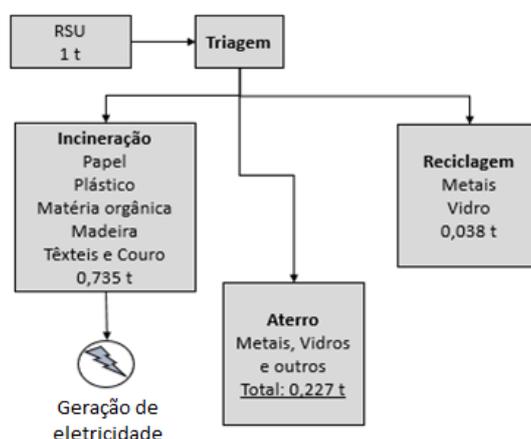


Figura 3.5: Fluxo de resíduos com incineração para a composição gravimétrica de PMGIRS-BH (2016).

Levando em conta que o PCI do RSU muda em função de sua composição, no caso de ser assumida a composição gravimétrica média dos municípios brasileiros apresentada pela ABRELPE (2011), 78% dos resíduos seriam enviados à incineração; 2,6% para a reciclagem e 19,4% para aterro. Esta composição gravimétrica tem como principal desvantagem o menor grau de detalhamento do RSU.

Ao considerar a composição dos RSU elaborada por PMGIRS-BH (2016), que apresenta valores da composição gravimétrica média mais detalhados em comparação à ABRELPE (2011), 73,5% dos RSU seriam enviados à planta de incineração, a taxa de reciclagem seria de 3,8% e a quantidade dos resíduos que seria enviada para o aterro representaria 22,7% do RSU gerado. A Tabela 3.11 apresenta o PCI considerando as composições do RSU da ABRELPE (2011) e de PMGIRS-BH (2016).

Tabela 3.11: PCI calculado para duas diferentes composições de RSU consideradas

Local	Composição	PCI (kJ/kg)
Brasil	ABRELPE (2011)	8.584
Belo Horizonte	PMGIRS-BH (2016)	8.583

3.4.4 Cenário 3: Alternativa 2 - Incineração associada à reciclagem e à digestão anaeróbia

Nesta alternativa, é priorizada a reciclagem, enviando-se somente “madeira” e “têxteis e couro” para a incineração. Foi considerada a composição dos resíduos de ABRELPE (2011), sendo a quantidade de madeira, têxteis e couro obtida de PMGIRS-BH (2016). Assim, com a reciclagem de papel, plástico, 50 % dos metais, 50% dos vidros e com a digestão anaeróbia da matéria orgânica, a quantidade restante dos resíduos iria para o aterro. A Figura 3.6 mostra o fluxograma da distribuição dos RSU no Cenário 3 – Alternativa 2.

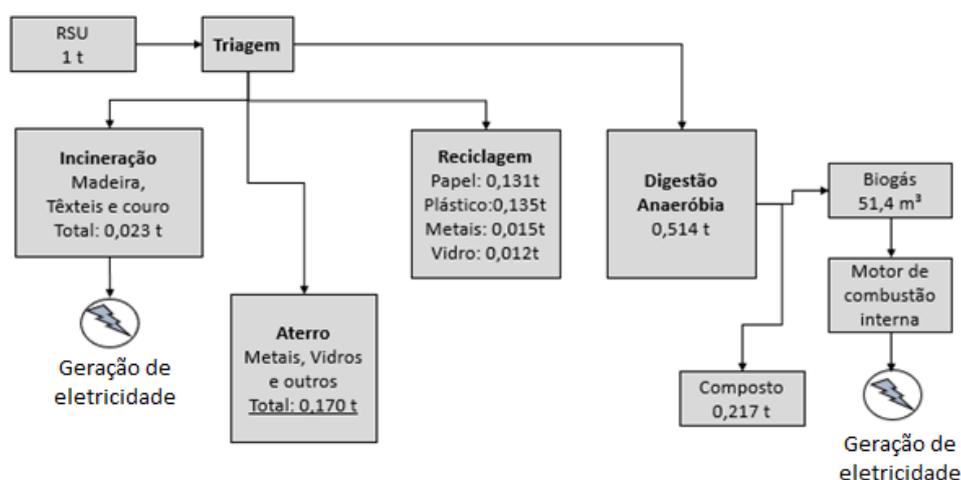


Figura 3.6: Fluxo de resíduos para o tratamento com incineração associada à reciclagem e à digestão anaeróbia.

Levando-se em conta que a maior parte dos RSU é destinada para as etapas de reciclagem e digestão anaeróbia, a incineração recebe somente uma fração mínima dos resíduos, constituída principalmente pelas frações “madeira” e “têxteis e couro”. Estas frações representam 0,25% e 2,07% dos RSU. Assim, seriam enviados para a incineração aproximadamente 2,3% dos resíduos, 29,3% estaria disponível para a reciclagem e 51,4% do RSU seria enviado para a digestão anaeróbia, gerando energia e composto. Neste caso, seriam destinados ao aterro 17% dos resíduos.

3.4.5 Cenário 3: Alternativa 3 - Incineração de plástico e papel, reciclagem de metais e vidros e digestão anaeróbia da fração orgânica

Esta alternativa compreende a reciclagem de uma quantidade menor de materiais (50% dos metais e 50% dos vidros) em comparação com a Alternativa 2. O fluxograma da distribuição dos RSU no Cenário 3 – Alternativa 3 é apresentado na Figura 3.7.

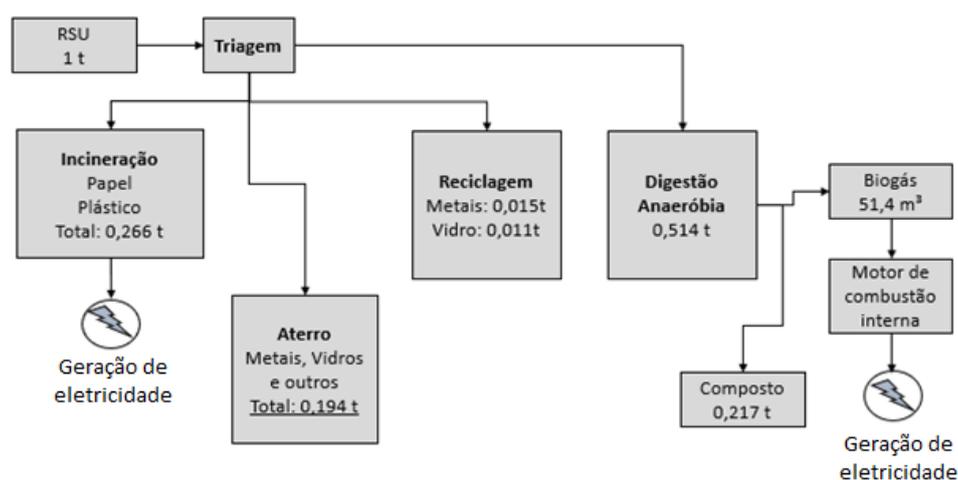


Figura 3.7: Fluxo de resíduos para o tratamento com incineração de papel e plástico associada à digestão anaeróbia.

Nesta alternativa, supõe-se que não seja possível o envio de papéis e plásticos à reciclagem, devido a determinados fatores como, por exemplo, grande distância de envio entre a cidade de produção do material reciclado e a indústria de reciclagem, inviabilizando a prática. Assim, nesta alternativa 26% dos RSU que correspondem a papéis e plásticos seriam incinerados, 2,6 seriam reciclados (50% dos metais e 50% dos vidros) e 51,4% que correspondem à fração orgânica seriam enviados ao processo de digestão anaeróbia. A fração destinada ao aterro seria de 19,4% dos resíduos.

3.4.6 Cenário 4: Alternativa 1 - Gaseificação e reciclagem

O Cenário 4 considera a utilização da rota termoquímica através da tecnologia de gaseificação com recuperação energética dos RSU para geração de eletricidade em conjunto com um sistema de reciclagem. Foram consideradas três alternativas de utilização dos RSU para este cenário.

A primeira alternativa, mostrada nesta subseção, utiliza a gaseificação da matéria orgânica, papéis e plásticos com a reciclagem de metais e vidros de acordo com o fluxograma apresentado na Figura 3.8. Nas outras duas alternativas, mostradas nas subseções 3.4.7 e 3.4.8, utilizou-se a gaseificação associada à digestão anaeróbia, variando a fração dos RSU disponíveis para reciclagem e para gaseificação.

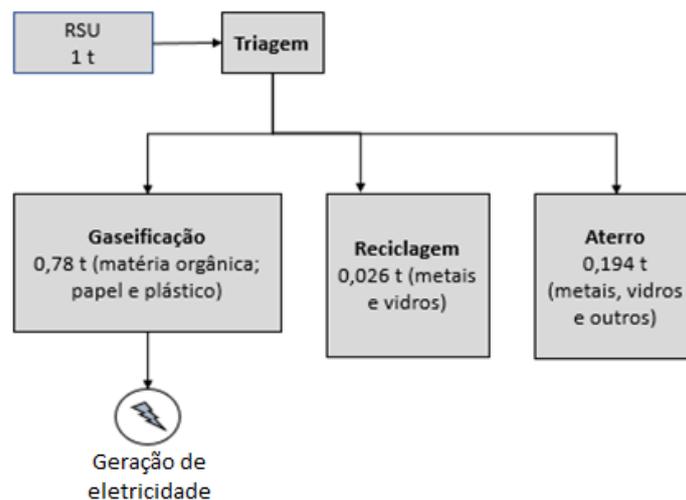


Figura 3.8: Fluxo de resíduos para o tratamento com a gaseificação.

No Cenário 4 – Alternativa 1, 78% dos RSU que correspondem a matéria orgânica, papel e plástico são utilizadas para a produção de CDR que será utilizado no processo de gaseificação. Nesta alternativa em 2,6% dos resíduos gerados são reciclados, enquanto 19,4% dos RSU são enviados ao aterro, ou seja, 50% dos metais, 50% dos vidros e a fração outros.

3.4.7 Cenário 4: Alternativa 2 - Gaseificação associada à reciclagem de metais e vidros e à digestão anaeróbia

A Alternativa 2 considera a gaseificação das frações de papel, plástico e de rejeitos. A fração orgânica foi tratada com a digestão anaeróbia, o fluxograma da distribuição dos resíduos é apresentado na Figura 3.9.

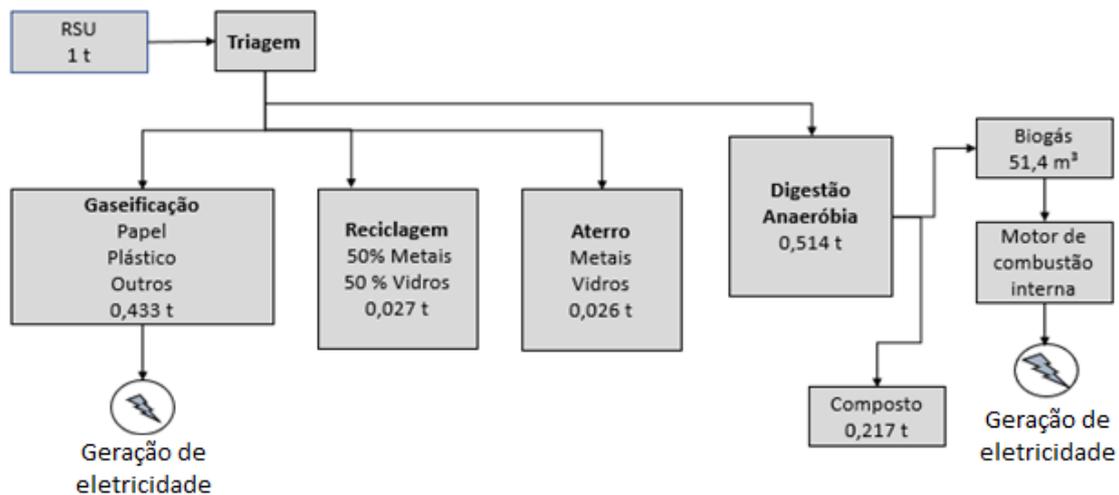


Figura 5. 9: Fluxo de resíduos para o tratamento com a gaseificação associada à reciclagem de metais e vidros e à digestão anaeróbia.

Neste cenário, assumiu-se a gaseificação das frações de papel, plástico e outros, que correspondem a um percentual de 43,3% do RSU. Assim, como o Cenário 3 - Alternativa 3, esta alternativa considera que não seja possível o envio de papéis e plásticos à reciclagem, assim, tem-se uma reciclagem de 2,7% dos resíduos enquanto 2,6% são enviados ao aterro. A fração de matéria orgânica que corresponde a 51,4% é enviada a um processo de digestão anaeróbia. A vantagem desta alternativa seria a utilização da fração “outros” dos RSU, o que faz com que uma menor quantidade de resíduos seja destinada ao aterro.

3.4.8 Cenário 4: Alternativa 3 - Gaseificação associada à reciclagem (todos os recicláveis) e à digestão anaeróbia

Nesta alternativa priorizou-se a biodigestão e a reciclagem (frações de papel, plástico, 50% dos metais e 50% dos vidros) no lugar da gaseificação. A Figura 3.10 apresenta o fluxograma da distribuição dos RSU para o Cenário 4 – Alternativa 3

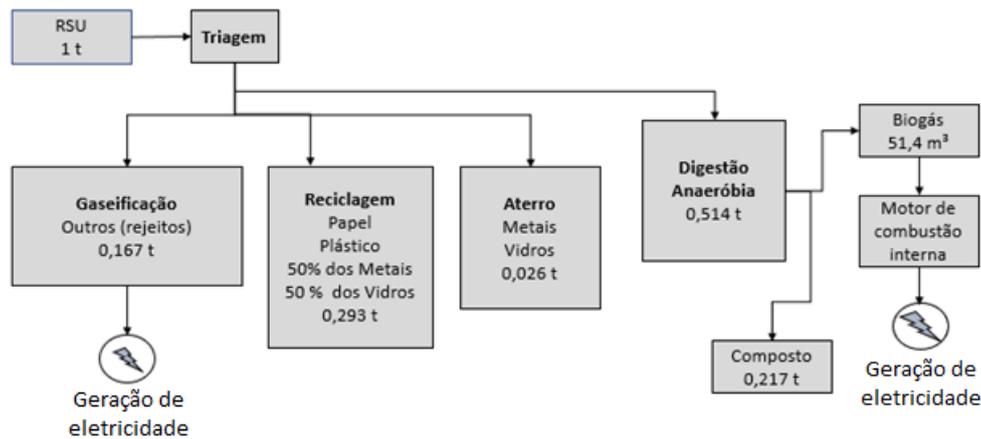


Figura 3.10: Fluxo de resíduos para o tratamento com a gaseificação associada à reciclagem (todos os recicláveis) e à digestão anaeróbia.

Nesta alternativa tem-se a gaseificação apenas da fração “outros” (16,7%) com a reciclagem de papel, plástico, 50% dos metais, 50% dos vidros, totalizando 29,3% dos resíduos enviados à reciclagem. Ao enviar 51,4 % da matéria orgânica para a digestão anaeróbia para a geração de energia, restam apenas 2,6 % dos resíduos para destinação ao aterro. Esta alternativa, assim como a Alternativa 2, tem a vantagem de reduzir consideravelmente a disposição de RSU em aterros.

3.4.9 Cenário 5: Gás de Aterro

O Cenário 5 considera o aproveitamento da rota bioquímica através do aproveitamento do biogás produzido pela decomposição anaeróbia dos RSU depositados num aterro sanitário para a geração de energia elétrica em Motores de Combustão Interna. Não foi considerada a reciclagem de materiais neste cenário. A Figura 3.11 apresenta o fluxograma das diferentes etapas consideradas para este cenário.

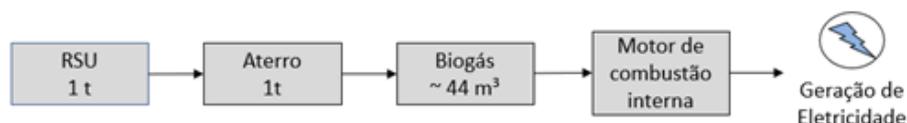


Figura 3.11: Fluxograma para a recuperação energética com gás de aterro.

3.5 Resumo dos cenários

Um resumo dos diferentes Cenários considerados é apresentado na Tabela 3.12. São estabelecidas diferentes siglas para expressar os resultados de cada Cenário e suas alternativas.

Tabela 3.12: Siglas para cada cenário analisado

Cenário	Sigla
Cenário 1	C1
Cenário 2	C2
Cenário 3 - Alternativa 1	C3 - A1
Cenário 3 - Alternativa 2	C3 - A2
Cenário 3 - Alternativa 3	C3 - A3
Cenário 4 - Alternativa 1	C4 - A1
Cenário 4 - Alternativa 2	C4 - A2
Cenário 4 - Alternativa 3	C4 - A3
Cenário 5	C5

A Tabela 3.13 traz, de maneira resumida, as formas de tratamento utilizadas em cada cenário e alternativa.

Tabela 3.13: Formas de tratamento consideradas em cada cenário e alternativa

Cenário	Formas de tratamento do RSU consideradas					
	Compostagem	Digestão			Gás de	
		Anaeróbia	Incineração	Gaseificação	Aterro	Reciclagem
C1	X					X
C2		X				X
C3 - A1			X			X
C3 - A2		X	X			X
C3 - A3		X	X			X
C4 - A1				X		X
C4 - A2		X		X		X
C4 - A3		X		X		X
C5					X	

Algumas alternativas mostradas na Tabela 3.13 apresentam o uso de mesmas tecnologias, como nos cenários C3 – A2 e C3 – A3 e C4 – A2 e C4 – A3, porém, o que difere são as frações enviadas à cada forma de tratamento. Com exceção do Cenário 5, todos os cenários foram associados à reciclagem, ou seja, os cenários foram criados de modo a promover a reciclagem, em alguns casos com maior quantidade e outros com menor proporção.

3.6 Avaliação Econômica

Na sequência são apresentados os principais aspectos considerados para a avaliação econômica dos distintos cenários de tratamento de RSU para o Estado de Minas Gerais.

Para composição das receitas, a tarifa para venda da energia elétrica produzida adotada foi de R\$ 216,82/MWh (ANEEL,2018), que corresponde ao preço médio para as usinas térmicas movida a biomassa, uma vez que, conforme o § 4º, art. 10 da Portaria MME nº 293/2017, os empreendimentos que utilizem combustível principal biomassa composta de resíduos sólidos urbanos e/ou biogás de aterro sanitário ou biodigestores de resíduos vegetais ou animais, assim como lodos de estações de tratamento de esgoto são classificados como empreendimentos termelétricos a biomassa (MME, 2017).

Conforme a exigência da Política Nacional de Resíduo Sólidos de eliminação de lixões, deve-se admitir que o RSU seja destinado ao menos para aterros. Sabe-se que os lixões e outras práticas de disposição inadequadas podem ocasionar barreiras comerciais, uma vez que a adoção destas práticas de menor custo é proibida na Comunidade Europeia, por exemplo (EPE, 2014a).

Portanto, para composição do fluxo de caixa dos empreendimentos considerou-se uma tarifa correspondente ao que é cobrado para aterramento do RSU no estado, de modo que cada tonelada de lixo que é tratado não é depositada em aterro e, com isso, o valor é repassado à planta. O valor contratual (preço unitário) médio do serviço de aterramento de RDO e RPU [R\$/tonelada], em Minas Gerais, é de R\$ 85,08/tonelada (SNIS, 2019), este valor foi, então, utilizado como a taxa cobrada pela quantidade de resíduos recebida na planta (*Gate fee*) nas avaliações.

3.6.1 Levantamento de custos e receitas para a compostagem

O investimento para a utilização da digestão anaeróbia foi obtido a partir dos dados de Fachagentur (*online*) apud Remy (2018), mostrados na Tabela 2.3 (na Seção 2.3.2), onde o valor do investimento é dado em função da potência instalada. Foi utilizada a conversão de Euro (€) para Real (R\$) de R\$ 4,38 de 03 de junho de 2019 data da realização da avaliação, considerou-se um acréscimo de 15% do investimento inicial de capital para impostos locais, royalties e taxas de importação como no trabalho de Jimenez et al. (2017). Foi considerada uma vida útil de 20 anos para o projeto.

Foi considerado o investimento de acordo com o número de plantas de acordo com a potência elétrica. Como por exemplo, um projeto onde a potência instalada seja de 225 kW, utiliza-se uma planta de 75 kW e uma de 150 kW e a partir disto é calculado o investimento em função da potência instaladas.

As receitas consideram:

- A venda da energia elétrica produzida
 - Venda de composto conforme IPEA (2012), aproximadamente R\$ 122,77, com a cotação de 03 de junho de 2019 data da realização da avaliação (valor de R\$ 3,89).
 - Cobrança pelo tratamento da fração orgânica do resíduo (R\$ 85,08/tonelada)
- O custo de operação e manutenção assumido foi de 7% do investimento inicial, conforme FEAM (2012).

3.6.2 Levantamento de custos e receitas para a digestão anaeróbia

O investimento para a utilização da digestão anaeróbia foi obtido a partir dos dados de Fachagentur (*online*) apud Remy (2018), mostrados na Tabela 2.3 (na Seção 2.3.2), onde o valor do investimento é dado em função da potência instalada. Foi utilizada a conversão de Euro (€) para Real (R\$) de R\$ 4,38 de 03 de junho de 2019 data da realização da avaliação, considerou-se um acréscimo de 15% do investimento inicial de capital para impostos locais, royalties e taxas de importação como no trabalho de Jimenez et al. (2017). Foi considerada uma vida útil de 20 anos para o projeto.

Foi considerado o investimento de acordo com o número de plantas de acordo com a potência elétrica. Como por exemplo, um projeto onde a potência instalada seja de 225 kW, utiliza-se uma planta de 75 kW e uma de 150 kW e a partir disto é calculado o investimento em função da potência instaladas.

As receitas consideram:

- A venda da energia elétrica produzida
 - Venda de composto conforme IPEA (2012), aproximadamente R\$ 122,77, com a cotação de 03 de junho de 2019 data da realização da avaliação (valor de R\$ 3,89).
 - Cobrança pelo tratamento da fração orgânica do resíduo (R\$ 85,08/tonelada).
- O custo de operação e manutenção assumido foi de 7% do investimento inicial, conforme FEAM (2012).

3.6.3 Levantamento de custos e receitas para a incineração

O estudo de Tsilemou & Ppanagiotakopoulos (2006), avalia o investimento e o custo de operação e manutenção de diferentes tecnologias para recuperação de energia a partir de resíduos, dentre elas a incineração. O estudo apresenta funções de custo aproximado para instalações de incineração e as Equações 3.18 e 3.19 trazem, então, o investimento inicial e custo de operação e manutenção (O&M) respectivamente.

$$y = 5000 \cdot x^{0,8} \quad (3.18)$$

O custo de operação e manutenção é dado, então pela Equação 3.19.

$$z = 700 \cdot x^{-0,3} \quad (3.19)$$

Onde:

x = capacidade da planta [toneladas . ano⁻¹]

y = capital inicial de investimento [€]

z = custo de operação e manutenção [€ . toneladas⁻¹]

A incineração normalmente necessita de investimentos elevados e, além disso a implantação de projetos de incineração se justifica em municípios que geram maiores volumes de resíduo sólido (Mamede et al. 2013). O estudo de Tsilemou & Ppanagiotakopoulos (2006) aponta que as unidades de incineração típicas possuem capacidade na faixa de 20.000 a 600.000 t/ano, por esta razão a avaliação da utilização de incineração foi aplicada somente aos municípios compreendidos nas faixas acima de 50.001. Ao considerar o índice de massa coletada de 0,829 kg/hab/dia, nota-se que é possível a aplicação da tecnologia na faixa populacional entre 66.000 e 1.983.000 habitantes aproximadamente.

Foram avaliadas, ainda, outras possibilidades com a incineração associando-a à reciclagem e à digestão anaeróbia (cenários C3 – A2 e C3 – A3 descritos na Seção 3.4 deste trabalho).

As considerações para análise foram:

- 20 anos de vida útil
- Fator de conversão de energia de 26% (eficiência elétrica da planta)
- PCI do resíduo de 8,58 MJ/kg
- Composição dos resíduos fixa ao longo dos anos
- Foi feita a conversão de Euro (€) para Real (R\$) utilizando-se a cotação de 03 de junho de 2019, data da realização da avaliação (valor de R\$ 4,38). Foi adicionado um fator de 15% do investimento inicial ao valor total do investimento para despesa com impostos locais, royalties e taxas de importação assim como no trabalho de Jimenez et al. (2017).

Para o caso dos cenários C3 - A2 e C3 - A3:

- O investimento considerou o somatório dos investimentos conforme a capacidade das plantas de incineração e digestão anaeróbia, idem para custos de operação e manutenção.
- As receitas seriam provenientes da venda de energia somando-se a geração das duas plantas e da cobrança pelo RSU tratado pelas plantas.

3.6.4 Levantamento de custos e receitas para a gaseificação

O investimento no caso de utilização da gaseificação para geração de energia foi calculado com base na Tabela 2.5, conforme o trabalho de Luz et al. (2015). Para composição do investimento, os autores consideram incrementos sobre os custos com equipamentos, distribuídos da seguinte forma: 25% de incremento para a instalação; 15% para instrumentação e controle; 8% para instalação de utilidades; 25% para instalações elétricas; 18% para construção civil; 6% para terreno; 9,2 para projetos de engenharia e 1,2% para outros serviços. O presente trabalho, também considerou estes incrementos e estes foram somados aos custos com equipamentos compondo o investimento inicial.

O custo de operação e manutenção foi considerado como 5,82% do investimento inicial conforme Singh & Basak (2018).

Considerações para a análise:

- 20 anos de vida útil
- Eficiência térmica da planta de gaseificação = 19,3% (Dalmo et al., 2019)
- Composição dos resíduos fixa ao longo dos anos
- Receita pelo tratamento de resíduos em função da massa coletada (ton/ano)
- Conversão do Dólar (US\$) para Real (R\$) utilizando –se a cotação de 03 de junho de 2019 data da realização da avaliação (valor de R\$ 3,89).

Assim como para a incineração, avaliou-se mais de uma possibilidade para o uso da gaseificação. Inicialmente, avaliou-se a gaseificação das frações de “matéria orgânica”, “papel” e “plástico”, ou seja, para uma maior quantidade de resíduos (Cenário C4 – A1). Posteriormente avaliou-se outras duas possibilidades, ambas associadas à digestão anaeróbia, porém, com a reciclagem de diferentes frações do RSU (cenários C4 – A2 e C4 – A3).

Para os cenários C4 – A2 e C4 – A3:

- O investimento considerou o somatório dos investimentos conforme a capacidade das plantas de gaseificação e de digestão anaeróbia, idem para custos de operação e manutenção.
- As receitas seriam provenientes da venda de energia somando-se a geração das duas plantas e da cobrança pelo RSU tratado pela planta de gaseificação, já que esta leva em consideração em seu investimento o sistema de triagem (separação primária), que deve receber primeiramente todo o resíduo e após isso cada fração segue para o tratamento indicado.

3.6.5 Levantamento de custos e receitas para o gás de aterro com recuperação energética

O investimento para a geração de energia a partir de gás de aterro foi calculado considerando-se os custos dos equipamentos conforme a Tabela 3.14, os valores foram obtidos de CETESB (2006) e corrigidos através da Calculadora do Cidadão do Banco Central do Brasil (BCB, 2019) para valores atuais (data do desenvolvimento do estudo - abril de 2019), onde o índice utilizado para correção foi o Índice Geral de Preços do Mercado (IGP-M):

Tabela 3.14: Custo de equipamentos que compõem o sistema para aproveitamento energético. Fonte adaptado de CETESB (2006)

Item	Custo	
Motor de combustão interna	2.144,05	R\$/kW
Queimador	428.809,72	R\$/unid.
Gasômetro (volume em m ³)	192,96	R\$/m ³
Compressor	1.072,02	R\$/m ³ /h
Tubulação de gás	536,01	R\$/m
Drenos	20.144,10	R\$/unid.

O volume do gasômetro foi considerado como o volume necessário para armazenar o biogás gerado em um dia. O Volume de biogás gerado em um dia foi obtido dividindo-se o volume de metano gerado diariamente pela concentração do metano em volume, assumida anteriormente como 50%. O número de drenos foi calculado conforme Manual do Software Biogás Aterro de CETESB (2006), ver Equação 3.20.

$$N_D = \frac{A_A}{A_D} \quad (3.20)$$

Onde:

N_D = Número de drenos

$3.A_A$ = Área do Aterro (m²), valores considerados conforme a Tabela 3.15 em função do porte do aterro.

A_D = Área do Dreno (m²), considera-se um dreno com raio de 25 m (CETESB, 2006).

Tabela 3.15: Valores considerados para a determinação do número de drenos conforme o porte do aterro

Tipo de Aterro	Capacidade	Área de disposição (m ²) **
Aterro de pequeno porte	100 t/dia *	53.144 **
Aterro de médio porte	800 t/dia *	274.987 **
Aterro de grande porte	2.000 t/dia *	514.834 **

* Fonte: MMA (2019)
 ** Área de disposição - Fonte: ABETRE (2008)

Assim, o número de drenos em cada caso é mostrado na Tabela 3.16:

Tabela 3.16: Número de drenos para cada tipo de aterro

Tipo de Aterro	Número de drenos
Aterro de pequeno porte	262
Aterro de médio porte	140
Aterro de grande porte	27

O custo de operação e Manutenção da planta foi considerado como 5% do investimento inicial (SANTOS et al., 2018) divididos em 16 anos, que corresponde a vida útil do empreendimento (R\$/ano). Para a conversão de energia, foi considerada uma vida útil de 60.000 h (PROBIOGÁS, 2015). Por isso, ao final de aproximadamente 8 anos há necessidade de substituição do motor gerador, assim, considerou-se a aquisição de um novo equipamento, então, adotou-se uma vida útil de 16 anos para a planta.

3.6.6 Análise do VPL e da Taxa Interna de Retorno

A avaliação econômica foi feita utilizando-se os indicadores: Valor Presente Líquido (VPL), dado na Equação 3.21 e a Taxa Interna de Retorno (TIR), conforme a Equação 3.22.

$$VPL = \sum_{t=1}^m \frac{E_n T - C_{O\&M}}{(1+i)^n} - I \quad (3.21)$$

Onde:

E_n = Energia elétrica gerada (MWh.ano-1)

T = Valor de venda da energia elétrica (R\$/MWh)

$C_{O\&M}$ = Custo de Operação e manutenção (R\$)

i = taxa de juros (%)

I = Investimento inicial (R\$)

m = vida útil da planta (anos)

A Taxa interna de Retorno (TIR) foi calculada através da Equação 3.22 este valor corresponde à taxa de juros na qual VPL se iguala a zero:

$$TIR \rightarrow VPL = \sum_{t=1}^m \frac{E_n T - C_{O\&M}}{(1+TIR)^n} - I = 0 \quad (3.22)$$

Considerou-se a taxa de juros para financiamento de Energia de Resíduos Sólidos com apoio direto do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social - BNDES. Assim a Taxa de juros é composta pelo Custo Financeiro, pela Remuneração do BNDES e pela Taxa de Risco de Crédito (BNDES, 2019a); a Equação 3.23 traz o cálculo da taxa.

$$\text{Taxa de juros} = \text{Fator custo} \times \text{Fator Taxa BNDES} \times \text{Fator Taxa de Risco} - 1 \quad (3.23)$$

O Fator Custo, neste caso, é obtido através da Taxa de Longo Prazo – TLP, que para contratos assinados em maio de 2019 (data presente da análise realizada no trabalho) é de 6,49% a.a. (BNDES, 2019b) e, portanto, o Fator Custo é de 1,0649. A remuneração do BNDES é de 0,9 % a.a. e a taxa de risco é 1% a.a. (sem garantia da União), ambas para Energia de Resíduos Sólidos (BNDES, 2019a). Assim, o Fator Taxa BNDES é de 1,009 e o Fator Taxa de Risco é 1,1. Tem-se, assim, uma Taxa de Juros de 8,52% a.a.

Com isto, pôde-se proceder à avaliação econômica para cada cenário levando-se em conta, também, as alternativas de cada um. Os cálculos da avaliação permitem analisar quais cenários seriam viáveis em cada faixa populacional.

3.7 Tecnologias selecionadas no contexto da economia circular

Observada a definição de economia circular, bem como a representação esquemática da Figura 2.17 tem-se, as alternativas de reciclagem, compostagem e digestão anaeróbia como aquelas inseridas diretamente no contexto, haja visto que estas alternativas promovem o retorno de materiais ao sistema produtivo, evitando a extração de novas matérias-primas. Ou seja, a compostagem e a digestão anaeróbia estariam inseridas na esfera biológica reinserindo a matéria orgânica no ciclo na forma de composto, evitando a produção e consumo de novos fertilizantes. No caso da digestão anaeróbia ocorre, ainda, há a produção de biogás.

A reciclagem de RSU constitui uma importante via que possibilita substituir parcialmente a entrada de matéria virgem no sistema, no que diz respeito à esfera tecnológica, além disso, pode proporcionar economia de energia.

As alternativas de tratamento de resíduos capazes de gerar energia podem ser boas opções no contexto da gestão de resíduos, evitando-se a deposição em aterros, porém para satisfação do modelo de economia circular é preciso que se priorize a reciclagem e a compostagem, por exemplo. Assim, as tecnologias como a incineração e a gaseificação, encontram mais restrições pois, embora ofereçam um potencial para geração de energia, é preciso priorizar as formas de tratamento anteriormente citadas. No trabalho calculou-se o potencial máximo para cada uma destas tecnologias, porém, para

economia circular seria necessário rever algumas considerações e verificar as vantagens dos sistemas de tratamento sob o conceito de economia circular.

Por isso, as alternativas mais adequadas, expressas conforme os cenários levantados, assumidas no contexto da economia circular, a partir da composição dos resíduos conhecida, seriam:

- A compostagem da fração orgânica e reciclagem da fração inorgânica e aterro dos materiais que compõem a classificação “outros”, 50% dos “metais” e 50% dos “vidros” (Cenário 1).
- A digestão anaeróbia da fração orgânica com reciclagem da fração inorgânica (Cenário 2).
- A incineração da fração de madeira e de têxteis e couro com a reciclagem da fração inorgânica e digestão da fração orgânica (Cenário C3 – A2).
- A gaseificação da fração outros, reciclagem de papéis, plásticos, metais e vidros e digestão anaeróbia da fração orgânica (Cenário C4 – A3).

As demais alternativas seriam viáveis no contexto da economia circular sob algumas considerações:

- A gaseificação de plástico papéis e outros, por exemplo, poderia ser aplicada em um cenário onde não fosse possível alcançar uma boa eficiência de reciclagem da fração de plástico e papel ou em situações onde a distância para o transporte até as unidades de reciclagem destes materiais torne o processo inviável. Assim, utilizando-se a gaseificação dos plásticos, papéis e rejeitos; reciclagem, como nos casos anteriores (de 50% dos “metais” e 50% dos “vidros”); digestão anaeróbia da fração orgânica e aterro da fração restante (Cenário C4 – A2).
- A incineração de papel e plástico associada à digestão anaeróbia e à reciclagem de metais e vidros (Cenário C4 – A1) nas mesmas condições feitas no item anterior relativo ao Cenário C4 – A2.

A obtenção de energia através da recuperação do gás de aterro seria uma forma menos interessante no contexto da economia circular, por não priorizar a reciclagem e não contribuir com a diminuição do RSU depositado na unidade de aterro. Além disso, a ocupação do solo e a emissão de metano nas emissões fugitivas que existem no aterro não torna esta alternativa atraente para o tratamento dos RSU.

A gaseificação conforme o Cenário C4 – A1 não seria favorável à aplicação da economia circular, uma vez que estaria priorizando a reciclagem de uma pequena parcela dos resíduos. A única contribuição estaria no fato de diminuir a quantidade de resíduos em aterro. Este mesmo fator é observado para a incineração conforme o Cenário C3 – A1.

A recuperação energética com o gás de aterro poderia trazer grandes benefícios ambientais, como a redução da emissão de gases poluentes para a atmosfera. Porém, para que estes empreendimentos sejam mais rentáveis é preciso que mais resíduos sejam depositados em aterro, o que vai contra um dos princípios da economia circular. Por esses motivos, os cenários C3 – A1, C4 – A1 e 9 seriam os menos recomendáveis no caso de uma transição para uma economia circular. Assim, foram

conduzidas, na sequência trabalho, análises voltadas aos cenários inseridos no contexto da economia circular.

A partir das considerações desta seção foram elaborados modelos de economia circular para o tratamento dos resíduos.

3.8 Análise de emissões evitadas

As emissões evitadas foram avaliadas com o uso do *software Waste Reduction Model (WARM)* da *United States Environmental Protection Agency (USEPA)* – Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos - para as tecnologias mais adequadas segundo o conceito de economia circular. O WARM foi criado pela USEPA para auxiliar profissionais envolvidos na gestão de resíduos sólidos e organizações com relatórios sobre reduções de emissões de gases de efeito estufa (GEE), economia de energia e impactos econômicos de práticas diferentes de gerenciamento de resíduos (USEPA, 2019a).

O modelo foi utilizado para a estimativa do *Global Warming Potential (GWP)*, com as emissões expressadas em toneladas de CO₂ equivalente (MtCO₂eq). Assim, as alternativas analisadas com o WARM no presente trabalho foram: incineração (combustão), compostagem e a digestão anaeróbia, todas associadas à reciclagem, conforme descrito anteriormente para satisfação dos princípios da economia circular.

3.8.1 Dados assumidos no WARM

O WARM funciona com a comparação de dois cenários, em um primeiro o usuário informa o Cenário Base e em um segundo a alternativa de tratamento a qual se deseja a comparação. O Caso Base para comparação e determinação do potencial para emissões evitadas foi o aterro com recuperação de biogás e posterior queima (*flare*), uma vez que a Lei 12.305 de 2010 (BRASIL, 2010) já determinou que os lixões deixassem de existir em 2014. Com isso, assumiu-se os aterros como uma forma mais simples e segura para destinação final dos resíduos com recuperação de biogás e posteriormente a queima em *flare*.

Como o *software* é utilizado no contexto dos Estados Unidos (EUA) é preciso assumir algumas condições, como no caso de contabilizar as emissões evitadas relacionadas à geração de eletricidade. O *software* oferece a opção de uma média do país ou utilizar o mix de energia elétrica de um estado. Notou-se que o estado de Washington apresenta um mix bem próximo à realidade brasileira, principalmente no que se refere ao percentual de energia hidráulica que ultrapassa 60% na matriz em ambos os casos, como mostra a Tabela 3.17, por isso, foi adotado na estimativa.

Tabela 3.17: Matriz energética do Brasil e do estado de Washington nos EUA

Fonte de energia	Washington (EUA)	Brasil
Gás Natural	9,9% ^a	10,5% ^b
Carvão	7,8% ^a	4,1% ^b
Nuclear	10,4% ^a	2,6% ^b
Hidráulica	64,2% ^a	65,2% ^b
Renováveis (com exceção de hidráulica)	7,8% ^a	15,1% ^b (*)
Petróleo e derivados	-	2,5% ^b

(*) Somadas a fonte solar e biomassa

Fonte:

^a EIA (2019)

^b EPE (2018)

O modelo leva em conta o transporte do resíduo até a estação de manejo, o valor considerado foi de aproximadamente 32 km, equivalente a 20 milhas, que é o valor *default* do WARM, dado que as distâncias podem variar de um município para outro, conforme a área urbana, densidade demográfica e eficiência na cobertura do sistema de coleta, por exemplo. Como a análise é conduzida para o estado de modo geral, seria inviável o levantamento das distâncias de transporte para os diferentes municípios e o valor foi assumido em todas as alternativas de tratamento de modo a não penalizar uma ou outra em termos de emissões.

Para o aterro é necessário ajustar o parâmetro taxa de decaimento (k), que foi assumido como 0,06, conforme Dos Santos (2019), para uma cidade na região sudeste do Brasil. Para eficiência de coleta o valor de *default* (operação típica) do WARM é de 75% (USEPA, 2019b), valor igualmente assumido no cálculo para potencial energético com gás de aterro. Para a digestão anaeróbia, foi selecionada a digestão úmida, com a cura do material digerido (composto) antes de ser lançado em solo.

3.8.2 Alternativas para tratamento da fração orgânica

Para quantificar os resultados com a aplicação de alternativas de tratamento da fração orgânica dos resíduos o WARM assume as condições mostradas na Tabela 3.18.

Tabela 3.18: Aspectos assumidos no modelo WARM para quantificação das emissões com as soluções para tratamento da fração orgânica do RSU. Fonte: adaptado de USEPA (2019b)

Alternativa	Mudanças em florestas ou armazenamento de carbono no solo	Fim de vida
Compostagem	Compensações: aumento no armazenamento de carbono no solo	Emissões: transporte para instalação de compostagem; maquinário de compostagem
Combustão	-	Emissões: transporte para a instalação WtE; CO ₂ e N ₂ O relacionados com a combustão Compensações: emissões evitadas relativas à energia gerada
Gás de aterro	-	Emissões: transporte para aterro; maquinário de aterro; metano gerado no aterro Compensações: emissões evitadas relativas à energia com a combustão do biogás; armazenamento de carbono em aterros
Digestão Anaeróbia	Compensações: aumento do armazenamento de carbono no solo com a aplicação de digerido nos solos	Emissões: transporte até digestor anaeróbio; uso de equipamentos e escape de biogás no digestor anaeróbio; emissões de CH ₄ e N ₂ O durante a cura do digestor; emissões de N ₂ O com a aplicação digerido no solo. Compensações: evita emissões devido ao uso do biogás para energia; evita o uso de fertilizantes sintéticos devido à aplicação composto no solo

3.8.3. Alternativas para o tratamento da fração inorgânica

A Tabela 3.19 lista as condições assumidas pelo WARM para o tratamento do RSU inorgânico.

Tabela 3.19: Aspectos assumidos no modelo WARM para quantificação das emissões com as soluções para tratamento da fração inorgânica do RSU. Fonte: adaptado de USEPA (2019b)

Alternativa	Aquisição e produção de matéria prima	Mudanças em florestas ou armazenamento de carbono no solo	Fim de vida
Reciclagem	Emissões: transporte de materiais reciclados; energia do processo de reciclagem Compensações: transporte de matérias-primas e produtos; economia de energia com a utilização de matéria prima extraída da fonte (primária)	N.A	Emissões: coleta e transporte para centro de reciclagem; energia gasta na separação e processamento
Combustão	NA	N.A	Emissões: transporte para a instalação WtE; energia necessária no processo de combustão; N ₂ O relativo à combustão (*)(**); CO ₂ relativo à combustão (**) Compensações: emissões evitadas relativas à energia elétrica
Aterro	NA	N.A	Emissões: transporte para o aterro; maquinário do aterro Compensações: emissões evitadas com a recuperação de energia; armazenamento de carbono em aterros (*)

(*) Relativo à fração de papel

(**) Relativo à fração de plástico

As emissões de gases de efeito estufa por tonelada de diferentes tipos de resíduo para cada alternativa de tratamento de resíduos assumida no *software* estão contidas no Apêndice A.

3.8.4 Emissões para a gaseificação

O WARM não aborda a gaseificação nas alternativas para tratamento, assim, para quantificar as emissões relativas a esta tecnologia, as emissões evitadas foram calculadas utilizando-se a Metodologia AM0025 do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima, a metodologia permite determinar emissões para processos alternativos de tratamento de resíduos (UNFCCC, 2012).

A fronteira do sistema a ser analisado é dada na Figura 3.12, assumiu-se a emissão do projeto em tCO₂ equivalente/ano, assim, pode-se obter uma medida aproximada das emissões para os projetos.

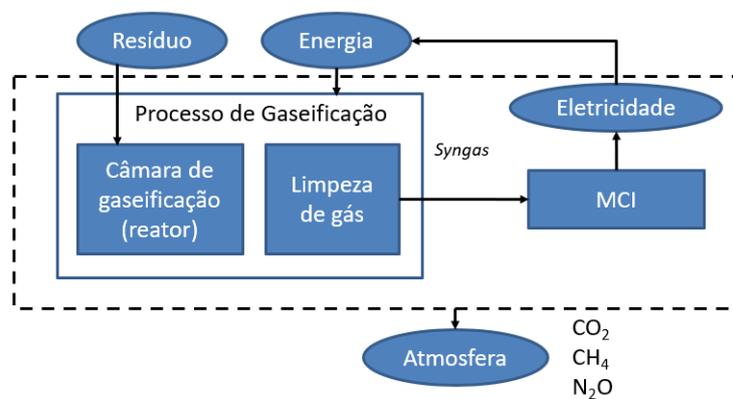


Figura 3.12: Fronteiras do sistema conforme a metodologia AM0025 para a gaseificação. Fonte: Adaptado de UNFCCC (2012).

As emissões para um projeto de gaseificação podem ser calculadas conforme a Equação 3.24, da metodologia AM0025 (UNFCCC, 2012).

$$PE_{GAS,a} = PE_{COM,GAS,a} + PE_{EC,GAS,a} + PE_{FC,GAS,a} + PE_{ww,GAS,a} \quad (3.24)$$

Onde:

$PE_{GAS,a}$ = Emissões do projeto de gaseificação no ano (tCO₂eq)

$PE_{COM,GAS,a}$ = Emissão da combustão associada à gaseificação no ano (tCO₂)

$PE_{EC,GAS,a}$ = Emissões relativas ao consumo de eletricidade na gaseificação no ano (tCO₂eq)

$PE_{FC,GAS,a}$ = Emissões relativas ao consumo de combustíveis fósseis na gaseificação no ano (tCO₂eq)

$PE_{ww,GAS,a}$ = Emissões relativas ao tratamento de água associado à gaseificação no ano (tCH₄)

A emissão associada a gaseificação no ano é, então, obtida através da Equação 3.25 da mesma metodologia (UNFCCC, 2012).

$$PE_{Q,GAS,a} = PE_{QCO_2,a} + PE_{QCH_4,N_2O,c,a} \quad (3.25)$$

Onde:

$PE_{Q,c,a}$ = Emissão associada à queima do gás gerado na gaseificação no ano (tCO₂eq)

$PE_{Q,CO_2,a}$ = Emissões de CO₂ à queima do gás gerado na gaseificação no ano (tCO₂)

$PE_{QCH_4,N_2O,a}$ = Emissões de CH₄ e N₂O à queima do gás gerado na gaseificação no ano (t)

Conforme as informações disponíveis no trabalho de Henríquez (2016) as emissões relativas ao consumo de diesel e do tratamento de água não foram consideradas no cálculo e as emissões relativas à combustão associada a gaseificação seria para motor de combustão interna (MCI) com gás de gaseificação, onde, a partir de 0,45t de CDR são produzidos 1080,8 m³ deste gás. Na Tabela 3.20 são indicados os valores relativos à entrada de CDR e as características do gás que sai do gaseificador e as saídas, que são emissões com o motor de combustão interna.

Tabela 3.20: Dados assumidos para o cálculo de emissões relativas à combustão na gaseificação

Entrada no gaseificador	Quantidade	Unidade	Fonte:
CDR	0,45	t	a
Gás de gaseificação			
Composição	% Volume de gás úmido	-	
CO	26	-	
H ₂	24,5	-	a
CO ₂	4,5	-	a
CH ₄	2	-	a
N ₂	43	-	a
Emissões para o ar	Motor de combustão interna (fração molar)	Motor de combustão interna (kg)	
H ₂ O	0,0189	0,341	b
Nitrogênio	0,7660	21,50	b
Dióxido de carbono	0,000543	0,0239	b
Oxigênio	0,2050	6,570	b
Argônio	0,00918	0,3580	b

^a Lozano (2015) apud Henriquez (2016)

^b Henriquez (2016)

Conforme os dados apresentados, entraria no cálculo das emissões relativas à combustão do Syngas o valor referente ao CO₂, ou seja, as emissões de CH₄ e N₂O neste caso seriam desprezíveis.

Assim, tem-se que para cada 0,45 t de CDR tem-se uma produção de gás de 1080,8 m³ e uma emissão com MCI de 0,0239 kg de CO₂.

Para as emissões relativas ao consumo de energia adotou-se o fator de emissão para a geração de eletricidade conforme o *Mix* de energia elétrica do Brasil, que é de 0,068 tCO₂ por MWh, o qual representa um valor médio dos anos entre 2006 e 2018, conforme o MCTIC (2019). Devido a geração de energia este mesmo fator foi utilizado para subtração nas emissões devido a energia elétrica gerada, de modo a constituir as emissões que seriam evitadas no setor elétrico. O consumo de energia no processo de gaseificação foi calculado a partir das potências dos equipamentos que compõem a planta mostradas na Tabela 2.5.

Com a gaseificação, portanto, assumiu-se as emissões conforme a metodologia da UNFCCC (2012) para a fração enviada à gaseificação e a emissão relativa ao tratamento da fração restante foi obtida com o WARM assim como nos casos anteriores.

3.8 Consórcios

O trabalho visa avaliar as alternativas para tratamento de resíduos no estado de Minas Gerais de uma maneira geral, ou seja, propondo diferentes configurações para tal. Neste sentido, outra possibilidade assumida foi com o uso de consórcios entre municípios. Conforme o MMA (2011), pode-se ter arranjos intermunicipais segundo critérios como área de abrangência pretendida para o consórcio (distância máxima entre os municípios); contiguidade territorial; existência de fluxo econômico entre municípios; arranjos regionais pré-existentes e existência de municípios polo com liderança regional.

Por isso, para efeito de estudo dividiu-se o estado em consórcios formados de acordo com as microrregiões de Minas Gerais do IBGE, cuja lista se encontra em MINAS GERAIS (2016). As microrregiões recebem, assim, o nome do município polo. A Figura 3.13, mostra o mapa elaborado no QGIS (2017) a partir da lista de microrregiões com os municípios que as compõe. A Figura 3.14 é referente a legenda para a numeração das microrregiões mostradas na Figura 3.13.

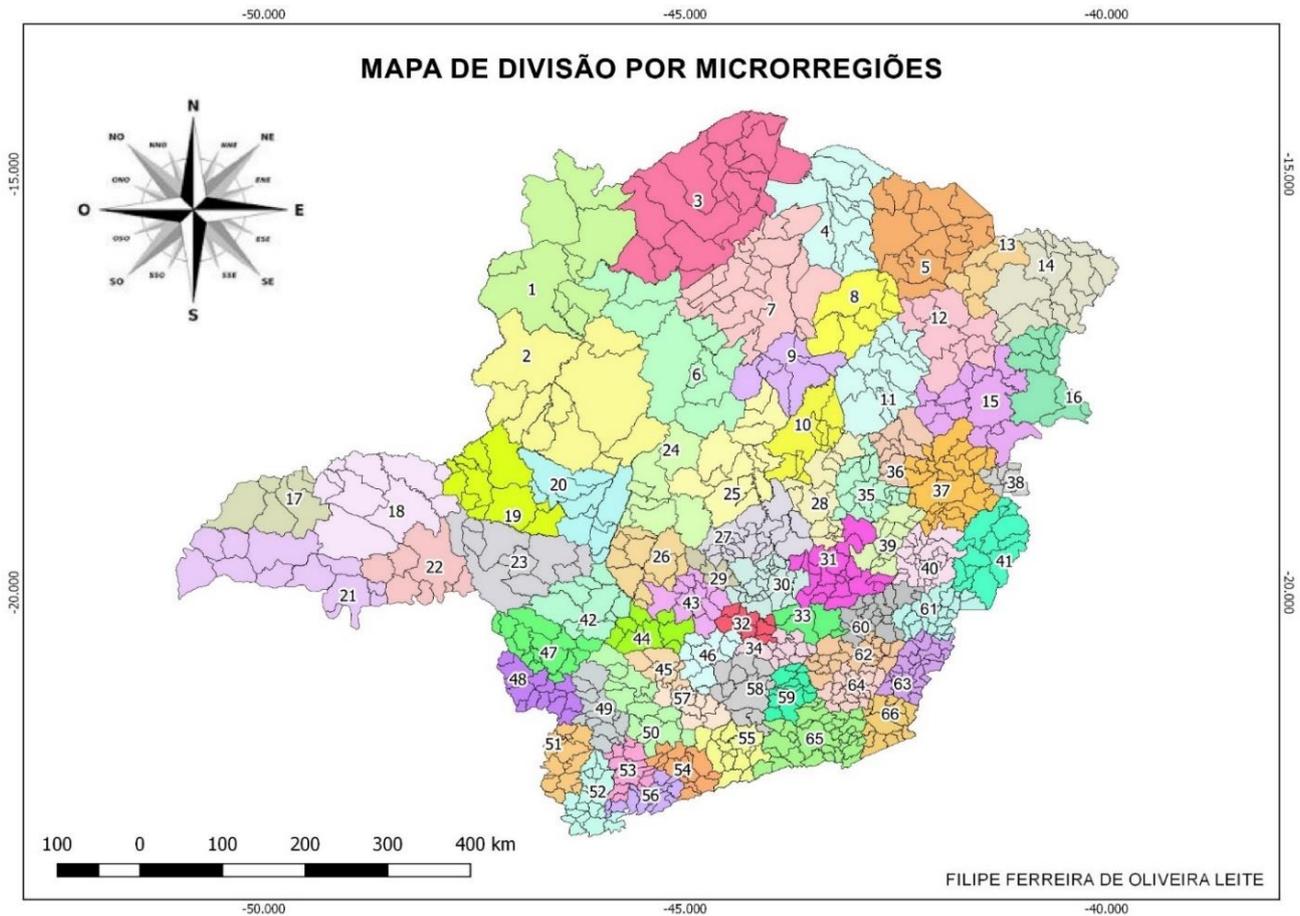


Figura 3.13: Consórcios hipotéticos de acordo com as microrregiões de Minas Gerais.

Assim, seria possível formar 66 consórcios no estado. Estes foram avaliados da mesma forma que para o caso dos municípios, ou seja, consórcios de acordo com faixa populacional, adotando-se as mesmas classes populacionais da Tabela 3.1. Na Tabela 3.21 é mostrado o número de microrregiões

de cada faixa populacional de acordo com o somatório da população atual dos municípios (IBGE, 2018) que compõem cada microrregião.

Tabela 3.21: Número de microrregiões por faixa populacional

Faixa	Núm. de microrregiões
De 20.001 a 50.000	1
De 100.001 a 200.000	9
De 200.001 a 300.000	22
De 300.001 a 400.000	22
De 400.001 a 500.000	2
De 500.001 a 1.000.000	4
Acima de 1.000.000	6
Total	66

Desta forma, os mesmos cenários foram avaliados para o caso da aplicação de consórcios em todo o estado.

4. Resultados e discussão

4.1 População e quantidade de RSU produzida anualmente

A Figura 4.1 traz o mapa com os municípios do estado classificados conforme faixas populacionais, gerado a partir das informações do IBGE (2018).

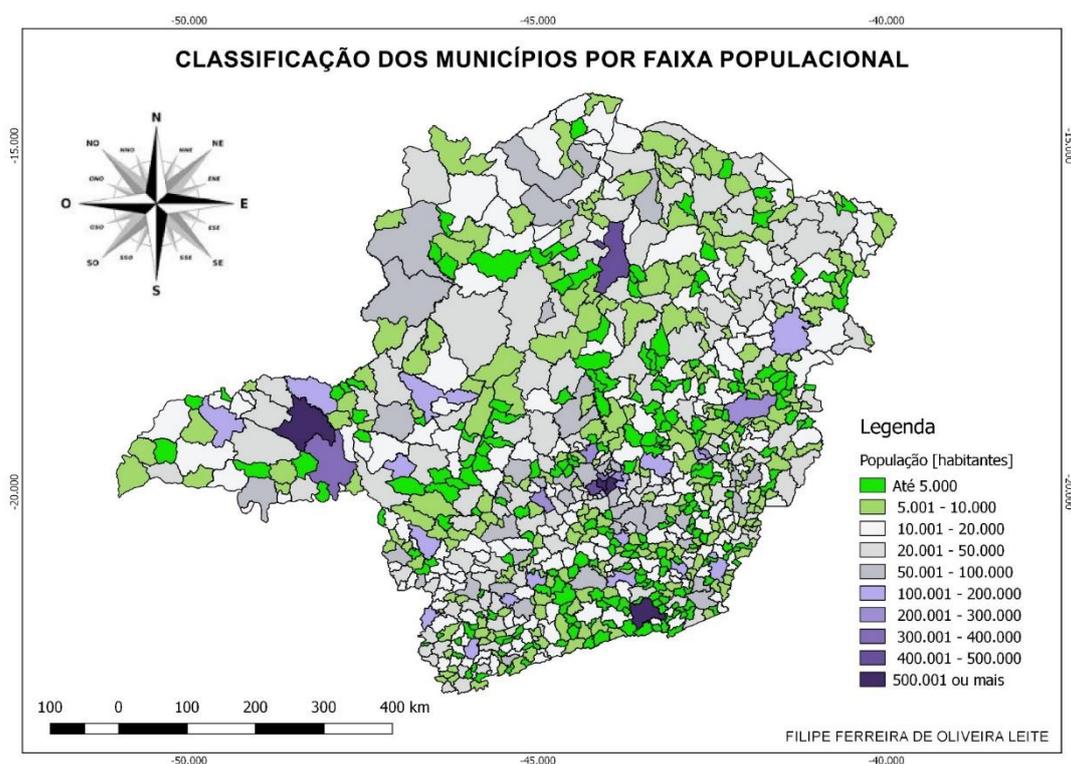


Figura 4.1: Mapa de classes populacionais.

As quantidades de RSU produzidas em cada faixa populacional são mostradas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Quantidade de resíduos gerada anualmente por cada faixa populacional

Faixa – intervalo	RSU gerado [t/ano]
Até 5.000 habitantes	1512,93
De 5.001 até 10.000	3025,85
De 10.001 até 20.000	6051,70
De 20.001 até 50.000	15129,25
De 50.001 até 100.000	30258,50
De 100.001 até 200.000	60517,00
De 200.001 até 300.000	90775,50
De 300.000 até 400.000	121034,00
De 400.001 até 500.000	151292,50
500.001 ou mais	907755,00

4.2 Potencial de cada tecnologia

Nesta seção são mostrados os resultados, não só do potencial energético de cada uma das alternativas tecnológicas, mas, também, o potencial da produção de composto com a compostagem (mostrada na subseção a seguir) e com a digestão anaeróbia. São apresentados, também, os resultados do potencial geração elétrica ao serem enviadas diferentes frações do RSU às plantas de incineração e de gaseificação.

4.2.1 Quantidade de composto produzida com a compostagem

Considerando-se a fração orgânica dos resíduos para tratamento com a compostagem, a produção anual de composto em função das faixas populacionais estudadas é mostrada na Figura 4.2.

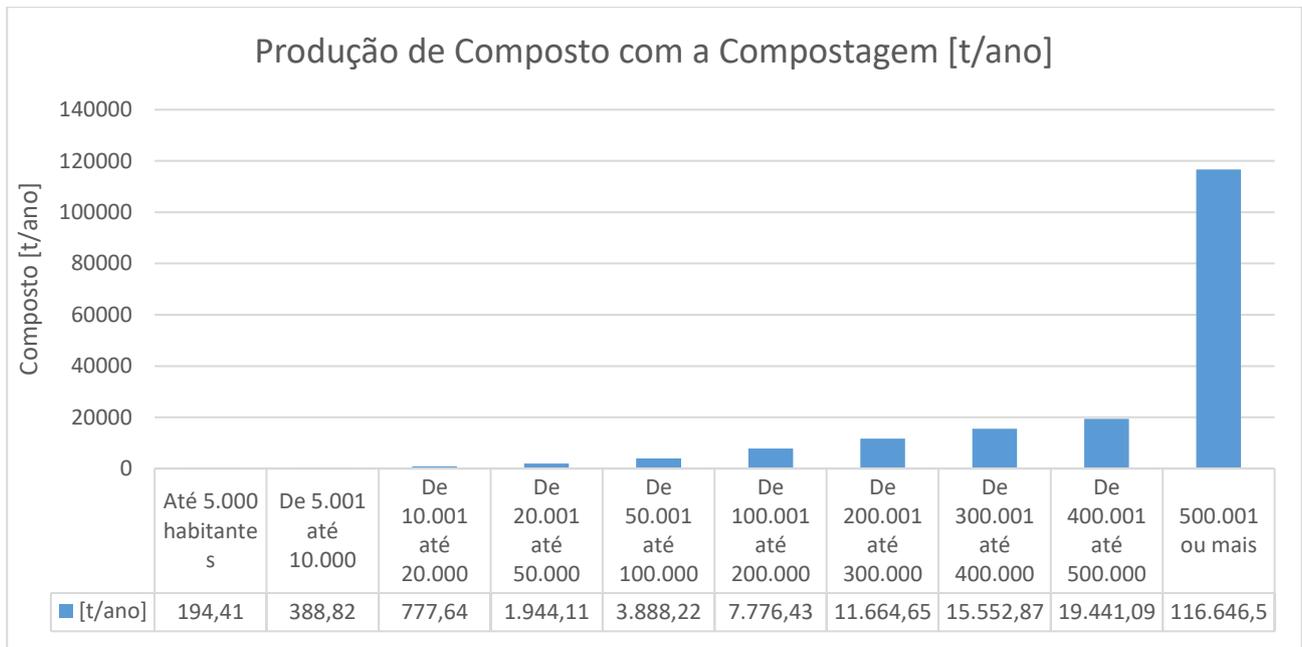


Figura 4.2: Produção de composto produzida com a compostagem em função da população.

Considerado o limite superior de cada classe populacional, tem-se que a produção de composto pode chegar a até 116.646,5 t/ano, conforme o gráfico da Figura 4.2. Para municípios de menor porte, ou seja, até 5.000 habitantes a produção não ultrapassa 194,41 t/ano.

4.2.2 Produtos da Digestão Anaeróbia

A digestão anaeróbia produz composto e biogás que por sua vez pode gerar energia. Os resultados para a produção anual de composto são mostrados na Figura 4.3.

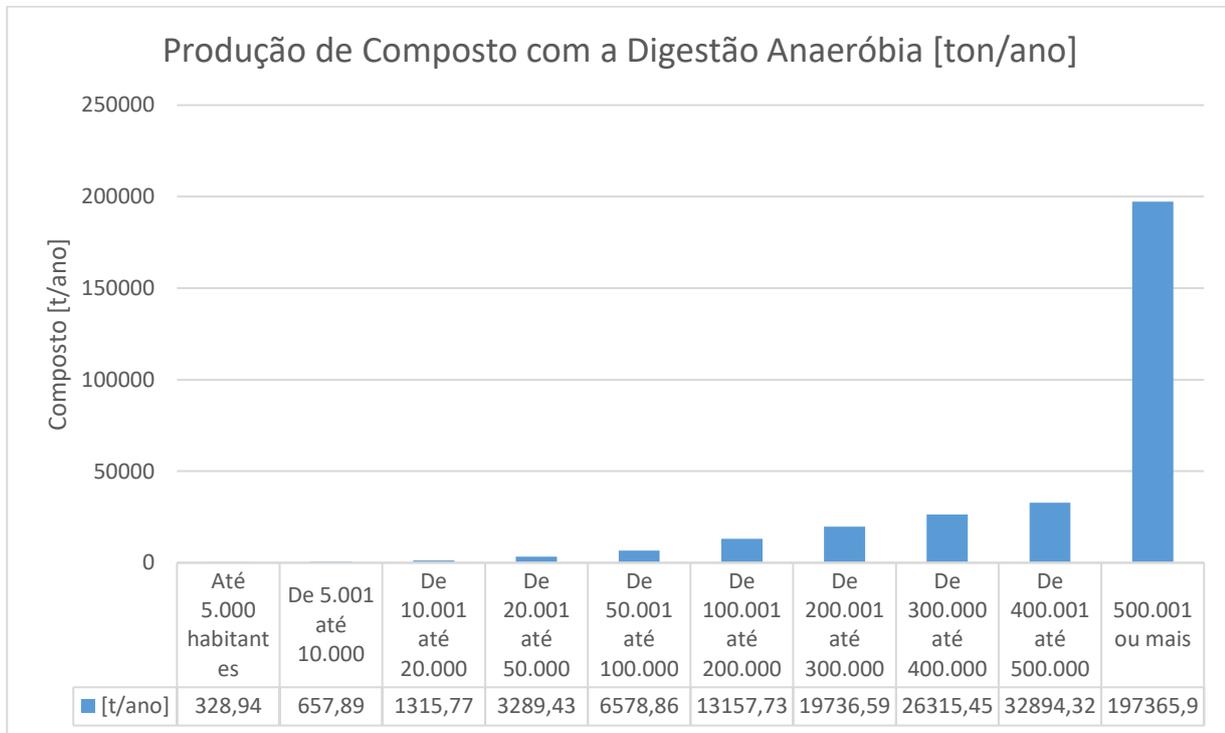


Figura 4.3: Produção de composto produzida com a digestão anaeróbia em função da população.

Nota-se que a digestão anaeróbia é capaz de produzir uma quantidade de cerca de 70% a mais de composto da quantidade produzida com a compostagem, analisando-se os valores em cada faixa populacional, dado que os valores presentes nas Figuras 4.2 e 4.3 representam apenas os valores calculados em função da população e não do número total de municípios com esta população, ou seja, não representa o valor total do estado em cada faixa. Além de composto, a digestão anaeróbia permite gerar energia elétrica a partir da produção de metano, o resultado para a geração elétrica, bem como a potência disponível (ou instalada) é mostrado na Figura 4.4.

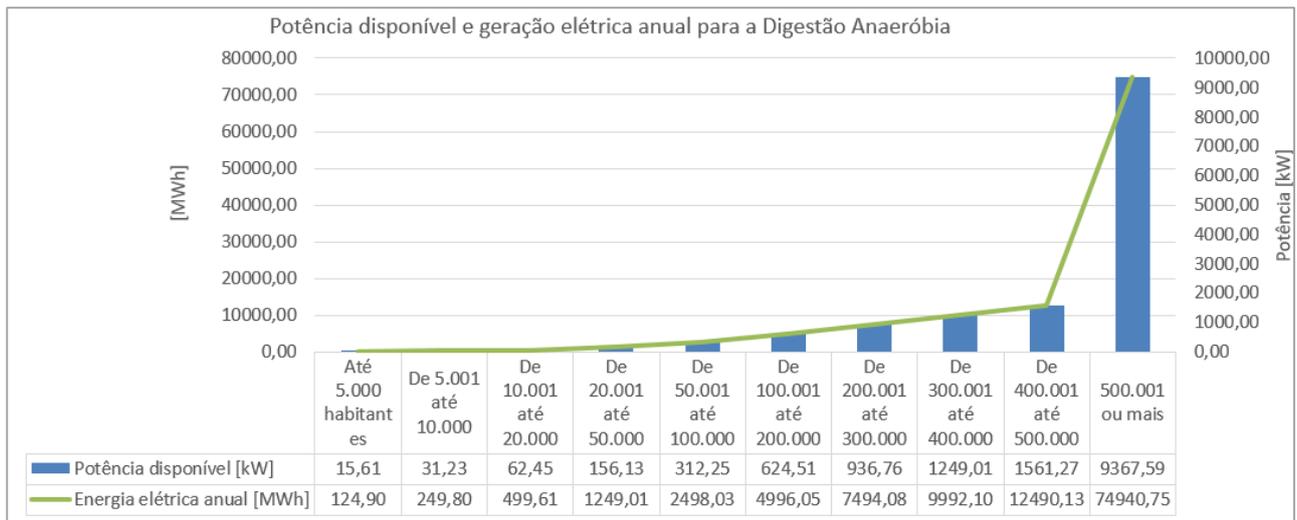


Figura 4.4: Potência disponível e energia elétrica gerada anualmente em função da população.

A relação da energia gerada por tonelada de RSU para a digestão anaeróbia foi de 0,16 MWh por tonelada de RSU. O valor pode ser considerado satisfatório conforme o documento da FEAM (2012), que indica que a geração de energia elétrica com a respectiva tecnologia se encontra na faixa entre 0,1 e 0,3 MWh por tonelada de RSU. A potência disponível acresce conforme o tamanho populacional, variando entre 15,61 kW_{el} (para populações até 5.000 habitantes) até 9.367,59 kW_{el} (para populações acima de 500.000 habitantes).

4.2.3 Potencial energético para a incineração

Conforme mencionado na seção “Metodologia” do trabalho, o PCI do RSU para o cálculo do potencial com a incineração foi obtido considerando-se a composição dos resíduos de ABRELPE (2011) e com a composição dos resíduos da cidade de Belo Horizonte, conforme PMGIRS-BH (2016). A potência disponível e a energia elétrica gerada com a incineração nos dois casos são mostrados na Figura 4.5.

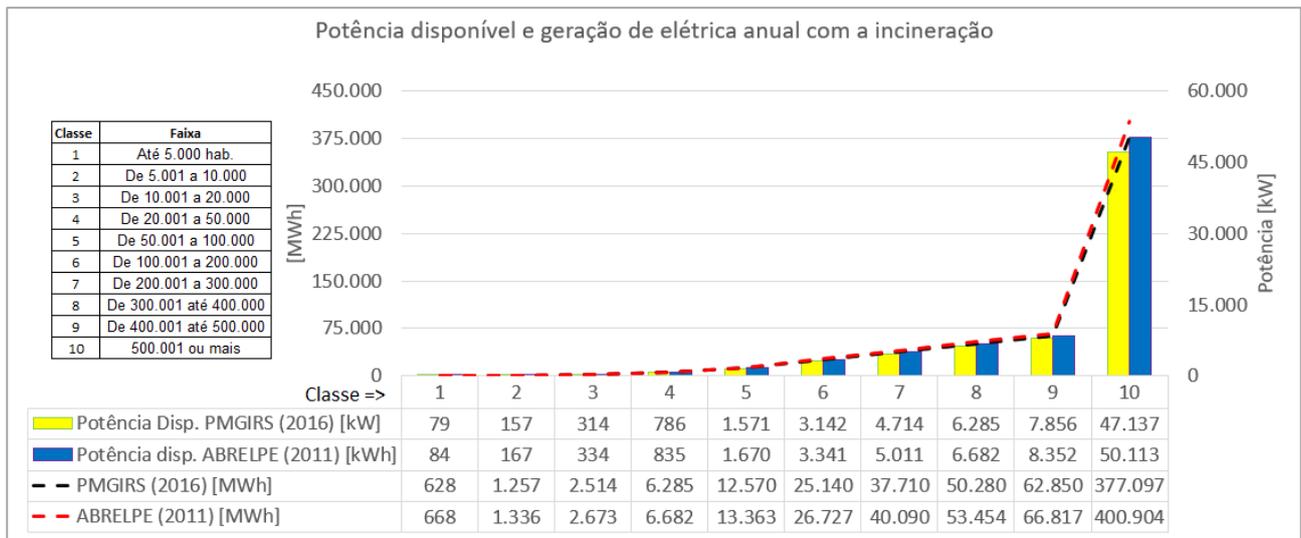


Figura 4.5: Potência disponível e eletricidade anual gerada com a incineração com a composição média dos resíduos dos municípios brasileiros de ABRELPE (2011) e para a composição gravimétrica de PMGIRS-BH (2016).

O PCI, considerando-se a composição gravimétrica da ABRELPE (2011) – Tabela 3.2, foi ligeiramente superior ao obtido com a composição informada do PMGIIRS (2016) – Tabela 3.5, ou seja, no primeiro caso foi de 8.585 KJ/Kg enquanto no segundo caso foi de 8.583 KJ/Kg. Com isso, a potência disponível e a energia elétrica gerada apresentaram uma diferença. Porém, a taxa de geração de energia elétrica foi de 0,57 MWh/t RSU. Conforme o documento da FEAM (2012), para a incineração, a geração de energia se encontra na faixa de 0,4 a 0,6 MWh/t RSU para a incineração. Para a sequência do trabalho, considerou-se o potencial para a incineração com a composição do RSU da cidade de Belo Horizonte, que é mais detalhada e pode ser tomada como uma estimativa mais conservadora.

O potencial para o caso da incineração das frações de “madeira” e “têxteis e couro”, caso onde é enviada uma menor quantidade de resíduos para tratamento com a tecnologia, é dado na Figura 4.6, bem como a potência elétrica disponível. Este cenário buscaria favorecer a reciclagem, além de utilizar de possibilitar a associação da incineração ao tratamento da fração orgânica dos resíduos através da digestão anaeróbia ou, até mesmo, da compostagem.

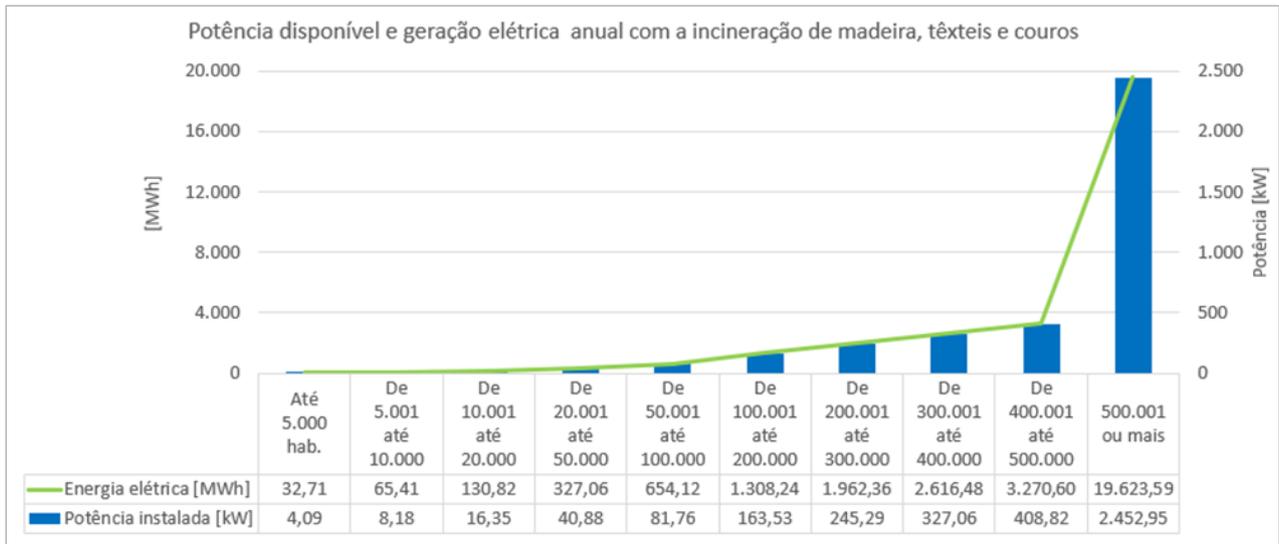


Figura 4.6: Potência instalada e eletricidade gerada anualmente com a incineração de madeira, têxteis e couro.

A Figura 4.7 mostra o resultado para a geração de energia elétrica e potência disponível com a incineração das frações de “plástico” e “papel”.

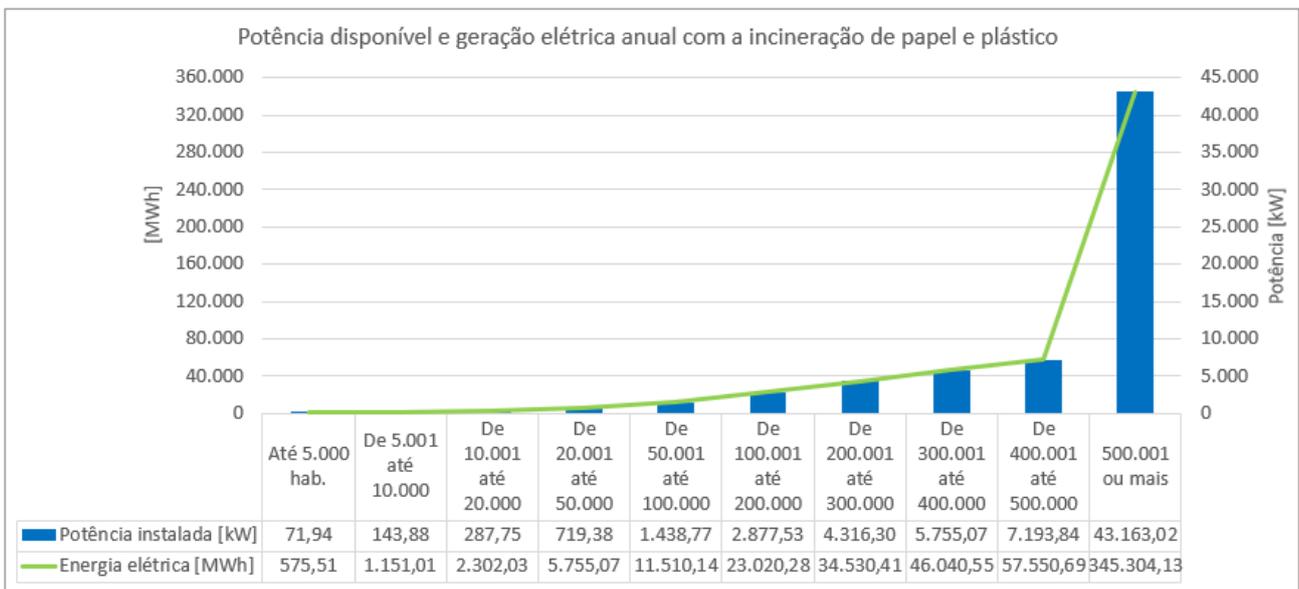


Figura 4.7: Potência instalada e eletricidade gerada anualmente com a incineração de papel e plástico.

O menor potencial para geração elétrica com a incineração seria no caso da destinação das frações de madeira, têxteis e couro, porém, esta opção oferece melhores oportunidades para reciclagem de materiais, seja através da reciclagem, propriamente dita, ou da produção de composto com a compostagem e com a digestão anaeróbia. O caso da geração de energia elétrica com a incineração de plásticos e papéis seria mais adequado em casos onde não seja possível reciclar esses materiais

como, por exemplo, em casos de grandes distâncias para o transporte até as unidades receptoras do material.

A potência disponível no caso da incineração de madeira, têxteis de couro não supera 50kW para populações de até 50.000 habitantes, conforme a Figura 4.6. Através da Figura 4.7 tem-se que com a incineração de papel e plástico apresentaria uma variação na potência elétrica disponível entre 71, 94 e 43.163,02 kW conforme as faixas populacionais estudadas.

4.2.4 Potencial energético para a gaseificação

Os resultados do potencial energético e potência disponível por tamanho de população ao utilizar a gaseificação das frações de matéria orgânica, papel e plástico do RSU são mostrados na Figura 4.8.

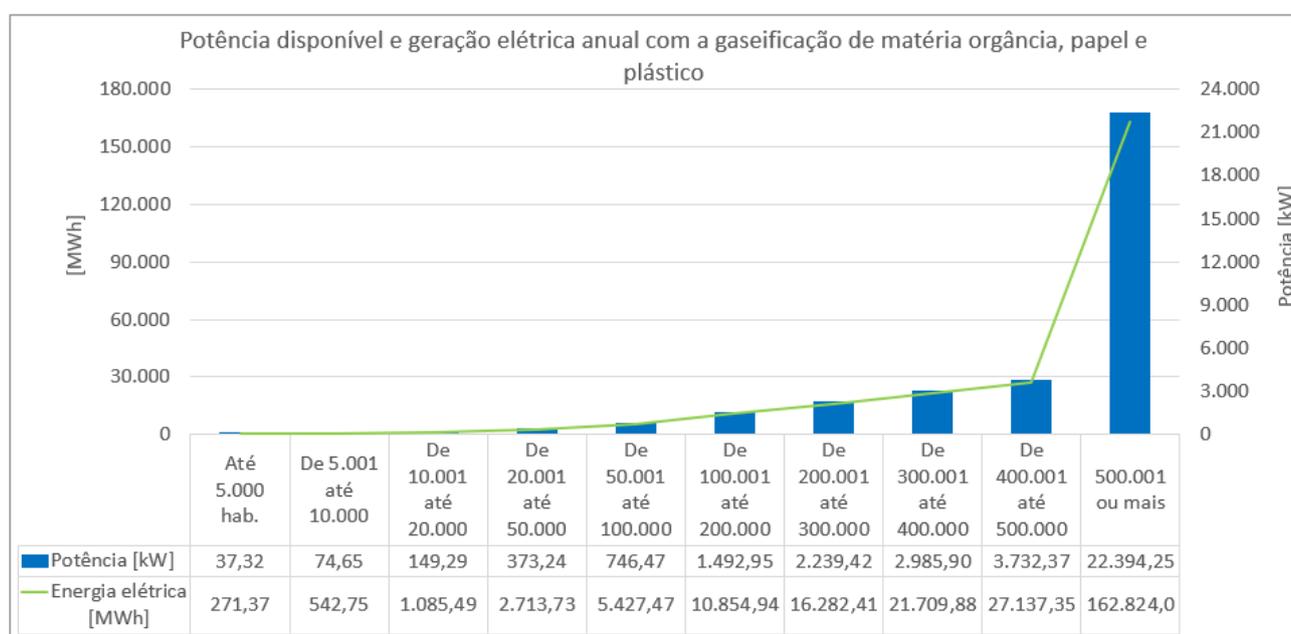


Figura 4.8: Potência disponível e energia elétrica gerada anualmente com a gaseificação de papel, matéria orgânica e plástico.

A potência disponível poderia ultrapassar 22MW em municípios com população superior a 500.000 habitantes e para os municípios de menor porte, ou seja, aqueles com população até 5.000 habitantes não ultrapassaria 40kW, conforme a Figura 4.8. A partir da quantidade total de RSU destinada à gaseificação e da energia elétrica gerada em cada faixa, tem-se que a taxa de geração de energia elétrica para a gaseificação é de 0,23 MWh por tonelada RSU, ou seja, uma taxa maior do que para a digestão anaeróbia, porém menor do que com a incineração. Apesar do potencial relativamente alto encontrado, é preciso levar em conta a necessidade de se priorizar outras destinações para o resíduo como, por exemplo, a reciclagem, conforme a Lei 12.305/2010.

Outra possibilidade analisada para a gaseificação seria com a utilização das frações de plástico papel e outros. Os resultados da geração de energia elétrica e a potência disponível para este caso são mostrados na Figura 4.9.

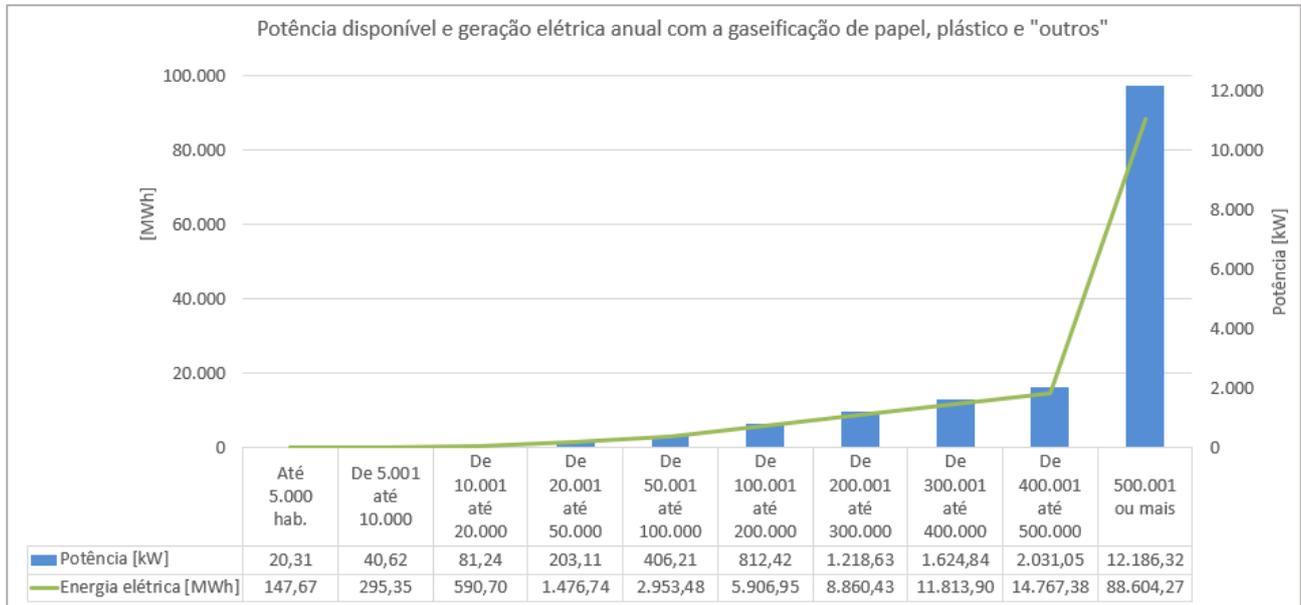


Figura 4.9: Potência disponível e energia elétrica gerada anualmente com a gaseificação de papel, plástico e “outros”.

Ao comparar a gaseificação das frações de matéria, orgânica, papel e plástico (na Figura 4.8) com a gaseificação das frações de papel, plástico e “outros” (Figura 4.9), nota-se que os valores de potência disponível e energia elétrica gerada decrescem em aproximadamente 46%. Isto se deve, principalmente, ao fato da quantidade de RSU ser menor para o segundo caso, uma vez que a diferença entre os valores do PCI é pequena, ou seja, de 15,2 MJ/kg para o primeiro caso e 14,9 MJ/kg para o segundo. Conforme a Figura 4.9, a potência disponível varia entre 20,31 kW (para populações até 5.000 habitantes) e 12.186,32 kW (para municípios com mais de 500.000 habitantes).

Com a gaseificação das frações de papel, plástico e “outros” seria possível gerar 97.490,53 MWh ao ano em municípios com população maior que 500.000 habitantes. Neste caso, apesar do menor potencial energético, comparado ao caso da utilização das frações de matéria, orgânica, papel e plástico, ficariam disponíveis para a reciclagem os vidros, metais e a fração orgânica para a produção de composto com a compostagem ou digestão anaeróbia (que também é capaz de gerar de energia elétrica). A taxa de geração de energia elétrica para o caso mostrado na Figura 4.9 é de 0,25 MWh por tonelada de RSU, neste caso o valor foi superior ao observado com a gaseificação de matéria orgânica, papéis e plásticos e, também, ao caso da digestão anaeróbia.

Uma outra alternativa identificada neste trabalho para que se pudesse reciclar uma maior fração de resíduos foi a gaseificação da fração “outros” que compõe o RSU. Conforme a Tabela 3.2, tem-se

que a fração “outros” representa 16,7% do RSU gerado, com isso, tem-se com esta alternativa uma menor quantidade de RSU enviado à gaseificação. O resultado para a potência disponível e para a energia elétrica gerada anualmente em função da população com a gaseificação da fração “outros” (caso onde a reciclagem é priorizada), é mostrado na Figura 4.10.

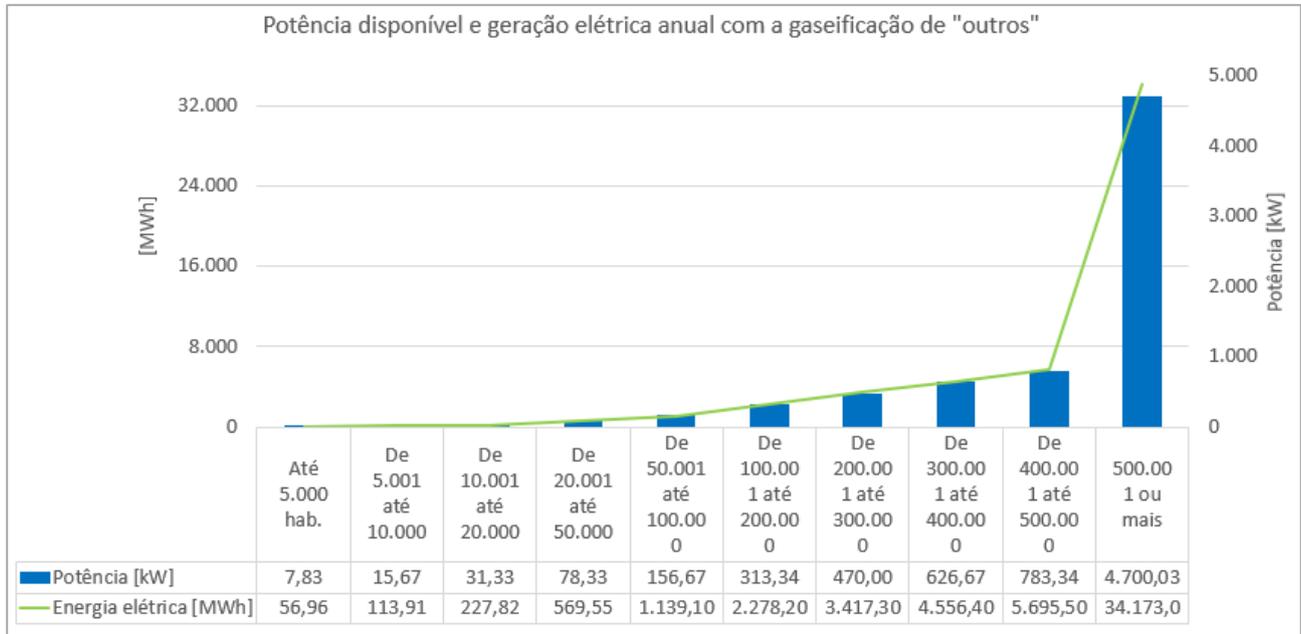


Figura 4.10: Potência disponível e energia elétrica gerada anualmente com a gaseificação de “outros”.

Neste último caso obteve-se um menor potencial energético, porém, tem-se uma maior quantidade de RSU podendo ser enviada para a reciclagem, o que pode indicar esta opção como sendo mais adequada do ponto de vista ambiental. A energia elétrica anual gerada e a potência disponível para este caso, se comparado o valor de cada faixa populacional, decrescem em 79% em comparação com a gaseificação conforme o primeiro caso (com a gaseificação de matéria orgânica plástico e “outros”). Comparado ao segundo caso, ou seja, com a gaseificação de plástico papel e “outros”, a energia elétrica anual gerada e a potência disponível decrescem em 61%.

Pela Figura 4.10, tem-se que a potência disponível varia entre 7,83 kW (para populações até 5.000 habitantes) e 4.700 kW (para municípios com mais de 500.000 habitantes). A energia elétrica gerada anualmente para a gaseificação da fração “outros” poderia alcançar 34.173 MWh ao ano em municípios com população maior que 500.000 habitantes. A partir da quantidade de resíduos geradas anualmente por diferentes faixas de população e da energia elétrica anual em cada faixa, tem-se uma taxa de geração elétrica de 0,23 MWh por tonelada de RSU, semelhante ao caso da gaseificação das de matéria orgânica, papéis e plásticos.

4.2.5 Potencial energético a partir do gás de aterro

Para o aproveitamento energético do gás de aterro os resultados para a potência disponível e energia elétrica gerada anualmente para diferentes faixas populacionais é mostrado na Figura 4.11.

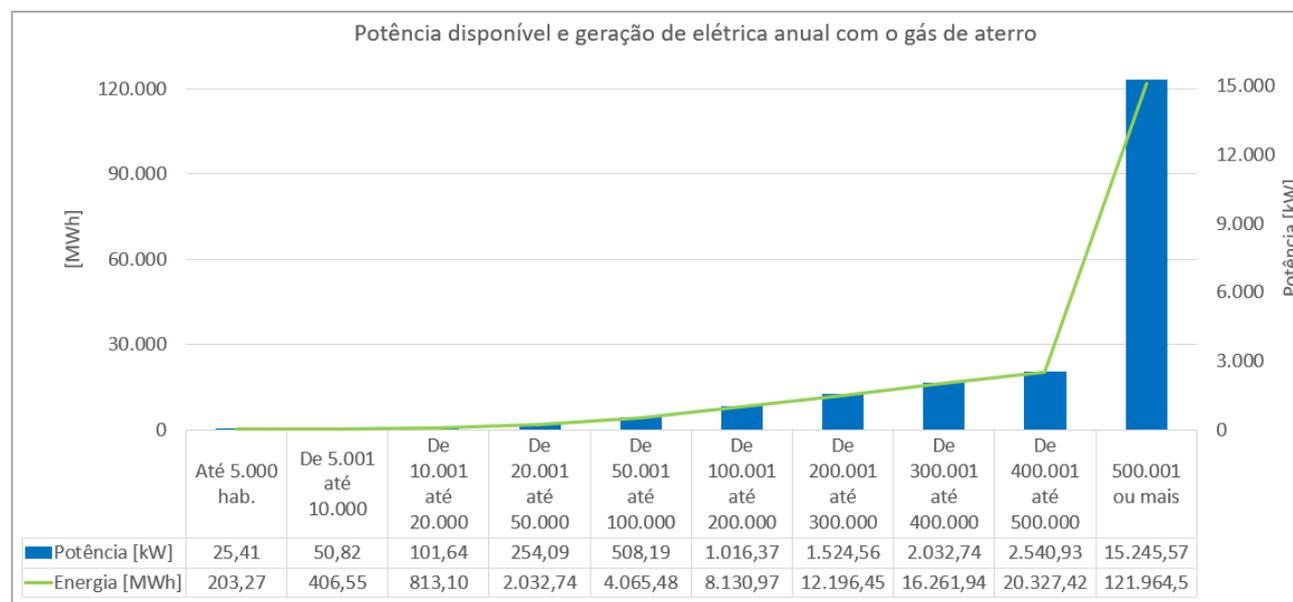


Figura 4.11: Potência disponível e a geração elétrica anual com o gás de aterro.

A potência disponível, conforme a Figura 4.11, varia entre 7,83 kW (para populações até 5.000 habitantes) e 4.700 kW (para municípios com mais de 500.000 habitantes). A energia elétrica gerada anualmente pode superar 121.964 MWh ao ano para municípios com população superior a 500.000 habitantes.

Considerando-se a quantidade total de RSU de cada faixa populacional enviada ao aterro, obteve-se a relação de 0,13 MWh por tonelada de RSU, compatível com o documento da FEAM (2012), que estabelece uma faixa entre 0,1 e 0,2 MWh por tonelada de RSU para esta alternativa de recuperação energética. Com isso, a taxa de geração elétrica por tonelada de resíduo é menor que a observada no caso da digestão anaeróbia, que também faz uso de biogás para geração.

A Tabela 4.2 apresenta o resultado para a taxa de geração de energia elétrica (MWh/tRSU) para as diferentes tecnologias com a utilização de diferentes frações do RSU.

Tabela 4.2: Taxa de geração de energia elétrica por cada tecnologia

Tecnologia	Taxa de geração elétrica [MWh/t_{RSU}]
Digestão Anaeróbia	0,16
Incineração (Matéria orgânica, Madeira papel, têxteis e couros)	0,57
Incineração (Madeira, Têxteis e couros)	0,93
Incineração (Papel e Plástico)	1,43
Gaseificação (Matéria orgânica, papel e plástico)	0,23
Gaseificação (papel, plástico e "outros")	0,23
Gaseificação ("outros")	0,23
Gás de aterro	0,13

A maior relação de geração elétrica é observada com a incineração de papel e plástico com 1,43 MWh/t_{RSU}, que apresentou um PCI mais elevado, ou seja, de 21,68 MJ/kg. A incineração de madeira têxteis e couro apresentaria a segunda maior relação com 0,93 MWh/t_{RSU}. A menor relação obtida seria com o gás de aterro, ou seja 0,13 MWh/t_{RSU}. A gaseificação apresentou uma relação de geração elétrica semelhante nos três casos estudados, ou seja, de 0,23 MWh/t_{RSU}. Com isso, a incineração se mostrou mais eficiente sob o aspecto de recuperação de energia elétrica em função da quantidade de RSU, enquanto o gás de aterro foi a alternativa que apresentou a menor potencial de geração elétrica em função da quantidade de resíduos.

Assim, nota-se que é possível associar o uso de diferentes tecnologias de maneira simultânea, tratando diferentes frações do RSU em diferentes plantas. Na próxima seção são apresentados os potenciais com estas associações. Para a sequência do trabalho são assumidos esses cenários para as devidas análises.

4.3 Potencial de aproveitamento energético e de produção de composto para cada cenário considerado

4.3.1 Produção de composto

O Cenário 1 não considera a geração de energia elétrica, já que se trata do uso da compostagem associada à reciclagem, com isso, tem-se a produção de composto por faixa populacional que é mostrada conforme o gráfico da Figura 4.2 (Subseção 4.2.1).

A faixa de população acima de 500.000 habitantes apresenta um potencial de produção de composto significativamente maior, do que o das demais pelo limite superior assumido de 3.000.000 de habitantes, para incluir a cidade de Belo Horizonte, e considerar seus possíveis efeitos de crescimento populacional nos próximos anos.

A produção de composto para o Cenário 2, Cenário 3 – Alternativa 2, Cenário 3 – Alternativa 3, Cenário 4 – Alternativa 2 e Cenário 4 – Alternativa 3, ou seja, cenários que utilizam a digestão anaeróbia é mostrada na Figura 4.3 (Subseção 4.2.2).

A Figura 4.12 mostra um comparativo da produção de composto, caso as alternativas de compostagem e digestão anaeróbia fossem aplicadas em cada um dos municípios, indicando, assim, a estimativa da produção anual com os cenários indicados.

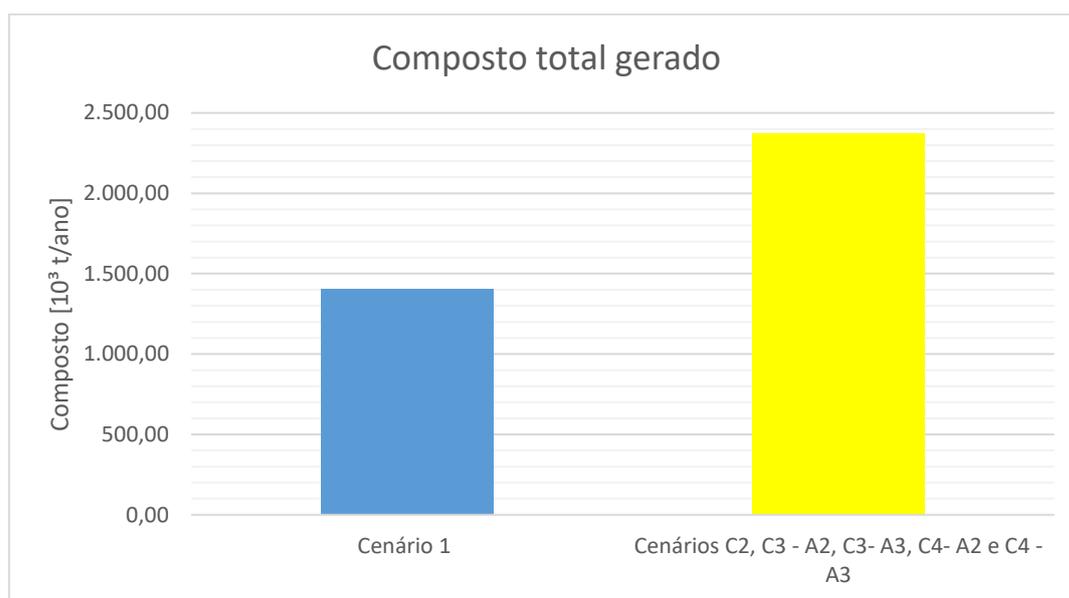


Figura 4.12: Quantidade de compostos gerados anualmente nos cenários C2, C3 – A2, C3 – A3, C4 – A2, e C4 – A3.

A produção total de composto com a compostagem é de 1.403.840 toneladas ao ano enquanto a produção com a digestão anaeróbia é de 2.375.298 toneladas ao ano. Nota-se, portanto, que com a produção anual total de composto com a compostagem representa cerca de 59% da produção com a utilização da digestão anaeróbia.

4.3.2 Potencial para geração de energia elétrica

Utilizando-se a ferramenta de geoprocessamento, QGIS (2017), pode-se construir mapas que mostram a distribuição do potencial para a geração de energia elétrica em cada cenário no estado. A Figura 4.1, mostra o mapa com os municípios do estado classificados conforme a população, a fim de que seja estabelecida uma correlação com outros mapas. As figuras de 4.13 a 4.20, ilustram a disposição do potencial para os cenários C2, C3 – A1, C3 – A2, C3 – A3, C4 – A1, C4 – A2, C4 – A3 e C5 respectivamente, uma vez que o Cenário 1 seria com a compostagem associada a reciclagem que, portanto, não gera energia elétrica.

Considerando-se o consumo médio de energia por residência em Minas Gerais em 2016 de 123,8 kWh/mês (EPE, 2017), foi feita uma estimativa, na análise dos resultados, do número de residências que podem ser atendidas pela energia elétrica total gerada.

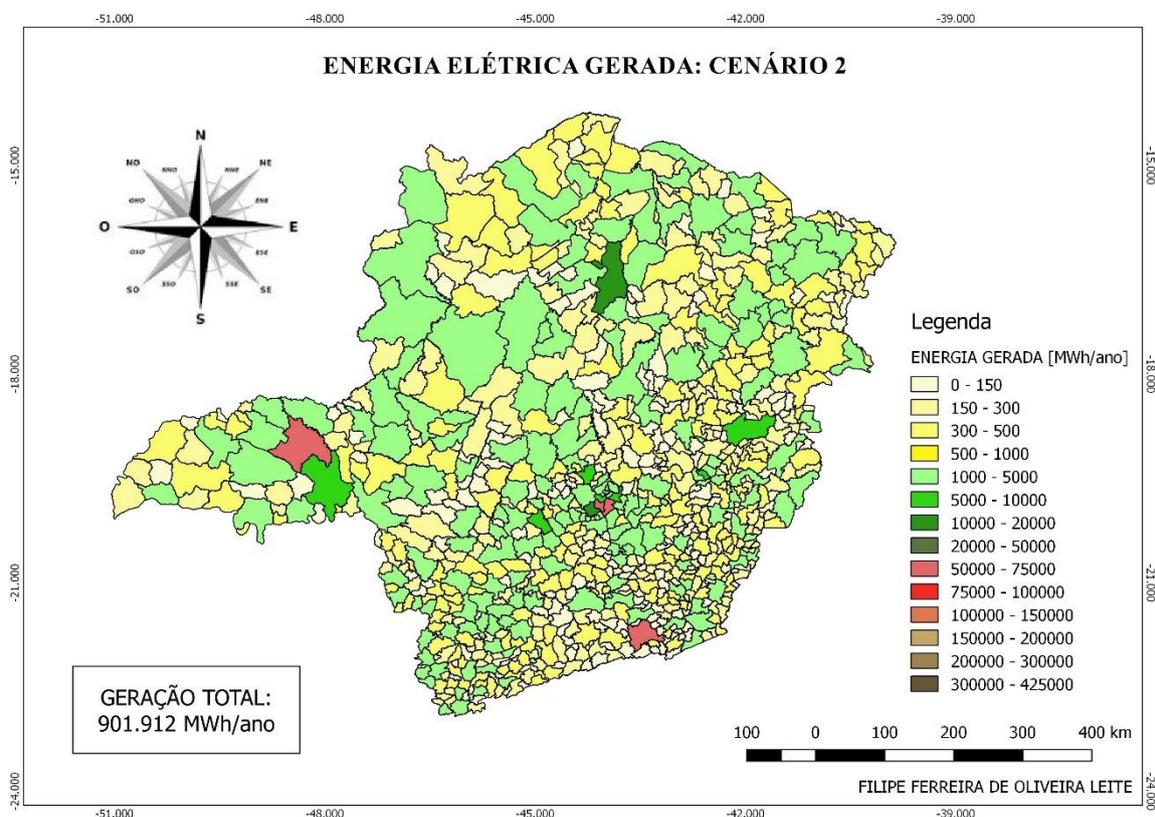


Figura 4.13: Geração de energia elétrica anual para o Cenário 2.

No Cenário 2 (com digestão anaeróbia e reciclagem) foi possível obter uma geração de 901.912 MWh/ano, que equivale a energia elétrica necessária para abastecer 607.103 residências do estado em um ano. Conforme o mapa, nota-se que a mínima geração não ultrapassa os 150 MWh/ano que, ao ser correlacionado com mapa da Figura 4.1, corresponde à geração de energia elétrica dos municípios de até 5.000 habitantes. A máxima geração observada, neste caso, foi na faixa entre 50.000 e 75.000 MWh/ano, observada nos quatro municípios mais populosos. A maior parte dos municípios não gerou eletricidade superior a 5.000 MWh ao ano, conforme a escala do mapa.

A Figura 4.14 mostra a distribuição no potencial para geração de energia elétrica com a incineração para as condições assumidas no Cenário 3 – Alternativa 1.

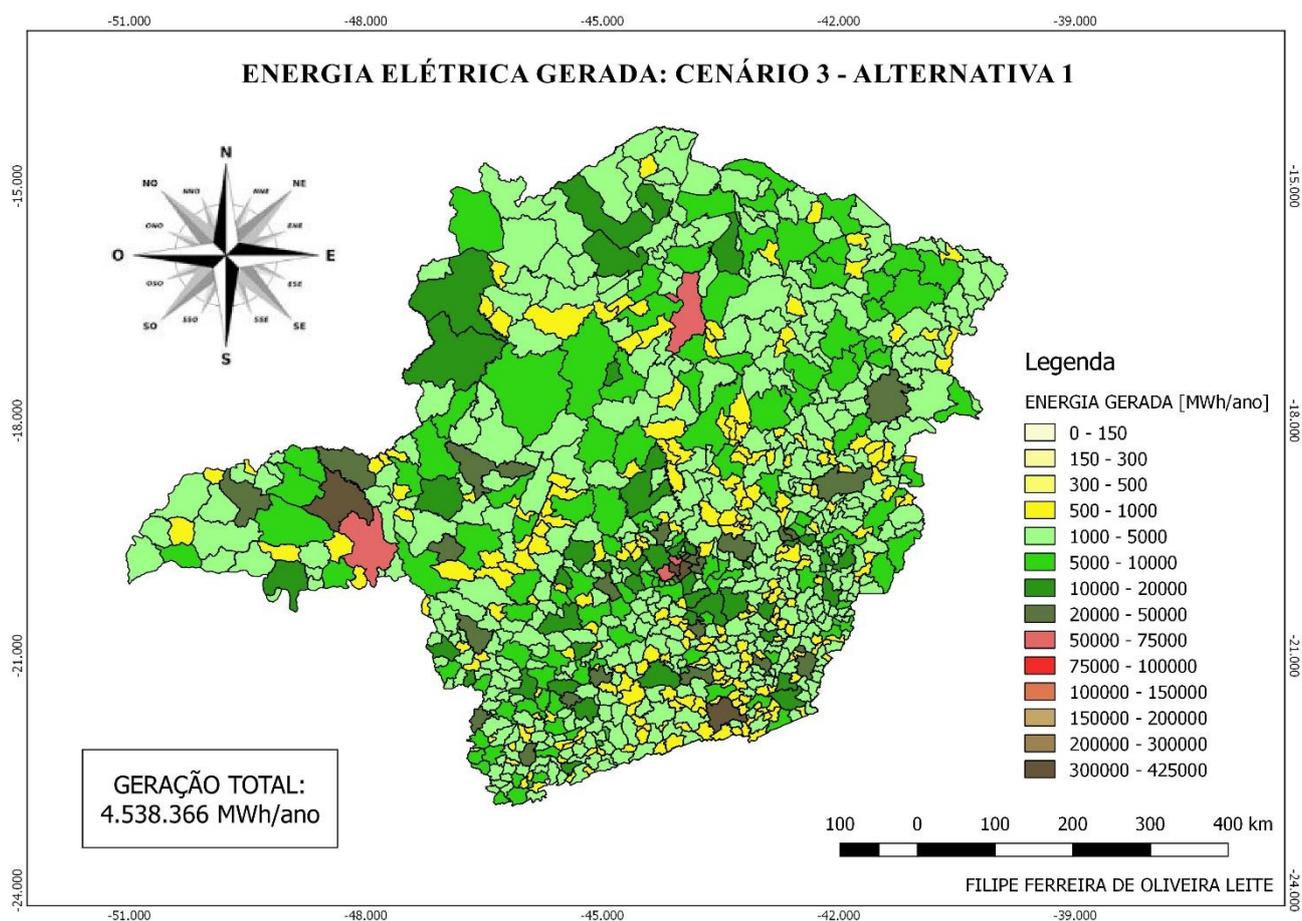


Figura 4.14: Geração de energia elétrica anual para o Cenário C3 – A1.

Nota-se uma maior geração de energia elétrica em comparação ao Cenário 2 (com a digestão anaeróbia), que pode ser observada inicialmente pela mudança na escala de cores do mapa. Para o Cenário C3 – A1, nota-se que a menor geração, esteve na faixa de 500 a 1.000 MWh ao ano. Neste caso a geração atingiu a maior faixa de geração entre 300.000 e 425.000 MWh ao ano nos quatro municípios com população superior a 500.000 habitantes. Com a geração de energia do Cenário 3 - Alternativa 1, ou seja, com a incineração e reciclagem somente de metais e vidros, seria possível abastecer 3.054.904 residências do estado com energia elétrica durante um ano, ou seja, com uma geração total de 4.538.366 MWh/ano. Neste Cenário a geração seria 5 vezes maior do que para o Cenário 2.

Para o Cenário 3 – Alternativa 2, ou seja, com a incineração de uma pequena fração do RSU (madeira, têxteis e couro), a Figura 4.15 mostra a distribuição do potencial de geração de energia elétrica.

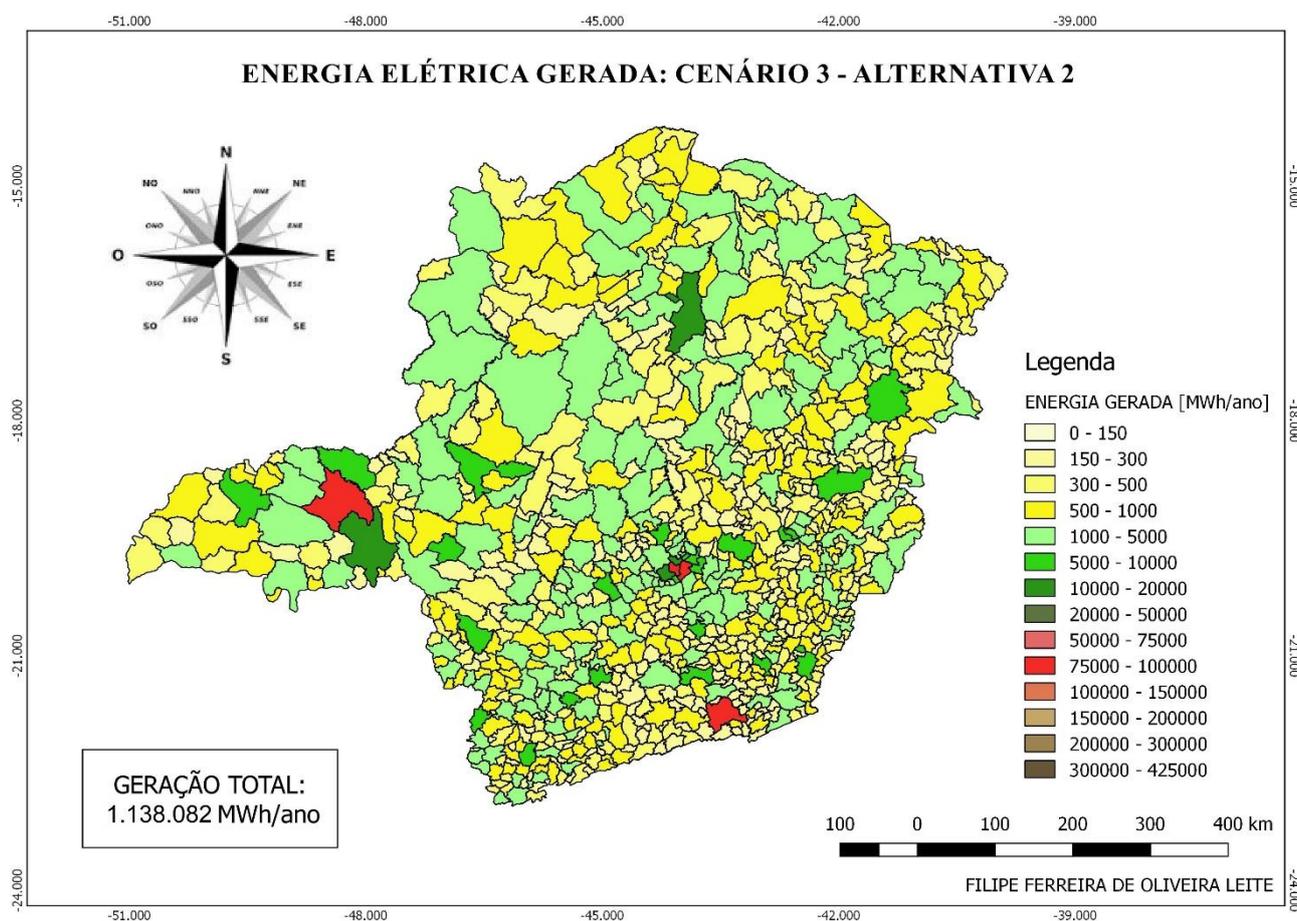


Figura 4.15: Geração de energia elétrica anual para o Cenário C3 – A2.

Através da escala de cores no mapa da Figura 4.15 nota-se, para a incineração de madeira, têxteis e couro associada à digestão anaeróbia (Cenário 3 – Alternativa 2) uma menor energia gerada em relação ao Cenário 3 – Alternativa 1, porém, superior ao Cenário 2. É possível notar uma geração máxima nos quatro municípios de maior população entre 75.000 e 100.0000 MWh/ano. A geração total anual de eletricidade com a o Cenário 3 – Alternativa 2 é de 1.138.082 MWh/ano e poderia atender ao consumo de eletricidade de 766.076 residências em um ano. Ao correlacionar a Figura 4.15 com a Figura 4.1, é possível notar, através dos municípios com população de até 5.000 habitantes e aqueles com população entre 10.000 e 20.000 habitantes, que houve um incremento na energia elétrica gerada anualmente se comparado ao Cenário 2.

A terceira alternativa para o Cenário 3 (Cenário C3 – A3) tem a distribuição de seu potencial de geração de energia elétrica mostrada na Figura 4.16.

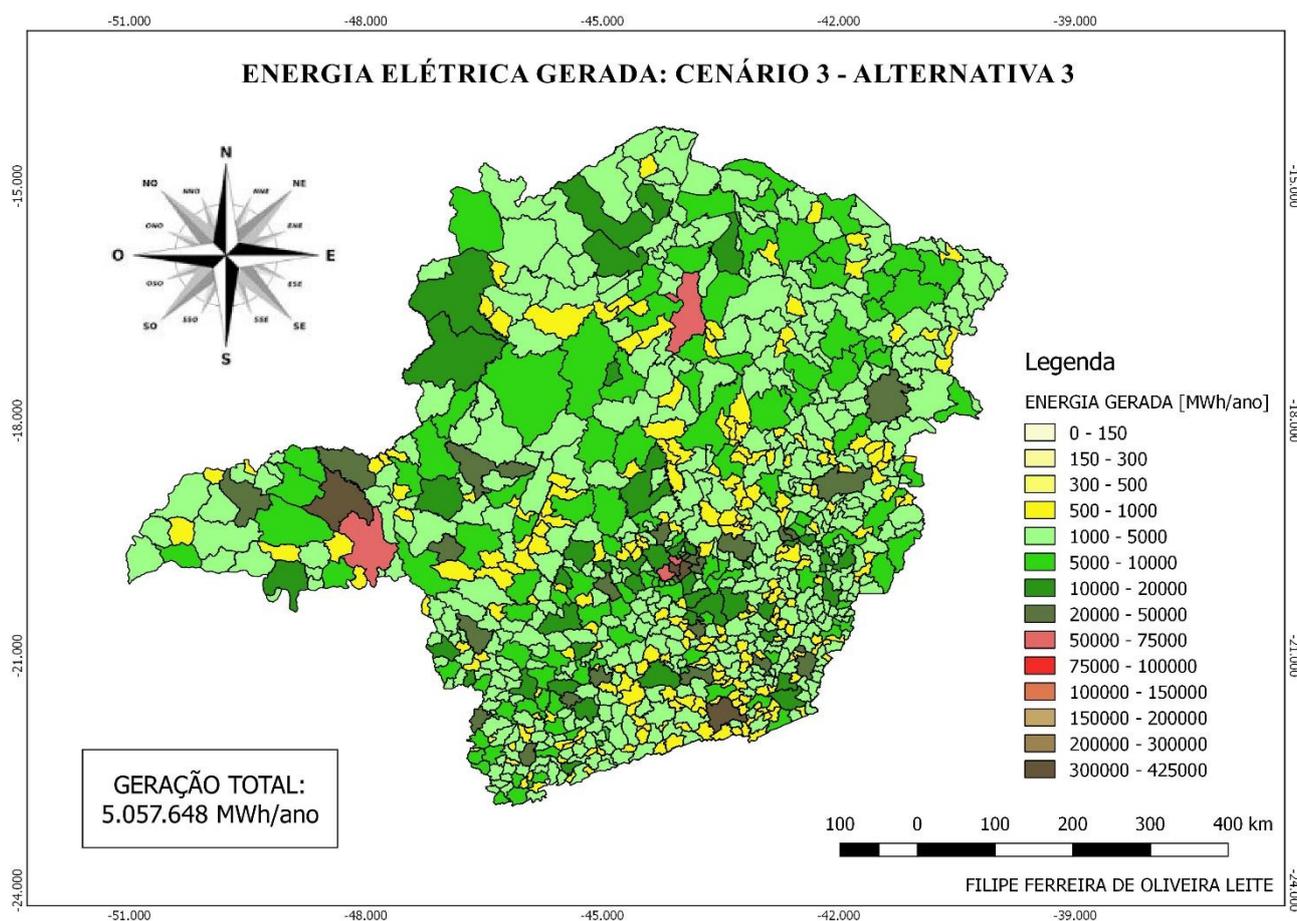


Figura 4.16: Geração de energia elétrica anual para o Cenário C3 – A3.

Ao associar a incineração de papel e plástico à digestão anaeróbia obteve-se um maior potencial com relação às outras duas alternativas analisadas com a incineração (Cenários C3 – A1 e C3 – A2). Com esta alternativa é possível obter uma geração 11% maior do que no Cenário C3 – A1 e aproximadamente 4,4 vezes maior do que como o Cenário C3 – A2. Conforme a escala de cores mostrada no mapa da Figura 4.16, tem-se uma geração mínima, para os municípios de menor população, ou seja, até 5.000 habitantes, entre 500 e 1000 MWh/ano. A geração máxima alcançou a maior classe, ou seja, entre 300.000 e 425.000 para os municípios com população acima de 500.000 habitantes.

O Cenário 3 – Alternativa 3 apresentou uma geração de energia elétrica de 5.057.648 MWh/ano, superior as anteriores, que pode ser observada, também, pela mudança de cores no mapa. Com a incineração de plástico e papel aliada à digestão anaeróbia, seria possível atender ao consumo de energia elétrica de 3.404.448 residências durante um ano.

Na Figura 4.17 tem-se a distribuição do potencial para geração de energia elétrica com a gaseificação da matéria orgânica, papel e plástico (Cenário 4 – Alternativa 1).

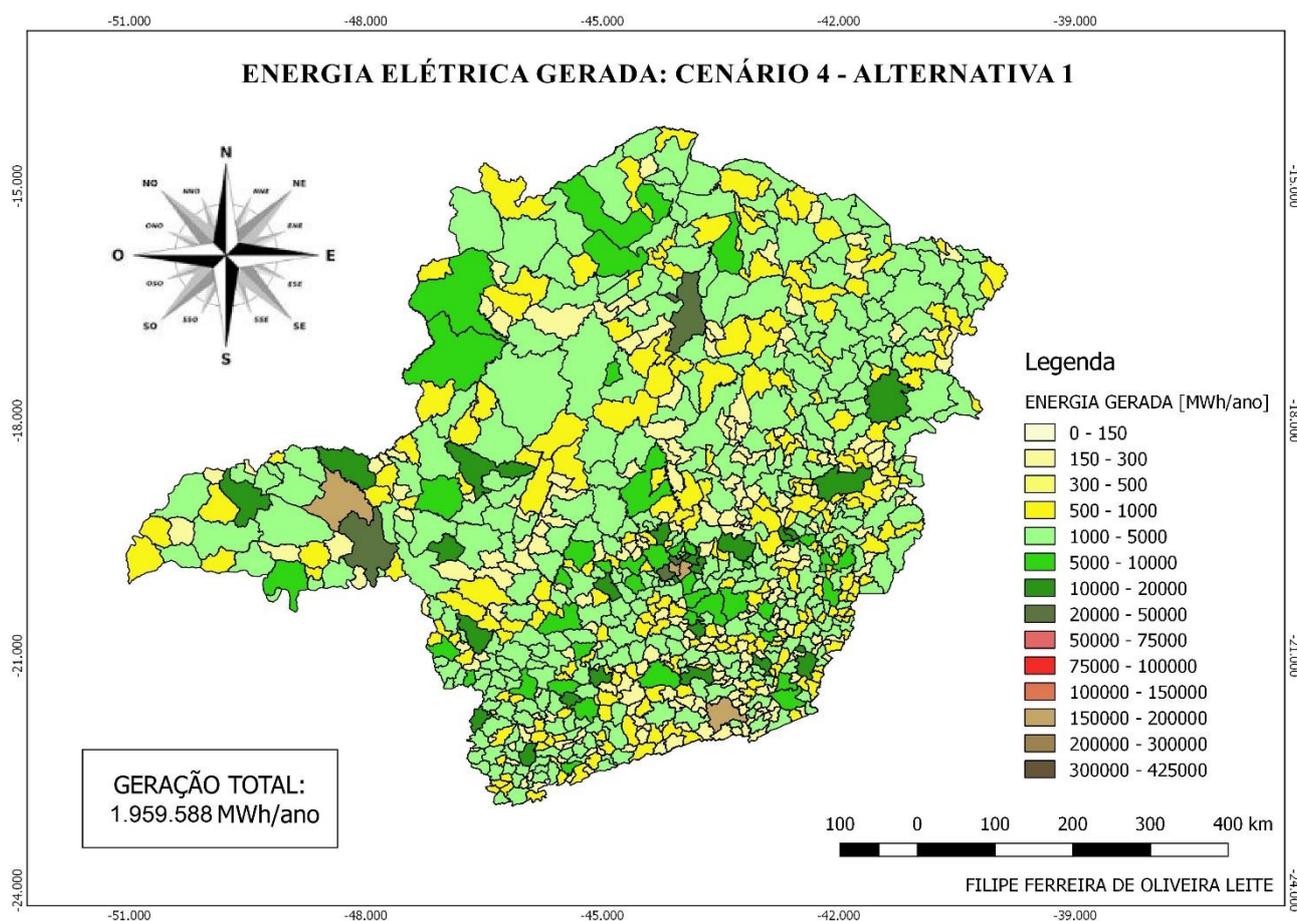


Figura 4.17: Geração de energia elétrica anual para o Cenário C4 – A1.

Conforme o Cenário 4 – Alternativa 1 mostrado na Figura 4.17, tem-se uma geração elétrica mínima na Faixa entre 150 e 300 MWh/ano. A geração máxima alcança a faixa de 150.000 a 200.000 MWh ao ano em determinados municípios. É possível observar, através do gráfico, que com esta alternativa a maior parte dos municípios estaria gerando 5.000 MWh ou menos de energia elétrica. Com uma geração elétrica anual total de 1.959.588 MWh/ano, para este cenário, seria possível fornecer eletricidade para 1.319.054 residências do estado durante um ano.

O potencial com o Cenário 3 – Alternativa 1 se mostra maior do que em alguns casos levantados, porém, não prioriza a reciclagem, por exemplo. Se comparado com as alternativas utilizadas para a incineração, este cenário só poderia gerar mais energia elétrica do que o Cenário 3 – Alternativa 2, que enviou uma quantidade mínima de material para a incineração.

A Figura 4.18 mostra o potencial para a segunda alternativa com o uso da gaseificação, onde são destinadas para este tratamento as frações de papel, plástico e outros. A fração orgânica, neste caso, foi destinada à digestão anaeróbia. Assim, no Cenário 4 - Alternativa 2 tem-se a soma dos potenciais de geração elétrica das duas tecnologias.

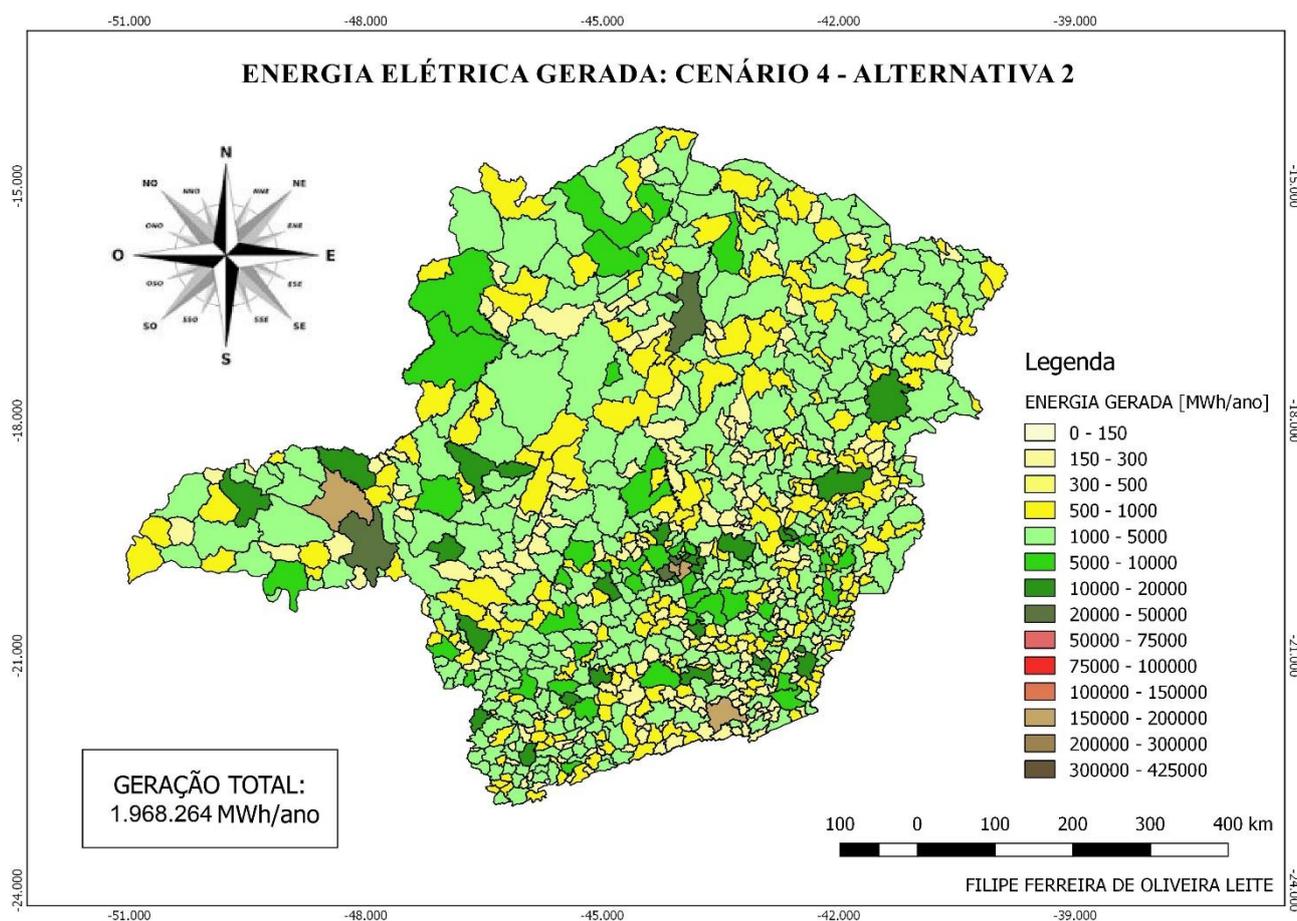


Figura 4. 18: Geração de energia elétrica anual para o Cenário C4 – A2.

Através da Figura 4.18, é possível verificar para o Cenário 4 – Alternativa 2 uma geração bem próxima à observada para o Cenário 4 – Alternativa 1, pelas cores, observa-se que os máximos e mínimos gerados se encontram na mesma faixa. Em comparação com a Alternativa 1 (Cenário C4 – A1) este cenário gera 0,4% a mais em energia apenas e, assim, pode ser mais vantajosa pois além de gerar uma quantidade de energia elétrica ligeiramente maior, podendo ser considerada igual, poderia produzir composto. Contudo, este cenário não é o mais adequado quanto ao aspecto da reciclagem, pois reciclaria apenas uma pequena porção dos resíduos (metais e vidros).

O Cenário 4 - Alternativa 2 apresenta um potencial máximo de 1.968.264 MWh ao ano, essa energia elétrica seria capaz de atender ao consumo de 1.324.895 residências do estado de Minas Gerais durante um ano, ou seja, 5.841 residências a mais do que a gaseificação sem associação à digestão anaeróbia.

O potencial para a terceira alternativa com o uso da gaseificação é mostrado na Figura 4.19. Nesta alternativa a gaseificação da fração outros é associada à digestão anaeróbia da fração orgânica, onde é possível priorizar a reciclagem de papel e plástico, além de metais e vidros.

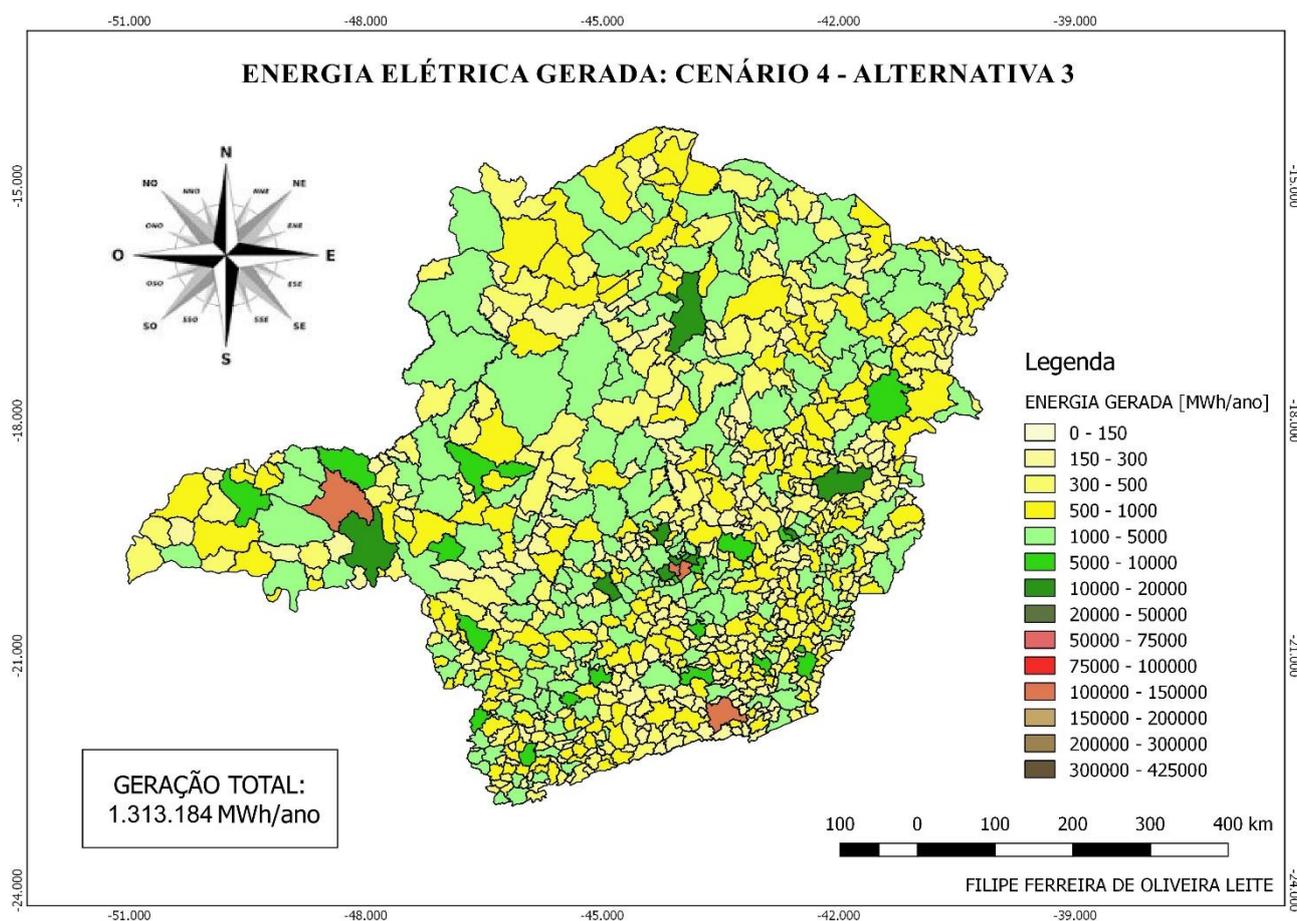


Figura 4.19: Geração de energia elétrica anual para o Cenário C4 – A3.

Desta forma, conforme mostra a Figura 4.19, o Cenário 4 - Alternativa 3 apresentou uma geração elétrica anual mínima (no caso dos municípios de até 5.000 habitantes) na faixa entre 150 e 300 MWh/ano. A geração elétrica anual máxima observada para os municípios acima de 500.000 habitantes não ultrapassa a faixa entre 50.000 e 75.000 MWh. Esta alternativa, se comparada à primeira e à segunda do Cenário 4, gera menor energia, pelo valor total da geração observado tem-se uma geração 33% menor do que para ambos os cenários (Cenário 4 – Alternativa 1 e Cenário 4 - Alternativa 2).

A geração elétrica com Cenário 4 - Alternativa 3 é de 1.313.184 MWh/ano, que possibilita atender ao consumo de energia elétrica de 883.941 residências típicas do estado de Minas Gerais por um ano. Apesar de uma menor geração de eletricidade comparada a alguns dos cenários vistos até aqui, para este caso, tem-se a vantagem de reciclar uma maior fração do RSU e, com isso, esta alternativa permite uma redução significativa na quantidade de resíduos depositada em aterros.

O Cenário 5, com a geração de energia elétrica a partir do gás de aterro, tem seu potencial de geração mostrado conforme a Figura 4.20.

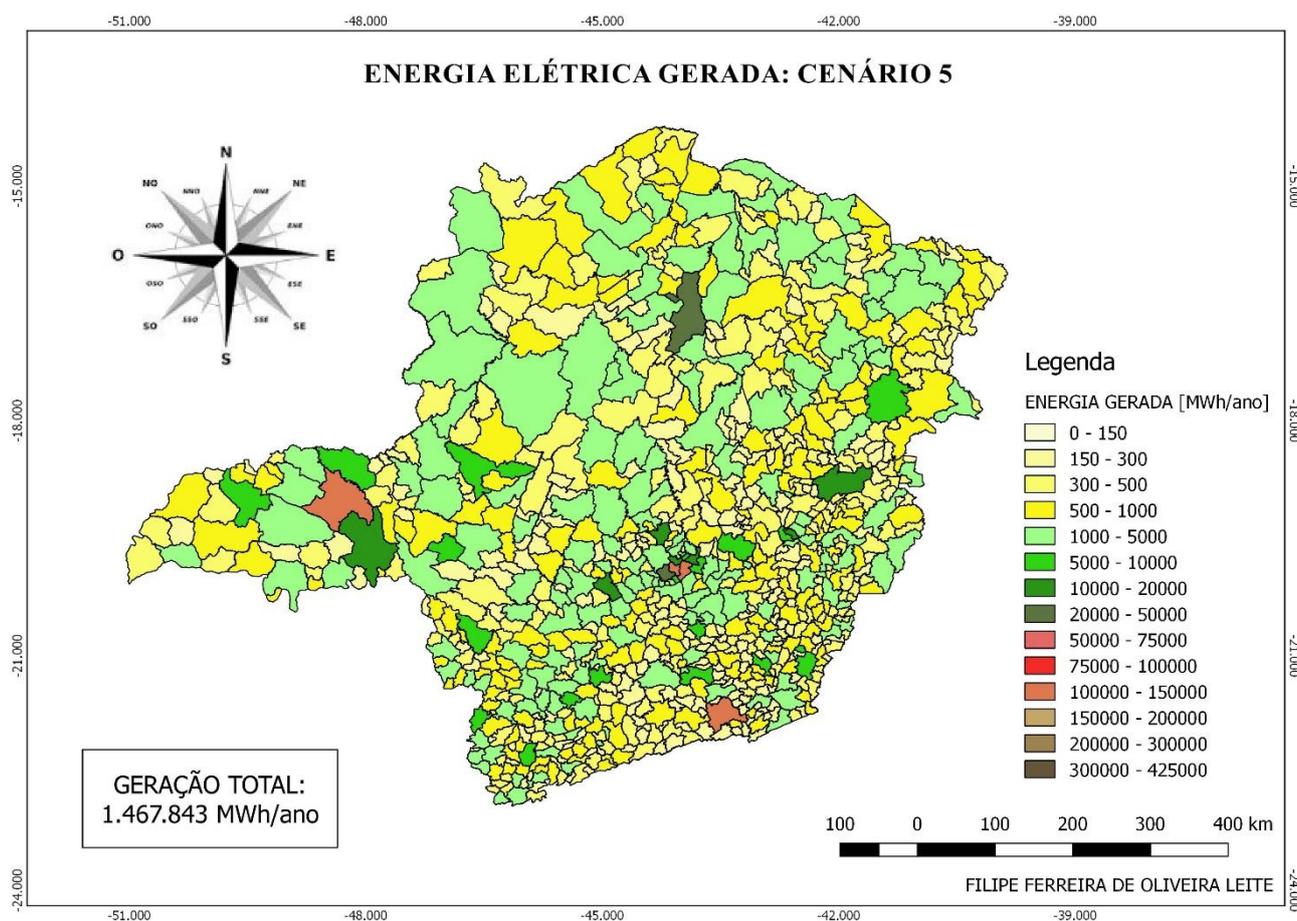


Figura 4.20: Geração de energia elétrica anual para o Cenário 5.

O mapa característico da geração com o Cenário 5 (Figura 4.20) é semelhante ao observado na Figura 4.19, para o Cenário 4 – Alternativa 3, com as gerações mínimas e máximas dentro da mesma faixa. Porém, dentro das faixas de geração mostradas no mapa para o gás de aterro, a geração foi ligeiramente superior ao mostrado na Figura 4.19, o que, no total, ocasionou um maior potencial elétrico maior.

A energia elétrica gerada com o Cenário 5 foi de 1.467.843 MWh ao ano e poderia atender ao consumo de 988.047 residências em um ano em Minas Gerais. Apesar de apresentar uma geração superior aos cenários C2, C3 – A2 e C4 – A3, o Cenário 5 tem a desvantagem de não realizar nenhuma reciclagem, além de não reduzir a disposição em aterros.

Conforme os mapas, pode-se observar os maiores potenciais para os Cenários C3-A1 e C3-A3. Os Cenários C3-A3 e C5 apresentaram potencial elétrico semelhante como pode ser observado nas cores dos mapas. A menor geração elétrica anual foi observada no Cenário 2.

No caso do estado de Minas Gerais, se o objetivo for o melhor aproveitamento energético dos resíduos, é preciso verificar maneiras de se viabilizar as tecnologias em municípios com população de até 100.000 habitantes, pois a grande maioria dos municípios do estado não são de grande porte, estando compreendidos em grande parte nesta faixa populacional.

A potência disponível e a energia elétrica total gerada anualmente no estado de Minas Gerais com cada cenário são mostradas na Figura 4.21, que permite analisar de forma resumida o potencial total existente para cada tecnologia com a aplicação de cada um dos cenários.

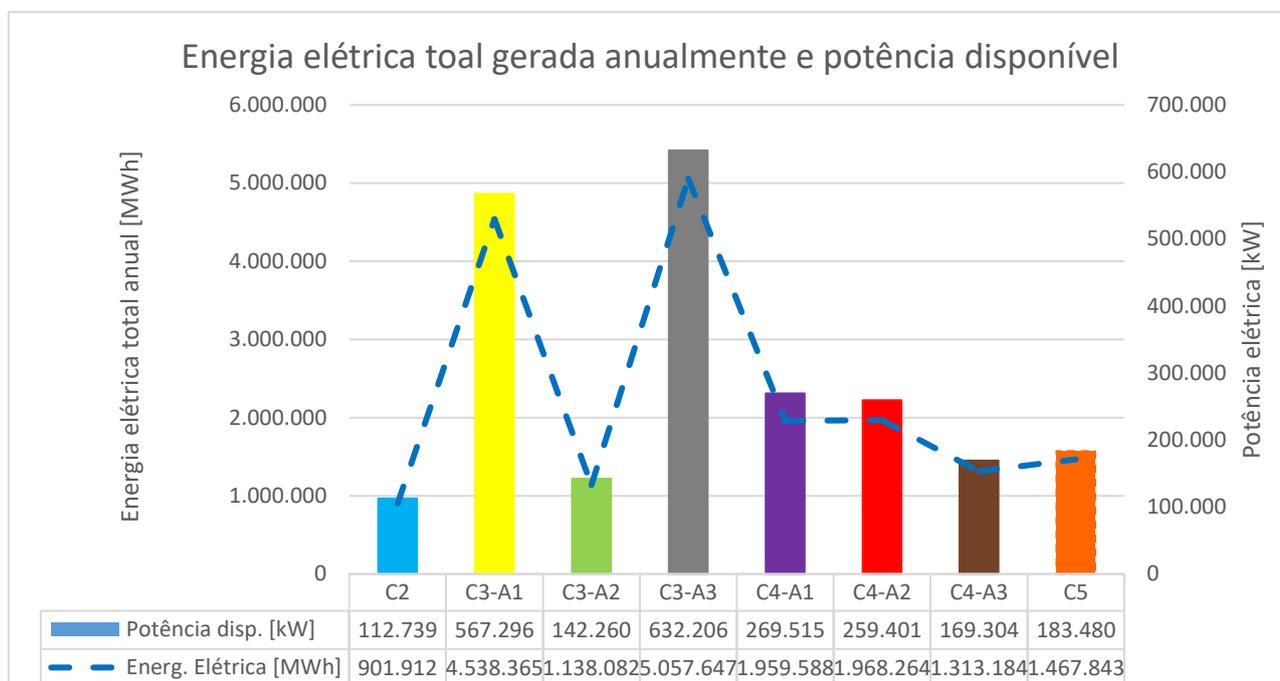


Figura 4.21: Potência disponível e energia elétrica total gerada anualmente em cada um dos cenários.

Nota-se um maior potencial energético para o Cenário C3 – A3, ou seja, com incineração de papel e plástico associada à digestão anaeróbia. A potência elétrica disponível com este cenário seria de 632,21 MW e a energia elétrica gerada seria de 5.057.647 MWh ao ano. Porém, no Cenário C3-A3, com as condições assumidas, seriam reciclados apenas 2,7% dos resíduos e 19,4% dos resíduos seriam enviados para o aterro, assim, esta poderia ser a opção mais atrativa do ponto de vista técnico, mas não do ponto de vista ambiental, pois outros cenários poderiam gerar maior redução na disposição em aterros como os cenários C3-A2, C4-A2 e C4-A3.

A menor geração de energia, dentre os cenários de possível geração, seria no Cenário 2, com o uso da Digestão Anaeróbia. Porém, esta tecnologia tem o benefício de gerar outro produto que seria o composto. A potência elétrica disponível seria de 112,7 MW e a geração elétrica anual alcançaria 901.912 MWh.

O Cenário C3-A2, dentre os cenários com uso da incineração, foi o que apresentou menor potencial para geração elétrica. A potência disponível, neste caso, seria de 142,3 MW e a energia elétrica anual gerada seria de 1.138.08 MWh em todo o estado. A vantagem com esta alternativa seria o envio de uma maior fração de resíduos à reciclagem.

Com a utilização da gaseificação, o cenário de menor geração elétrica seria o C3-A3, com potência disponível de 169,3 MW e energia elétrica total anual de 1.113.184MWh ao ano em todo o estado. Com a utilização do gás de aterro, Cenário C5, o potencial elétrico disponível seria de 183,5 MW com geração elétrica total anual de 1.467.843 MWh.

Na próxima seção são mostrados os resultados de uma avaliação econômica para os cenários em questão, uma vez que pode haver restrições para aplicação de determinadas tecnologias de acordo com a capacidade das instalações, que está diretamente relacionado ao tamanho da população que envia o resíduo ao tratamento.

4.4 Avaliação Econômica

4.4.1 Avaliação econômica da compostagem – Cenário 1

A capacidade da planta calculada e o número de unidades conforme a capacidade a serem assumidas para o cálculo do investimento são mostrados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Capacidade das plantas de compostagem em função da população

Faixa – intervalo	RSU – orgânico [t/ano]	Prod. Comp. [ton/ano]	Capacidade da planta [ton/dia]	Unidades		
				3 t/d	10 t/d	20 t/d
Até 5.000 habitantes	777,64	194,41	3	1	0	0
De 5.001 até 10.000	1.555,29	388,82	6	2	0	0
De 10.001 até 20.000	3.110,57	777,64	9	3	0	0
De 20.001 até 50.000	7.776,43	1.944,11	23	1	0	1
De 50.001 até 100.000	15.552,87	3.888,22	43	1	0	2
De 100.001 até 200.000	31.105,74	7.776,43	86	2	0	4
De 200.001 até 300.000	46.658,61	11.664,65	130	0	1	6
De 300.001 até 400.000	62.211,48	15.552,87	170	0	1	8
De 400.001 até 500.000	77.764,35	19.441,09	213	1	1	10
500.001 ou mais	466.586,07	116.646,52	1.280	0	0	64

O resultado para a avaliação econômica com a compostagem e, portanto, para o Cenário 1 é mostrada na Tabela 4.4, é mostrado na tabela o valor do investimento o custo de operação e manutenção (CO&M), VPL e a TIR.

Tabela 4.4: Resultados da avaliação econômica da compostagem - Cenário C1

Faixa – intervalo	Investimento		VPL [R\$]	TIR [%]
	[R\$]	C _{O&M} [R\$]		
Até 5.000 habitantes	28.941,60	19.294,40	14.284,08	14,81%
De 5.001 até 10.000	57.883,20	38.588,80	28.568,15	14,81%
De 10.001 até 20.000	86.824,80	57.883,20	268.401,69	43,26%
De 20.001 até 50.000	221.885,60	147.975,60	635.303,22	40,84%
De 50.001 até 100.000	414.829,60	276.656,80	1.481.871,83	48,37%
De 100.001 até 200.000	829.659,20	553.313,60	2.963.743,65	48,37%
De 200.001 até 300.000	1.254.136,00	836.427,80	4.374.948,63	47,48%
De 300.001 até 400.000	1.640.024	1.093.790	6.068.085,84	49,72%
De 400.001 até 500.000	2.054.853,60	1.370.447,00	7.549.957,67	49,45%
500.001 ou mais	12.348.416,00	8.235.596,80	45.158.412,30	49,27%

Com os resultados da avaliação, conforme VPL e TIR, nota-se que a compostagem seria viável para aplicação em todas as faixas populacionais, uma vez que o VPL foi positivo para todos os casos e a TIR se apresentou maior do que a taxa de juros.

4.4.2 Avaliação econômica para a digestão anaeróbia – Cenário 2

A Tabela 4.5 traz os valores da potência instalada, calculada e assumida conforme a disponibilidade do equipamento do fabricante para cada faixa populacional. A tabela traz, também, a produção de composto e a geração de energia obtidas e utilizadas na composição das receitas.

Tabela 4.5: Potência instalada, produção de composto e energia gerada com a digestão anaeróbia

Faixa – intervalo	Potência instalada [kW]	Produção de Composto [t/ano]	Energia elétrica anual [MWh]
Até 5.000 habitantes	75	328,94	124,90
De 5.001 até 10.000	75	657,89	249,80
De 10.001 até 20.000	75	1.315,77	499,61
De 20.001 até 50.000	250	3.289,43	1.249,01
De 50.001 até 100.000	500	6.578,86	2.498,03
De 100.001 até 200.000	650	13.157,73	4.996,05
De 200.001 até 300.000	1000	19.736,59	7.494,08
De 300.000 até 400.000	1250	26.315,45	9.992,10
De 400.001 até 500.000	1575	32.894,32	12.490,13
500.001 ou mais	9500	197.365,91	74.940,75

Os resultados da avaliação econômica da digestão anaeróbia são mostrados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6: Resultados da avaliação econômica da digestão anaeróbia - Cenário C2

Faixa – intervalo	Investimento [R\$]	C_{O&M} [R\$]	VPL [R\$]	TIR [%]
Até 5.000 habitantes	3.399.975,00	237.998,25	-4.386.440,71	-
De 5.001 até 10.000	3.399.975,00	237.998,25	-3.123.925,23	-
De 10.001 até 20.000	3.399.975,00	237.998,25	-598.894,29	6,00%
De 20.001 até 50.000	7.555.500,00	528.885,00	71.918,77	8,65%
De 50.001 até 100.000	11.585.100,00	810.957,00	6.002.014,33	15,10%
De 100.001 até 200.000	16.496.175,00	1.154.732,25	23.092.720,41	25,11%
De 200.001 até 300.000	20.148.000,00	1.410.360,00	42.275.632,49	32,67%
De 300.000 até 400.000	27.703.500,00	1.939.245,00	54.972.705,99	31,45%
De 400.001 até 500.000	35.133.075,00	2.459.315,25	55.379.377,82	27,04%
500.001 ou mais	192.917.100,00	13.504.197,00	216.362.532,33	22,03%

Conforme a análise feita, nota-se um VPL positivo a partir da faixa populacional de “20.001 a 50.000” em diante, a TIR é ligeiramente superior a taxa de desconto assumida. Com isso, conclui-se que a partir das situações assumidas a digestão anaeróbia seria viável somente a partir da faixa de população de “20.001 a 50.000” habitantes.

4.4.3 Avaliação econômica para a incineração: Cenário 3 – Alternativas 1, 2 e 3

Para a incineração, com as considerações do Cenário 3 - Alternativa 1 da Seção 3.4, o RSU disponível para tratamento por dia e a capacidade da planta de incineração em toneladas por ano são mostrados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7: RSU disponível para tratamento, capacidade da planta de incineração e energia gerada em função da população para o Cenário C3 – A1

Faixa – intervalo	RSU - disponível [t/ano]	Capacidade [10³t/ano]	Energia elétrica [MWh/ano]
Até 5.000 habitantes	1.110,18	1,11	628,50
De 5.001 até 10.000	2.220,37	2,22	1.256,99
De 10.001 até 20.000	4.440,74	4,44	2.513,98
De 20.001 até 50.000	11.101,84	11,10	6.284,95
De 50.001 até 100.000	22.203,69	22,20	12.569,91
De 100.001 até 200.000	44.407,37	44,41	25.139,82
De 200.001 até 300.000	66.611,06	66,61	37.709,73
De 300.001 até 400.000	88.814,75	88,81	50.279,63
De 400.001 até 500.000	111.018,44	111,02	62.849,54
500.001 ou mais	600.000,00	666,11	377.097,25

Os resultados da análise para o cenário são mostrados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8: Resultados da avaliação econômica da incineração conforme o Cenário C3 – A1

Faixa – intervalo	Investimento [R\$]	C O&M [R\$]	VPL [R\$]	TIR [%]
Até 5.000 habitantes	-	-	-	-
De 5.001 até 10.000	-	-	-	-
De 10.001 até 20.000	-	-	-	-
De 20.001 até 50.000	-	-	-	-
De 50.001 até 100.000	60.832,02	22,20	-39.254.257,87	0,04%
De 100.001 até 200.000	121.664,04	44,41	-56.207.436,99	1,89%
De 200.001 até 300.000	182.496,06	66,61	-66.904.698,17	2,92%
De 300.001 até 400.000	243.328,08	88,81	-73.905.812,73	3,70%
De 400.001 até 500.000	304.160,10	111,02	-78.327.296,52	4,26%
500.001 ou mais	1.824.960,60	666,11	80.978.774,66	9,15%

Para as faixas populacionais até 50.000 habitantes não são indicados os valores de VPL e TIR pois estes não foram calculados, devido ao fato de não serem aplicados os investimentos para plantas com capacidade inferior a 20.000 toneladas por ano, conforme Tsilemou & Ppanagiotakopoulos (2006).

A viabilidade com a incineração, neste caso, só se deu na faixa acima de 500.000 habitantes, onde o VPL foi maior que zero e a TIR maior do que a taxa de desconto.

A Tabela 4.9 mostra as quantidades de RSU disponíveis para tratamento com a incineração e para o tratamento com a digestão anaeróbia (DA) e, mostra ainda, a capacidade da planta de incineração para as condições assumidas no Cenário 3 – Alternativa 2 da Seção 3.4. A potência instalada da planta de digestão anaeróbia é a mesma do Cenário 2.

Tabela 4.9: RSU disponível para tratamento em cada planta, capacidade da planta de e energia gerada em função da população conforme Cenário C3 – A2

Faixa – intervalo	RSU – disponível para a DA [t/ano]	RSU – disponível para a incin. [t/ano]	Capacidade [10³t/ano]	Energia elétrica [MWh/ano]
Até 5.000 habitantes	2.130,53	35,10	0,04	157,92
De 5.001 até 10.000	4.261,06	70,20	0,07	315,85
De 10.001 até 20.000	8.522,12	140,40	0,14	631,70
De 20.001 até 50.000	21.305,30	351,00	0,35	1.579,25
De 50.001 até 100.000	42.610,60	702,00	0,70	3.158,50
De 100.001 até 200.000	85.221,20	1.403,99	1,40	6.317,00
De 200.001 até 300.000	127.831,80	2.105,99	2,11	9.475,49
De 300.001 até 400.000	170.442,40	2.807,99	2,81	12.633,99
De 400.001 até 500.000	213.053,00	3.509,99	3,51	15.792,49
500.001 ou mais	1.278.318,00	21.059,92	21,06	94.754,94

Assim, como para o Cenário 3 – Alternativa 1, não se aplicaria o investimento em todas as faixas populacionais, porém neste caso só seria possível o investimento na faixa populacional acima de 500.000 habitantes. Por isso, somente foram calculados o investimento, custo de operação e

manutenção, VPL e TIR para esta faixa. Neste caso avaliou-se as plantas de incineração e digestão anaeróbia integradas, com o resultado dado na Tabela 4.10.

Tabela 4.10: Resultados da avaliação econômica da incineração conforme o Cenário C3 – A2

Faixa – intervalo	Investimento [R\$]	C O&M [R\$]	VPL [R\$]	TIR [%]
500.001 ou mais	265.345.228,41	14.248.102,35	414.648.133,09	26,89%

Portanto, somente seria viável a aplicação da incineração com a incineração de madeira, têxteis e couro associada à digestão anaeróbia na faixa acima de 500.000 habitantes.

Outra possibilidade avaliada foi com o uso da incineração das frações de papel e plástico, com a digestão anaeróbia da fração orgânica, conforme o Cenário 3 – Alternativa 3 da Seção 3.4. A Tabela 4.11 traz a quantidade de RSU disponível para o tratamento em cada planta e a capacidade da planta de incineração.

Tabela 4.11: RSU disponível para tratamento em cada planta, capacidade da planta de incineração e energia gerada em função da população conforme Cenário C3 – A3

Faixa – intervalo	RSU – disponível para a DA [t/ano]	RSU – disponível para a incin. [t/ano]	Capacidade [10³t/ano]
Até 5.000 habitantes	2.130,53	402,44	0,40
De 5.001 até 10.000	4.261,06	804,88	0,80
De 10.001 até 20.000	8.522,12	1.609,75	1,61
De 20.001 até 50.000	21.305,30	4.024,38	4,02
De 50.001 até 100.000	42.610,60	8.048,76	8,05
De 100.001 até 200.000	85.221,20	16.097,52	16,10
De 200.001 até 300.000	127.831,80	24.146,28	24,15
De 300.001 até 400.000	170.442,40	32.195,04	32,20
De 400.001 até 500.000	213.053,00	40.243,81	40,24
500.001 ou mais	1.278.318	241.462,83	241,46

Para este caso, o cálculo do investimento só seria possível para a planta de incineração nas faixas de “200.001 até 300.000” em diante. Com isso, tem-se o resultado da análise econômica, conforme as condições do Cenário 3 – Alternativa 3, dado na Tabela 4.12.

Tabela 4.12: Resultados da avaliação econômica da incineração conforme o Cenário C3 – A3

Faixa – intervalo	Investimento [R\$]	C O&M [R\$]	VPL [R\$]	TIR [%]
Até 5.000 habitantes	-	-	-	-
De 5.001 até 10.000	-	-	-	-
De 10.001 até 20.000	-	-	-	-
De 20.001 até 50.000	-	-	-	-
De 50.001 até 100.000	-	-	-	-
De 100.001 até 200.000	-	-	-	-
De 200.001 até 300.000	100.950.013,73	2.229.000,53	43.890.788,94	14,10%
De 300.001 até 400.000	129.415.729,39	2.940.513,05	64.002.885,65	14,82%
De 400.001 até 500.000	156.724.006,05	3.629.858,23	85.481.893,14	15,43%
500.001 ou mais	702.743.340,09	17.607.118,81	789.915.951,07	22,06%

Assim, conforme o Cenário 3 – Alternativa 3, a viabilidade econômica foi verificada para as faixas populacionais de 200.001 até 300.000 habitantes em diante, visto que para estas faixas o VPL foi positivo e a TIR superior a taxa de desconto.

4.4.4 Avaliação econômica para a gaseificação: Cenários 4 – Alternativas 1, 2, 3

Para a gaseificação de matéria orgânica, plástico e papel, conforme o Cenário 4 – Alternativa 1, procedeu-se a avaliação econômica a partir do cálculo do investimento de acordo com a capacidade das plantas de cada faixa populacional. A Tabela 4.13 mostra o dimensionamento e número de unidades de processamento primário para este caso.

Tabela 4.13: Capacidade para a unidade de processamento primário da planta conforme Cenário C4 – A1

Faixa – intervalo	Massa coletada [t/ano]	Processamento Primário (t/h)	Número de Unidades de tratam. Primário
Até 5.000 habitantes	1.512,93	0,17	1 de 0,40 t/h
De 5.001 até 10.000	3.025,85	0,35	1 de 0,40 t/h
De 10.001 até 20.000	6.051,70	0,69	2 de 0,40 t/h
De 20.001 até 50.000	15.129,25	1,73	1 de 2,10 t/h
De 50.001 até 100.000	30.258,50	3,45	1 de 4,20 t/h
De 100.001 até 200.000	60.517,00	6,91	2 de 4,20 t/h
De 200.001 até 300.000	90.775,50	10,36	1 de 10,00 t/h
De 300.001 até 400.000	121.034,00	13,82	1 de 10,00 e 1 de 4,20 t/h
De 400.001 até 500.000	151.292,50	17,27	1 de 16,70 e 1 de 2,10 t/h
500.001 ou mais	907.755,00	103,63	6 de 16,70 e 1 de 2,10 t/h

A Tabela 4.14 apresenta o número de unidades de tratamento mecânico para a gaseificação aliada a digestão anaeróbia conforme o Cenário 4 – Alternativa 1, conforme a capacidade de produção dos briquetes.

Tabela 4.14: Número de unidades de tratamento mecânico para a gaseificação conforme o Cenário C4 – A1

Faixa – intervalo	Produção CDR [kg/dia]	Tratamento Mecânico [t/h]	Número de Unidades
Até 5.000 habitantes	1.099,25	0,05	1 de 0,5 t/h
De 5.001 até 10.000	2.198,51	0,09	1 de 0,5 t/h
De 10.001 até 20.000	4.397,02	0,18	1 de 0,5 t/h
De 20.001 até 50.000	10.992,54	0,46	1 de 0,5 t/h
De 50.001 até 100.000	21.985,08	0,92	1 de 1,0 t/h
De 100.001 até 200.000	43.970,16	1,83	1 de 1,0 e 1 de 0,8 t/h
De 200.001 até 300.000	65.955,24	2,75	1 de 2,0 e 1 de 0,8 t/h
De 300.001 até 400.000	87.940,32	3,66	1 de 2,0; 1 de 1,0 e 1 de 0,8 t/h
De 400.001 até 500.000	109.925,40	4,58	2 de 2,0 e 0,8 t/h
500.001 ou mais	659.552,40	27,48	27 de 2 e 1 de 0,5 t/h

O número de unidades de gaseificação e de unidades geradoras é dado na Tabela 4.15, em função da potência térmica e da potência disponível (considerando a eficiência do equipamento).

Tabela 4.15: Número de unidades de gaseificação e de geração conforme o Cenário C4 - A1

Faixa – intervalo	Potência térmica [kW]	Potência inst [kW]	Unid. de gaseif.	Unid. Geradoras
Até 5.000 habitantes	193,39	37,32	1 de 500 kW	1 de 96 kW
De 5.001 até 10.000	386,77	74,65	1 de 500 kW	1 de 96 kW
De 10.001 até 20.000	773,55	149,29	1 de 1000 kW	1 de 264 kW
De 20.001 até 50.000	1.933,87	373,24	2 de 1000 kW	1 de 264 e 2 de 96 kW
De 50.001 até 100.000	3.867,75	746,47	4 de 1000 kW	3 de 264 kW
De 100.001 até 200.000	7.735,49	1.492,95	8 de 1000 kW	6 de 264 kW
De 200.001 até 300.000	11.603,24	2.239,42	12 de 1000 kW	8 de 264 e 1 de 96 kW
De 300.001 até 400.000	15.470,98	2.985,90	15 de 1000 e 1 de 500 kW	11 de 264 e 1 de 96 kW
De 400.001 até 500.000	19.338,73	3.732,37	19 de 1000 e 1 de 500kW	14 de 264 e 1 de 96 kW
500.001 ou mais	116.032,37	22.394,25	116 de 1000 kW	85 de 264 kW

Assim, o investimento, o custo de operação e manutenção, o VPL e a TIR para a gaseificação conforme o Cenário 4 - Alternativa 1 são dados na Tabela 4.16.

Tabela 4.16: Resultados da avaliação econômica da gaseificação conforme o Cenário C4 – A1

Faixa – intervalo	Investimento [R\$]	C O&M [R\$]	VPL [R\$]	TIR [%]
Até 5.000 habitantes	2.993.902,17	174.245,11	-2.868.092,94	-
De 5.001 até 10.000	2.993.902,17	174.245,11	-1.095.742,34	-
De 10.001 até 20.000	5.100.041,22	296.822,40	-815.482,95	6,24%
De 20.001 até 50.000	8.710.214,95	506.934,51	4.222.977,77	14,70%
De 50.001 até 100.000	14.289.575,80	831.653,31	13.298.669,76	19,89%
De 100.001 até 200.000	28.460.828,36	1.656.420,21	26.780.736,38	20,00%
De 200.001 até 300.000	40.426.755,60	2.352.837,18	43.680.980,05	21,57%
De 300.001 até 400.000	53.327.150,79	3.103.640,18	59.132.831,12	21,89%
De 400.001 até 500.000	67.905.370,42	3.952.092,56	71.984.113,05	21,35%
500.001 ou mais	411.395.074,67	23.943.193,35	425.762.396,20	21,06%

Conforme a Tabela 4.16, conclui-se que a gaseificação nas condições supostas no Cenário 4 - Alternativa 1 são viáveis para as faixas populacionais de 20.001 até 50.000 habitantes em diante, conforme o VPL positivo e a TIR superior à taxa de desconto.

Para a gaseificação das frações de papel, plástico e outros associada à digestão anaeróbia, conforme o Cenário 4 - Alternativa 2, o investimento foi obtido do somatório dos investimentos das plantas das duas tecnologias referidas. As receitas foram obtidas da venda de energia das duas plantas, da venda de composto e do montante total de resíduos que é coletado, já que este é separado na planta de gaseificação no tratamento primário.

O número de unidades de processamento primário é semelhante ao assumido anteriormente para o Cenário 4 - Alternativa 1 (Tabela 4.13). Na Tabela 4.17 é dado o número de unidades de tratamento mecânico em função da produção de CDR, conforme o Cenário 4 - Alternativa 2.

Tabela 4.17: Número de unidades de tratamento mecânico para a gaseificação conforme o Cenário C4 - A2

Faixa – intervalo	Produção CDR [kg/dia]	Tratamento Mecânico [t/h]	Número de Unidades
Até 5.000 habitantes	610,23	0,03	1 de 0,5 ton/h
De 5.001 até 10.000	1.220,45	0,05	1 de 0,5 ton/h
De 10.001 até 20.000	2.440,91	0,10	1 de 0,5 ton/h
De 20.001 até 50.000	6.102,27	0,25	1 de 0,5 ton/h
De 50.001 até 100.000	12.204,54	0,51	1 de 0,8 ton/h
De 100.001 até 200.000	24.409,08	1,02	1 de 1,0 ton/h
De 200.001 até 300.000	36.613,61	1,53	1 de 1,5 ton/h
De 300.001 até 400.000	48.818,15	2,03	1 de 2,0 ton/h
De 400.001 até 500.000	61.022,69	2,54	1 de 2,0 e 1 de 0,5 ton/h
500.001 ou mais	366.136,14	15,26	7 de 2,0 ton/h e 1 de 1,5

O número de unidades de gaseificação e de unidades geradoras é dado na Tabela 4.18, em função da potência térmica e da potência disponível (considerando a eficiência do equipamento).

Tabela 4.18: Número de unidades de gaseificação e de geração conforme o Cenário C4 - A2

Faixa – intervalo	Potência térmica [kW]	Potência inst [kW]	Unid. de gaseif. [kW]	Unid. Geradoras
Até 5.000 habitantes	105,24	20,31	1 de 500 kW	1 de 96 kW
De 5.001 até 10.000	210,47	40,62	1 de 500 kW	1 de 96 kW
De 10.001 até 20.000	420,94	81,24	1 de 500 kW	1 de 96 kW
De 20.001 até 50.000	1.052,36	203,11	1 de 1000 kW	1 de 264 kW
De 50.001 até 100.000	2.104,72	406,21	2 de 1000 e 1 de 500 kW	1 de 264 e 2 de 96 kW
De 100.001 até 200.000	4.209,44	812,42	4 de 1000 e 1 de 500 kW	2 de 264 e 3 de 96
De 200.001 até 300.000	6.314,15	1.218,63	6 de 1000 e 1 de 500 kW	4 de 264 e 2 de 96 kW
De 300.001 até 400.000	8.418,87	1.624,84	8 de 1000 e 1 de 500 kW	6 de 264 e 1 de 96 kW
De 400.001 até 500.000	10.523,59	2.031,05	10 de 1000 e 1 de 500 kW	7 de 264 e 2 de 96 kW
500.001 ou mais	63.141,53	12.186,32	63 de 1000 kW e 1 de 500 kW	46 de 264 e 1 de 96 kW

Assim, o investimento, o custo de operação e manutenção, o VPL e a TIR para a gaseificação conforme o Cenário 4 - Alternativa 2 são dados na Tabela 4.19.

Tabela 4.19: Resultados da avaliação econômica da gaseificação conforme o Cenário C4 - A2

Faixa – intervalo	Investimento [R\$]	C o&M [R\$]	VPL [R\$]	TIR [%]
Até 5.000 habitantes	6.393.877,17	412.243,36	-8.132.972,52	-
De 5.001 até 10.000	6.393.877,17	412.243,36	-5.976.545,33	-
De 10.001 até 20.000	7.137.628,98	455.529,71	-2.816.480,22	-
De 20.001 até 50.000	13.678.037,60	885.216,69	-478.682,96	8,04%
De 50.001 até 100.000	21.801.318,17	1.405.540,90	8.045.468,22	13,29%
De 100.001 até 200.000	35.130.616,12	2.239.256,72	29.966.457,83	19,01%
De 200.001 até 300.000	46.358.153,60	2.935.790,94	55.285.515,18	22,82%
De 300.001 até 400.000	61.590.698,39	3.911.479,95	73.961.672,40	22,91%
De 400.001 até 500.000	78.921.546,51	5.007.804,29	89.399.574,20	22,16%
500.001 ou mais	441.313.213,57	27.960.850,81	588.325.077,39	24,38%

Conforme a Tabela 4.19, conclui-se que a gaseificação nas condições supostas no Cenário 4 - Alternativa 2 são viáveis para as faixas populacionais de 50.001 até 100.000 habitantes em diante, conforme o VPL positivo e a TIR superior à taxa de desconto.

Para a gaseificação da fração outros; reciclagem de papéis, vidros metais e plásticos e digestão anaeróbia da fração orgânica, conforme o Cenário 4 - Alternativa 3, o número de unidades de processamento primário é semelhante ao assumido no Cenário 4 - Alternativa 1 (Tabela 4.13). Na Tabela 4.20 é dado o número de unidades de tratamento mecânico em função da produção de CDR, conforme o Cenário 4 - Alternativa 3.

Tabela 4.20: Número de unidades de tratamento mecânico para a gaseificação conforme o Cenário C4 - A3

Faixa – intervalo	Produção CDR [kg/dia]	Tratamento Mecânico [t/h]	Número de Unidades
Até 5.000 habitantes	235,35	0,5	1 de 0,5 t/h
De 5.001 até 10.000	470,71	0,5	1 de 0,5 t/h
De 10.001 até 20.000	941,41	0,5	1 de 0,5 t/h
De 20.001 até 50.000	2.353,53	0,5	1 de 0,5 t/h
De 50.001 até 100.000	4.707,06	0,5	1 de 0,5 t/h
De 100.001 até 200.000	9.414,12	0,5	1 de 0,5 t/h
De 200.001 até 300.000	14.121,19	0,8	1 de 0,8 t/h
De 300.001 até 400.000	18.828,25	0,8	1 de 0,8t/h
De 400.001 até 500.000	23.535,31	1,0	1 de 1,0 t/h
500.001 ou mais	141.211,86	6,0	3 de 2,0 t/h

O número de unidades de gaseificação e de unidades geradoras é dado na Tabela 4.21, em função da potência térmica e da potência disponível (considerando a eficiência do equipamento).

Tabela 4.21: Número de unidades de gaseificação e de geração conforme o Cenário C4 - A3

Faixa – intervalo	Potência térmica [kW]	Potência inst [kW]	Unid. de gaseif. [kW]	Unid. Geradoras
Até 5.000 habitantes	33,09	7,83	1 de 500 kW	1 de 96 kW
De 5.001 até 10.000	66,18	15,67	1 de 500 kW	1 de 96 kW
De 10.001 até 20.000	132,36	31,33	1 de 500 kW	1 de 96 kW
De 20.001 até 50.000	330,91	78,33	1 de 5000 kW	1 de 96 kW
De 50.001 até 100.000	661,82	156,67	1 de 1000 kW	2 de 96 kW
De 100.001 até 200.000	1.323,64	313,34	1 de 1000 e 1 de 500 kW	1 de 264 e 1 de 96
De 200.001 até 300.000	1.985,46	470,00	2 de 1000 kW	2 de 264 kW
De 300.001 até 400.000	2.647,29	626,67	3 de 1000 kW	2 de 264 e 1 de 96 kW
De 400.001 até 500.000	3.309,11	783,34	3 de 1000 e 1 de 500 kW	3 de 264 kW
500.001 ou mais	19.854,64	4.700,03	20 de 1000 kW	18 de 264 kW

Com isso, pôde-se calcular o investimento, o custo de operação e manutenção, o VPL e a TIR. Os resultados dos cálculos econômicos para a gaseificação conforme o Cenário 4 - Alternativa 3 são dados na Tabela 4.22.

Tabela 4.22: Resultados da avaliação econômica da gaseificação conforme o Cenário C4 - A3

Faixa – intervalo	Investimento [R\$]	C o&M [R\$]	VPL [R\$]	TIR [%]
Até 5.000 habitantes	6.393.877,17	412.243,36	-8.318.842,19	-
De 5.001 até 10.000	6.393.877,17	412.243,36	-6.348.284,67	-
De 10.001 até 20.000	7.137.628,98	455.529,71	-3.559.958,88	-
De 20.001 até 50.000	12.315.650,35	805.925,75	-225.727,09	8,27%
De 50.001 até 100.000	18.123.164,66	1.191.472,36	10.029.084,05	15,52%
De 100.001 até 200.000	27.767.201,32	1.810.705,98	33.944.706,31	23,15%
De 200.001 até 300.000	35.443.879,98	2.300.580,21	61.567.504,94	28,96%
De 300.001 até 400.000	47.439.970,46	3.087.907,58	81.542.659,70	28,72%
De 400.001 até 500.000	60.825.223,58	3.954.598,30	99.562.099,15	27,83%
500.001 ou mais	328.637.279,11	21.403.111,42	655.584.752,44	31,74%

Assim como para o Cenário 4 - Alternativa 2, nas condições assumidas no Cenário 4 - Alternativa 3, conforme a Tabela 4.22, nota-se que ocorre a viabilidade econômica somente para as faixas populacionais de 50.001 até 100.000 habitantes em diante, conforme o VPL positivo e a TIR superior à taxa de desconto.

4.4.5 Avaliação econômica para o gás de aterro – Cenário 5

O número de drenos assumido conforme a capacidade do aterro é dado na Tabela 4.23.

Tabela 4.23: Número de drenos conforme a capacidade do aterro

Faixa – intervalo	Massa coletada [t/dia]	Classificação do aterro	Número de drenos
Até 5.000 habitantes	4,15	Pequeno	27
De 5.001 até 10.000	8,29	Pequeno	27
De 10.001 até 20.000	16,58	Pequeno	27
De 20.001 até 50.000	41,45	Pequeno	27
De 50.001 até 100.000	82,90	Pequeno	27
De 100.001 até 200.000	165,80	Médio	140
De 200.001 até 300.000	248,70	Médio	140
De 300.001 até 400.000	331,60	Médio	140
De 400.001 até 500.000	414,50	Médio	140
500.001 ou mais	2.487,00	Grande	262

Considerando-se os custos dos equipamentos dado na Tabela 3.14, obteve-se o valor do investimento. Na Tabela 4.24 é dada a potência disponível considerando-se a eficiência do motor de combustão interna, a energia gerada, o valor do investimento e o custo de operação e manutenção para cada faixa populacional.

Tabela 4.24: Potência, energia gerada, valor do investimento e o custo de operação e manutenção para o aproveitamento energético do gás de aterro – Cenário C5

Faixa – intervalo	Potência disponível [kW]	Produção de Energia anual [MWh]	Investimento [R\$]	C _{O&M} [R\$]
Até 5.000 habitantes	25,41	203,27	816.072,99	40.803,65
De 5.001 até 10.000	50,82	406,55	1.038.103,36	51.905,17
De 10.001 até 20.000	101,64	813,10	1.482.022,56	74.101,13
De 20.001 até 50.000	254,09	2032,74	2.814.204,80	140.710,24
De 50.001 até 100.000	508,19	4065,48	5.034.508,52	251.725,43
De 100.001 até 200.000	1.016,37	8130,97	9.717.500,24	485.875,01
De 200.001 até 300.000	1.524,56	12196,45	14.158.107,70	707.905,38
De 300.001 até 400.000	2.032,74	16261,94	18.598.715,15	929.935,76
De 400.001 até 500.000	2.540,93	20327,42	23.039.322,60	1.151.966,13
500.001 ou mais	15.245,57	121964,53	134.316.411,18	6.715.820,56

Com isso, o VPL e a TIR calculados para cada caso são mostrados na Tabela 4.25.

Tabela 4.25: Resultado da avaliação econômica com a gaseificação – Cenário C5

Faixa – intervalo	VPL [R\$]	TIR [%]
Até 5.000 habitantes	-788.064,55	-
De 5.001 até 10.000	-727.700,42	-
De 10.001 até 20.000	-606.769,99	-
De 20.001 até 50.000	-244.585,20	7,11%
De 50.001 até 100.000	359.056,13	9,64%
De 100.001 até 200.000	1.220.158,62	10,47%
De 200.001 até 300.000	2.427.441,28	11,16%
De 300.001 até 400.000	3.634.723,94	11,52%
De 400.001 até 500.000	4.842.006,59	11,47%
500.001 ou mais	34.650.016,61	12,44%

Neste caso, a recuperação de energia do gás de aterro seria viável nas faixas populacionais de 50.001 a 100.000 habitantes em diante, onde a TIR supera a taxa de desconto e o VPL é positivo.

4.5 Análise dos cenários

Conforme observado anteriormente o maior potencial energético foi obtido com o Cenário 3 – Alternativa 3, porém é preciso verificar a viabilidade para aplicação da tecnologia. A Tabela 4.26 destaca o potencial (geração elétrica anual para cada cenário, exceto para o Cenário 1 - referente a compostagem) e as faixas onde cada cenário apresentou viabilidade.

Tabela 4.26: Comparativo entre os potenciais de geração em cada cenário, com as faixas de viabilidade de aplicação

Faixa – intervalo	Energia elétrica gerada [MWh]							
	C2	C3 - A1	C3 - A2	C3 - A3	C4 - A1	C4 - A2	C4 - A3	C5
Até 5.000 habitantes	124,90	628,50	157,92	700,41	271,37	272,58	181,86	203,27
De 5.001 até 10.000	249,80	1.256,99	315,85	1.400,82	542,75	545,15	363,71	406,55
De 10.001 até 20.000	499,61	2.513,98	631,70	2.801,63	1.085,49	1.090,30	727,43	813,10
De 20.001 até 50.000	1.249,01	6.284,95	1.579,25	7.004,08	2.713,73	2.725,75	1.818,56	2.032,74
De 50.001 até 100.000	2.498,03	12.569,91	3.158,50	14.008,16	5.427,47	5.451,50	3.637,13	4.065,48
De 100.001 até 200.000	4.996,05	25.139,82	6.317,00	28.016,33	10.854,94	10.903,00	7.274,25	8.130,97
De 200.001 até 300.000	7.494,08	37.709,73	9.475,49	42.024,49	16.282,41	16.354,50	10.911,38	12.196,45
De 300.000 até 400.000	9.992,10	50.279,63	12.633,99	56.032,65	21.709,88	21.806,00	14.548,50	16.261,94
De 400.001 até 500.000	12.490,13	62.849,54	15.792,49	70.040,81	27.137,35	27.257,50	18.185,63	20.327,42
500.001 ou mais	74.940,75	377.097,25	94.754,95	420.244,88	162.824,09	163.545,02	109.113,76	121.964,53

Na faixa de até 20.000 habitantes, nota-se que não houve viabilidade de aplicação de nenhuma tecnologia de recuperação de energia. Os cenários C2 e C4 – A1 apresentaram maiores faixas de aplicação. A partir dos dados da Tabela 4.26, criou-se um “Cenário Viável”, no qual para cada faixa populacional onde foi verificada viabilidade de cada um dos cenários e tomado o maior valor de geração dentre os cenários viáveis em cada faixa.

A Tabela 4.27, mostra o Cenário Viável formado a partir do maior potencial viável dentre os cenários analisados em cada faixa, é indicado, também o potencial total em cada faixa a partir do número de municípios.

Tabela 4.27: Potencial para o cenário viável

Faixa – intervalo	Cenário viável Eletricidade [MWh/ano]	Número De municípios	Cenário viável Eletricidade total [MWh/ano]
Até 5.000 habitantes	-	233	-
De 5.001 até 10.000	-	243	-
De 10.001 até 20.000	-	193	-
De 20.001 até 50.000	2.713,73	113	306.652,04
De 50.001 até 100.000	5.451,50	39	212.608,53
De 100.001 até 200.000	10.903,00	19	207.157,02
De 200.001 até 300.000	42.024,49	5	924.538,78
De 300.000 até 400.000	56.032,65	2	112.065,30
De 400.001 até 500.000	70.040,81	2	280.163,24
500.001 ou mais	420.244,88	4	2.521.469,28

Assim, para a composição do cenário viável sob o critério de maior geração, seria necessário aplicar a Gaseificação de papel, matéria orgânica e plástico (Cenário 4 - Alternativa 1) em municípios com população entre 20.001 e 50.000 habitantes. A gaseificação de papel, plástico e rejeitos associada à digestão anaeróbia da fração orgânica (Cenário 4 - Alternativa 2) nas faixas populacionais de 50.001 a 100.000 habitantes e de 100.001 a 200.000 habitantes. Para populações acima de 200.001 habitantes deve-se aplicar a incineração de papéis e plásticos associada à digestão anaeróbia (Cenário 5) com o objetivo de se obter o maior potencial viável de acordo com a análise econômica realizada. Com isso, o cenário viável seria capaz de gerar uma energia elétrica total de 2.869.666 MWh anualmente, energia que atenderia ao consumo de 1.931.654 residências do estado.

A Figura 4.22 traz um comparativo entre os cenários, que foram ordenados conforme a geração total anual (do maior para o menor), sendo que com o Cenário C3 – A3 seria possível alcançar a máxima geração. O “Cenário Viável” é mostrado ao final com o percentual da geração máxima a que ele corresponde e com a contribuição dos cenários C3 – A3, C4 – A1 e C4 – A2 em termos percentuais.

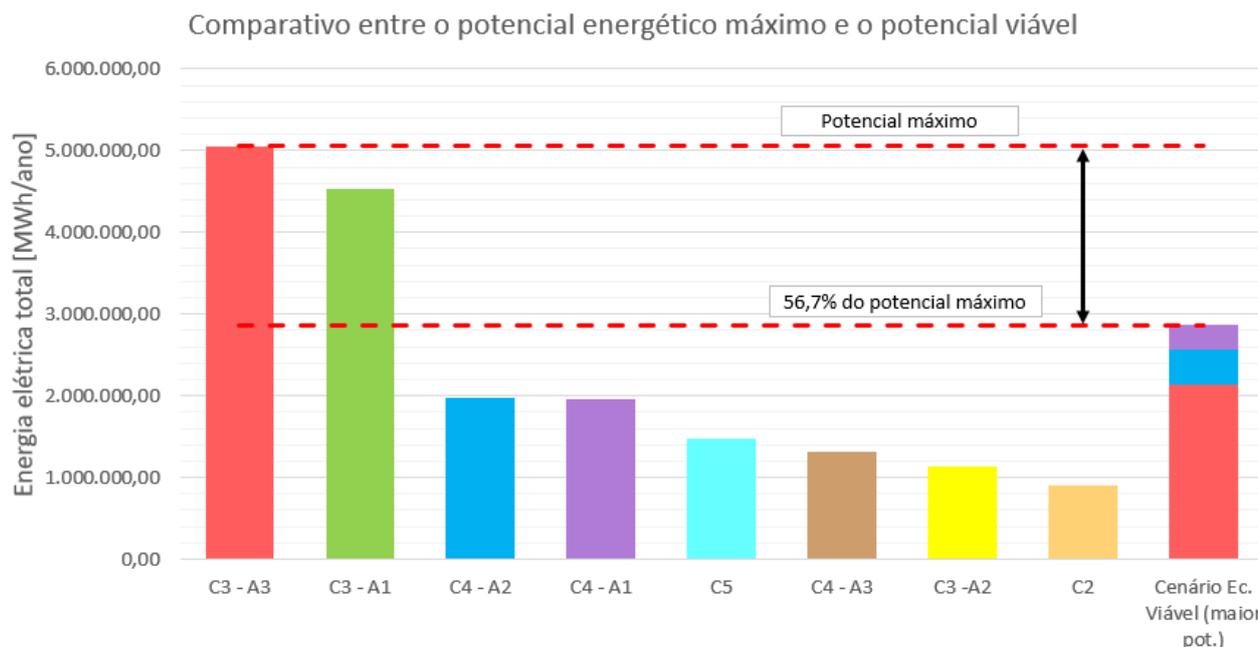


Figura 4.22: Comparativo entre os potenciais totais de cada cenário e cenário viável.

Assim, seria economicamente viável gerar 56,7 % do potencial máximo possível para o estado. Essa diferença se deve a diferença entre as frações de resíduos utilizadas em cada cenário com diferentes tecnologias, da eficiência de conversão energética em cada caso e, ainda ao fato de não ser viável a geração em municípios de até 20.000 habitantes com nenhuma das tecnologias analisadas, isto tem um impacto significativo já que são 669 o número de municípios com população de até 20.000 habitantes (IBGE, 2018). Nesta faixa seria possível tratar os resíduos com a compostagem e promovendo a reciclagem.

4.6 Modelos para aplicação da economia circular

Conforme analisado na Seção 3.7 os cenários mais favoráveis à aplicação da economia circular ao tratamento dos resíduos seriam: C1, C2, C3 – A2, e C4 – A3. Com isso, foram elaborados modelos para a gestão dos resíduos com base nesses cenários. Os cenários C3 – A3 e C4 – A2 poderiam ser aplicados em um contexto de economia circular, mas em casos específicos.

A Figura 4.23 traz um modelo que leva em conta a aplicação da economia circular com o uso da compostagem associada à reciclagem, conforme as considerações já assumidas nas seções anteriores.

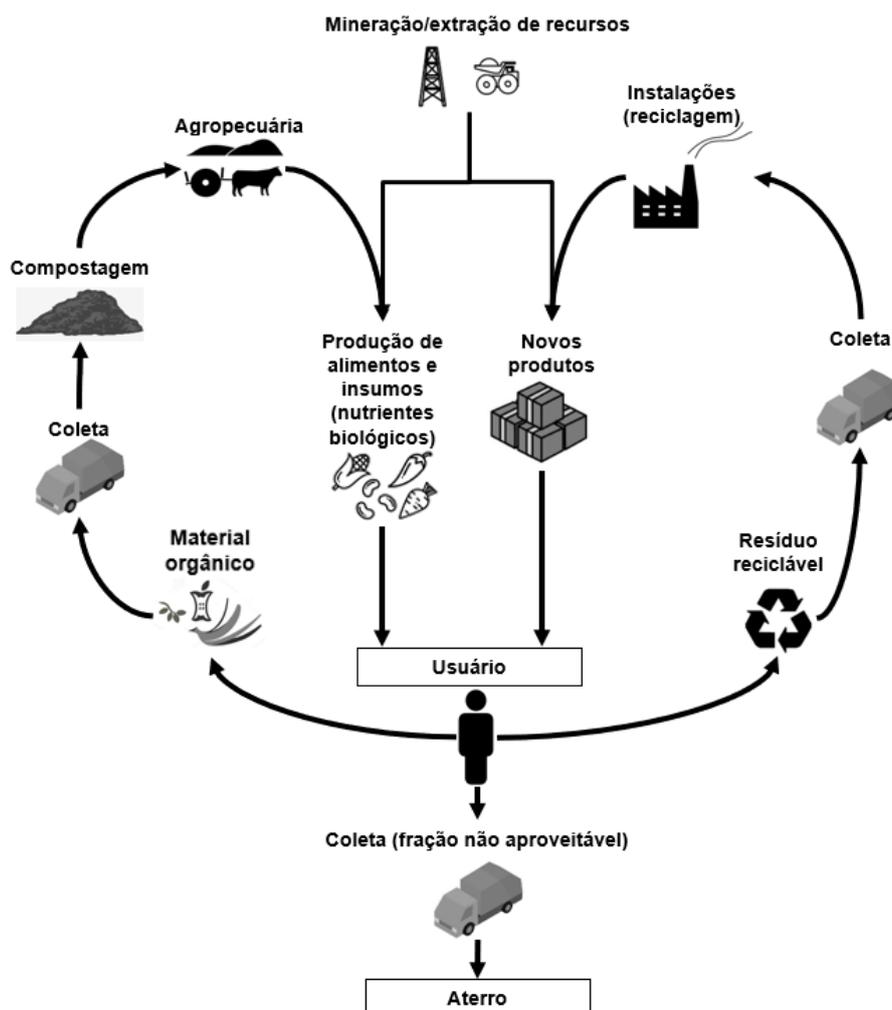


Figura 4.23: Modelo de economia circular com compostagem e reciclagem do RSU.

Para o modelo mostrado na Figura 4.23, seria viável a aplicação em qualquer uma das faixas populacionais. A vantagem deste tratamento é que permite a associação à reciclagem, além de provocar redução no volume de resíduos depositados em aterros. Outra vantagem seria quanto aos benefícios pela geração de composto que pode ser utilizado em solos empobrecidos, o que auxilia na produção de alimentos.

A Figura 4.24 traz o modelo com a utilização da digestão anaeróbia associada à reciclagem, conforme as considerações feitas no Cenário 2.

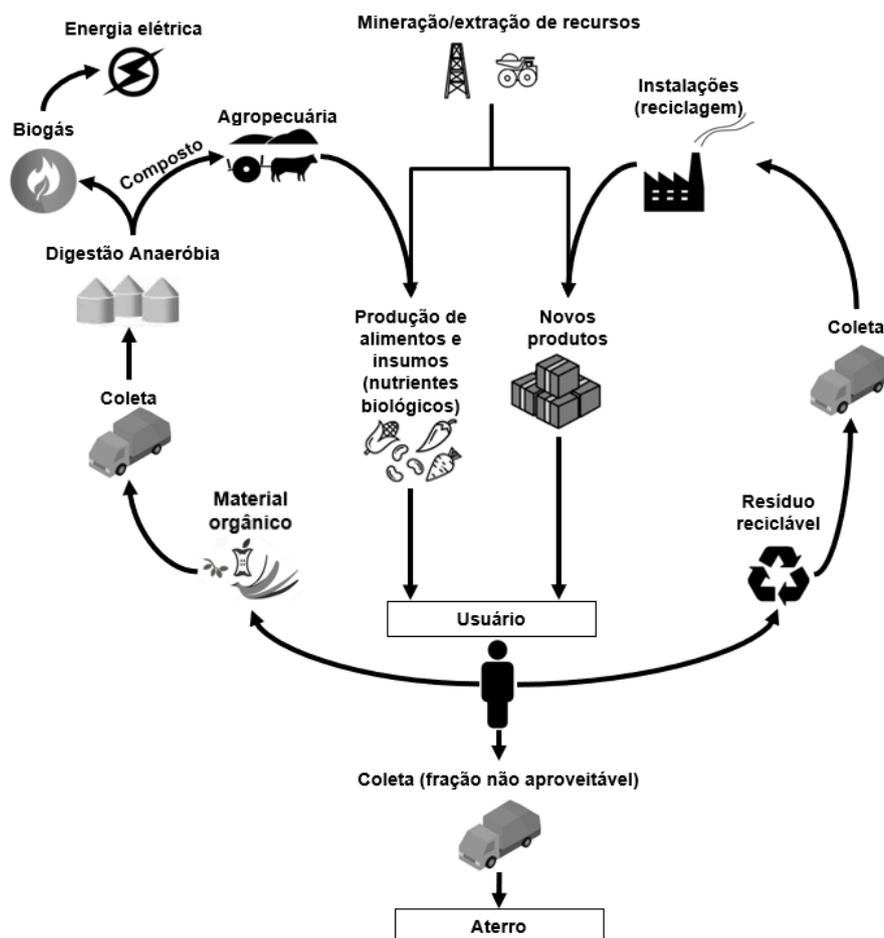


Figura 4.24: Modelo para economia circular com digestão anaeróbia e reciclagem do RSU.

No modelo mostrado na Figura 4.24 seria possível gerar energia e, também, composto para aplicação em solo, a partir da matéria orgânica, com a reciclagem, pode-se alcançar, portanto uma redução no volume de aterro, cumprindo-se a função de uma gestão voltada a economia circular. Este seria o caso apresentado no Cenário 2, que encontra viabilidade econômica para implantação em municípios com populações superiores a 20.000 habitantes, conforme as condições assumidas.

A Figura 4.25 mostra um modelo geral para associação entre tecnologias de tratamento biológico e térmico. Neste caso, poderia ser associada a compostagem (rota biológica) à incineração ou a gaseificação conforme a Figura 4.25 a. ou, ainda, a digestão anaeróbia à incineração ou à compostagem, conforme a Figura 4.25 b., vale lembrar que estas tecnologias podem competir com a reciclagem, por exemplo, e em alguns casos só seriam recomendadas em um esquema com economia circular caso não fosse possível priorizar a reciclagem conforme Malinauskaite et al. (2017) destacou em seu trabalho.

Os cenários C3 – A2 e C3 – A3 estariam representados conforme a Figura 4.25 b., porém, estes cenários consideram diferentes frações do RSU sendo submetidos à reciclagem e à incineração. Onde no Cenário C3 – A2 é priorizada a reciclagem, com menor geração de energia.

Os Cenários C4 – A2 e C4 – A3 estabelecidos anteriormente também poderiam ser representados conforme a Figura 4.25 b., somente trocando-se a opção de incineração pela gaseificação, que ocupam a mesma ordem de prioridade no contexto de economia circular.

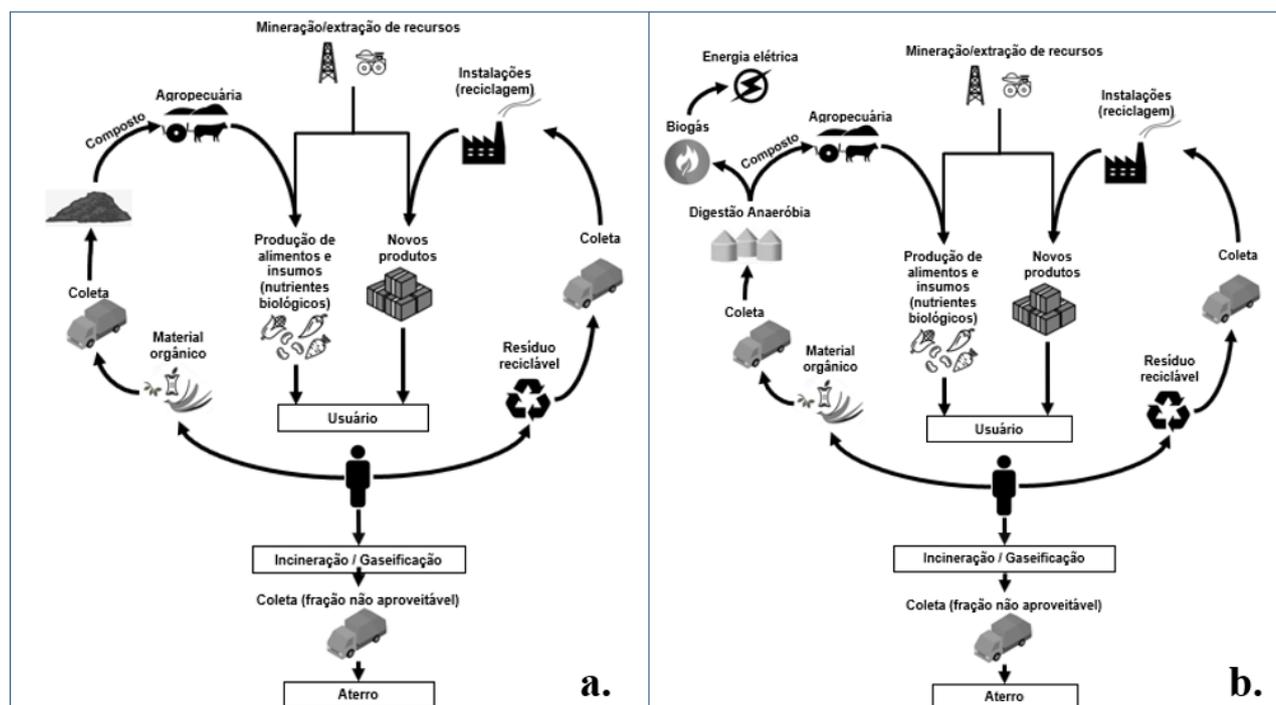


Figura 4.25: Modelo com associação de tecnologias de tratamento térmico e biológico de RSU. a. associação com a compostagem; b. associação com a digestão anaeróbia.

Conforme a avaliação econômica realizada, tem-se que a incineração encontraria maiores restrições para a aplicação, uma vez que a sua viabilidade econômica ocorre em municípios de maior porte. Com isso, a gaseificação poderia ser uma solução para o tratamento de determinadas frações do RSU, já que apresentou viabilidade de aplicação em municípios de menor porte.

O modelo da Figura 4.25 b., com a incineração, seria possível aplicar em municípios de população superior a 200.000 habitantes, caso fossem assumidas as condições do Cenário C3 – A3. O mesmo modelo, porém com uso da gaseificação, poderia ser aplicado em municípios com população superior a 50.000 habitantes, caso assumidas as condições dos cenários C4 – A2 e C4 – A3.

4.7 Análise dos cenários com base na economia circular

Com o objetivo de avaliar a aplicação dos cenários no contexto da economia circular, a Figura 4.26 foi elaborado para comparação das alternativas do ponto de vista da redução no volume depositado em aterro, onde é mostrado o “Cenário economicamente viável”, que foi assumido anteriormente como o somatório dos potenciais energéticos máximos viáveis. No Cenário 5 seria recebida à quantidade total de resíduos, indicado como 100.

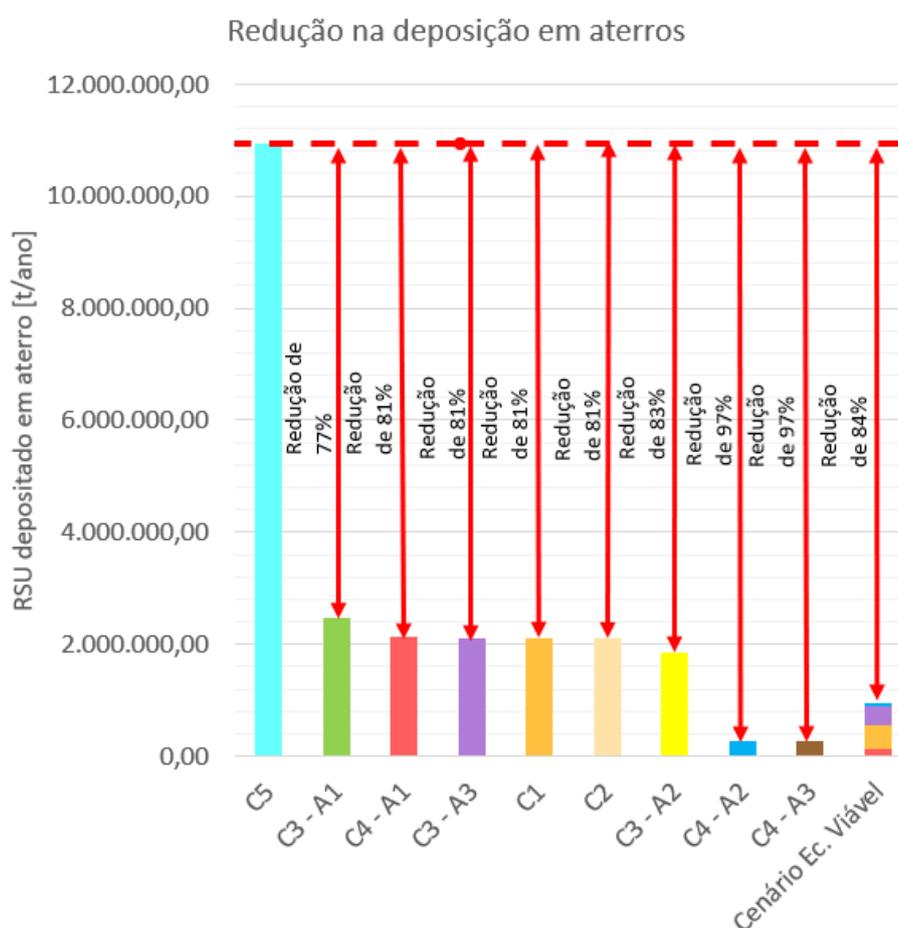


Figura 4.26: Comparativo entre da redução máxima possível para cada cenário.

A Figura 4.26 mostra uma redução máxima alcançada com cada cenário, contudo, sabe-se que grandes níveis de reciclagem são um desafio, sabe-se que o Brasil recicla apenas 2% de seus resíduos, apesar de alcançar grandes taxas reciclagem em alguns materiais, como latas de alumínio com 98 % sendo recicladas (BANCO MUNDIAL, 2018).

Para o cenário de máxima geração viável (“Cenário Ec. Viável”) foi possível alcançar uma redução na quantidade de RSU depositada de 84,2%, o que apresentaria uma boa redução, contudo cabe analisar se este cenário seria o mais viável visando o desenvolvimento da economia circular.

Se considerada a meta de redução no depósito em aterro como o caso mais viável, levando-se em conta a viabilidade econômica dos cenários, a redução máxima alcançada é dada conforme a Figura 4.27. O cenário mais viável para a redução do volume nos aterros é dado na Tabela 4.28.

Tabela 4.28: Cenário mais viável para a redução na disposição em aterros

Faixa populacional	Cenário selecionado	Depósito em aterro [t/ano]	Número de municípios	Total depositado em aterro [t/ano]
Até 5.000 habitantes	Cenário 1	290,48	233	67.682,21
De 5.001 até 10.000	Cenário 1	580,96	243	141.174,06
De 10.001 até 20.000	Cenário 1	1.161,93	193	224.251,80
De 20.001 até 50.000	Cenário 2	2.904,82	113	328.244,21
De 50.001 até 100.000	Cenário 4 - Alternativa 2	786,72	39	30.682,12
De 100.001 até 200.000	Cenário 4 - Alternativa 2	1.573,44	19	29.895,40
De 200.001 até 300.000	Cenário 4 - Alternativa 2	2.360,16	5	11.800,82
De 300.000 até 400.000	Cenário 4 - Alternativa 2	3.146,88	2	6.293,77
De 400.001 até 500.000	Cenário 4 - Alternativa 2	3.933,61	2	7.867,21
500.001 ou mais	Cenário 4 - Alternativa 2	23.601,63	4	94.406,52

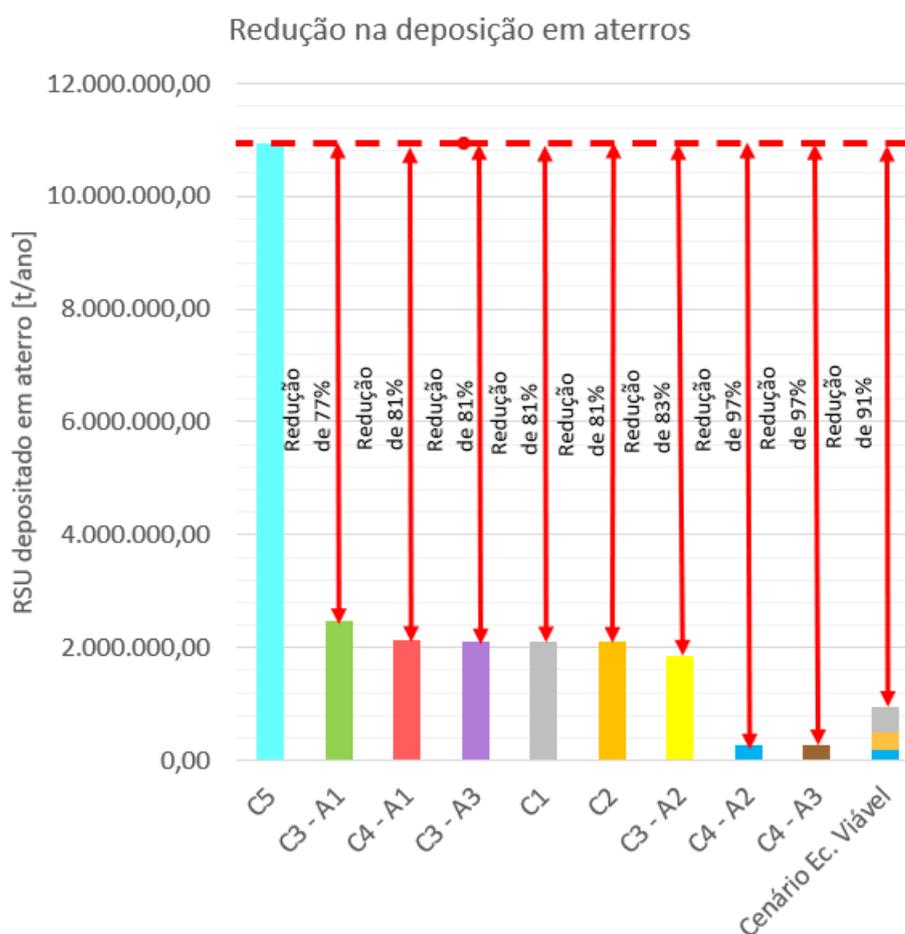


Figura 4.27: Redução no depósito em aterro com o cenário de viável de maior redução.

Neste caso, seria possível reduzir até 93% dos resíduos em aterro, porém, a geração de energia elétrica que era de 2.869.666 MWh ao ano, suficiente para atender ao consumo de 1.931.654 residências, passaria a ser de 1.067.893 MWh /ano, sendo capaz de abastecer 718.829 residências com energia elétrica, cerca de 2 vezes menos do que para o cenário viável visando a máxima geração de energia elétrica.

4.8 Análise de emissões evitadas

Para estimar as emissões evitadas, assumiu-se, conforme mencionado anteriormente a condição de envio dos resíduos para aterro, onde ocorra a recuperação do gás com queima em *flare*. As emissões obtidas com o WARM para o caso base são dadas na Tabela 4.29.

Tabela 4.29: Emissões para o Caso Base

Faixa - população	Número de municípios	Emissão [MtCO₂eq/ano]	Total [MtCO₂eq/ano]
Até 5.000 habitantes	233	343,60	80.058,80
De 5.001 até 10.000	243	693,32	168.476,76
De 10.001 até 20.000	193	1.386,64	267.621,52
De 20.001 até 50.000	113	3.466,60	391.725,80
De 50.001 até 100.000	39	6.933,20	270.394,80
De 100.001 até 200.000	19	13.866,40	263.461,60
De 200.001 até 300.000	5	20.799,60	103.998,00
De 300.001 até 400.000	2	27.732,80	55.465,60
De 400.001 até 500.000	2	34.666,00	69.332,00
500.001 ou mais	4	207.996,00	831.984,00
		Total	2.502.518,88

Conforme a Tabela 4.29, as emissões do caso base seriam de aproximadamente 2.502.518 MtCO₂eq ao ano, consideradas as emissões em cada faixa populacional e o número de municípios em cada caso. Assim, as emissões evitadas totais foram obtidas subtraindo-se a emissão do caso base das emissões indicadas para cada cenário. O resultado das emissões totais evitadas com cada cenário é dado na Figura 4.28.

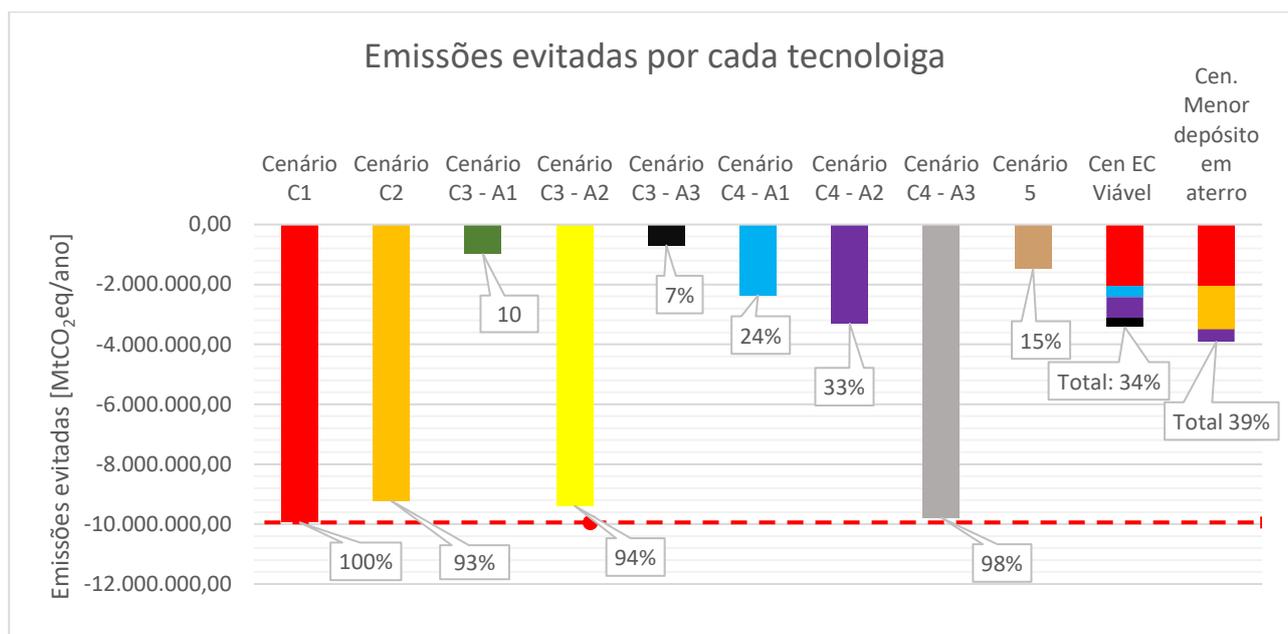


Figura 4.28: Gráfico de emissões evitadas em cada cenário.

Pela Figura 4.28 tem-se, os valores de emissões evitadas negativos, o que indica que todos os cenários supostos reduzem emissões com relação a utilização do “caso base”. Pelo gráfico tem-se, então, que o Cenário 1 possibilita a máxima redução de emissões, indicada com o valor de 100%, ou seja, se fosse utilizada a compostagem em todos os municípios do estado seria possível alcançar um nível máximo de emissões evitadas. O Cenário 2 apresentou um bom nível de emissões evitadas alcançando 93% do valor máximo que é obtido com o Cenário 1. O Cenário C3 – A1, com a incineração e reciclagem de uma pequena fração do RSU, alcançaria apenas 10% do valor de máxima emissão evitada. O Cenário C3 – A2, assim como o Cenário 2 apresentou boa possibilidade para redução das emissões, alcançando 94% do valor máximo possível.

O Cenário C3 – A3, foi o que apresentou maior geração de energia e se mostrou viável economicamente para aplicação em determinadas faixas de população, porém, foi o cenário que alcançou menor emissão evitada, com apenas 7% do que poderia ser alcançado no Cenário 1.

Os Cenários C4 – A1 e C4 – A2 alcançaram, respectivamente, 24 e 33% das emissões que poderiam ser evitadas. Com o Cenário C4 – A3 seria possível enviar uma quantidade mínima de RSU para aterro, além disso, o benefício de evitar emissões seria mais próximo ao nível máximo (98%), o que indica que a gaseificação da fração outros apresenta-se como uma boa alternativa do ponto de vista ambiental, além disso, pode ser aliada à digestão anaeróbia para complementar a geração de energia. A recuperação de energia elétrica com o gás de aterro é capaz de reduzir emissões, porém se comparada com alternativas que priorizam a reciclagem, assim, com o Cenário 5 pode-se alcançar apenas 15% da emissão evitada máxima.

Com a utilização das tecnologias de maior geração de energia e que são economicamente viáveis, ou seja, cenário economicamente viável de maior geração (“Cen EC viável” do gráfico da Figura 4.28), seria possível alcançar o 34% das emissões evitadas máximas. Neste cenário a compostagem contribuiu significativamente para redução das emissões, ao ser aplicada nos municípios com população de até 20.000 habitantes.

O Cenário de menor depósito em aterro, mostrado na Figura 4.27, ou seja, o cenário que utiliza as alternativas viáveis e que depositam menores quantidades em aterro alcançaria 39% das emissões evitadas possíveis. Isso permite notar que não basta que haja redução nas quantidades depositadas em aterro para se obter redução nas emissões de CO₂eq, as alternativas de tratamento são determinantes para o resultado. Os cenários C2 e C1, neste caso, contribuíram significativamente para a redução das emissões neste cenário, porém o Cenário C4 – A2 ao ser aplicado nos municípios com população acima de 50.000 habitantes não foi capaz de contribuir de maneira significativa com as emissões evitadas. Vale lembrar que a fração reciclada utilizada em C4 – A2 foi baixa.

De maneira geral, percebe-se que os cenários que consideraram a reciclagem de papel e plástico, obtiveram maiores níveis de emissões evitadas, ou seja, os cenários C1, C2, C3 – A2, e C4 – A3, que são, também, aqueles que se mostram mais adequados no contexto da economia circular. Como todos os cenários consideraram a reciclagem de 50% de metais e 50% do total de vidros gerados, com exceção do Cenário 5, o que permite verificar que a reciclagem de papéis e plásticos tem grande importância quanto aspecto ambiental ao evitar emissões de forma significativa.

4. 9 Análises para o caso de implantação de consórcios

Após feitas todas as análises para os municípios classificados em faixas populacionais, procedeu-se às análises para o caso onde fosse viabilizada a implantação de consórcios no estado. Supondo-se a formação de consórcios em todo o estado de conforme as microrregiões do estado, obteve-se o potencial para os mesmos cenários, assumidos para os municípios.

A Figura 4.29 mostra a distribuição do potencial no estado com a aplicação do Cenário 2.

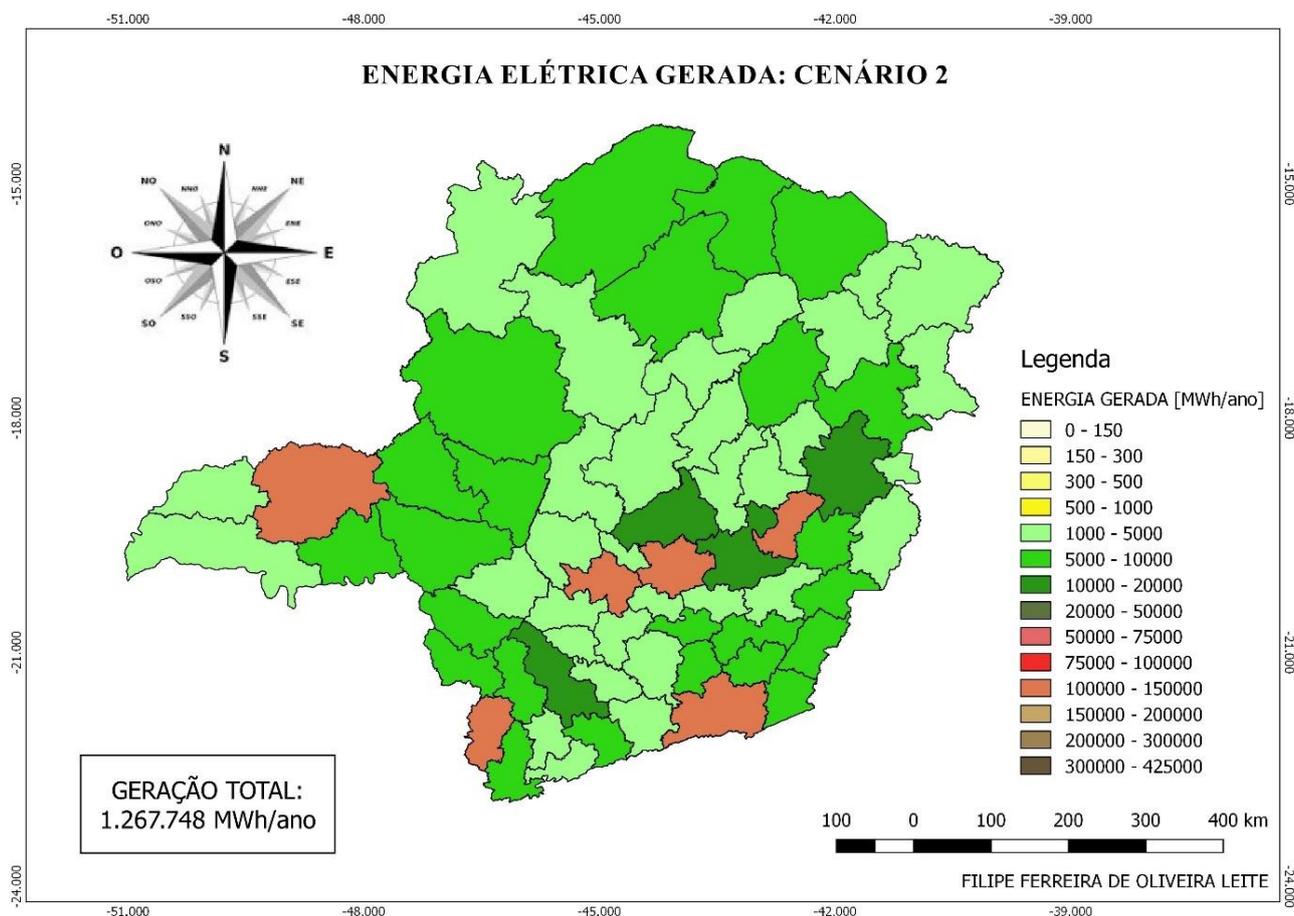


Figura 4.29: Geração de energia elétrica anual para o Cenário C2 com a aplicação de consórcios.

Conforme a Figura 4.29, tem-se que os maiores potenciais estariam nas microrregiões de Uberlândia, Divinópolis, Belo Horizonte, Poços de Caldas, Juiz de Fora e Ipatinga (conforme o mapa e a lista de microrregiões das Figuras 3.13 e 3.14, respectivamente), que apresentaram uma geração elétrica entre 100.000 e 150.000 MWh ao ano. As microrregiões com menor potencial energético apresentaram uma geração elétrica anual na faixa entre 1.000 e 5.000 MWh. No total, com este cenário, seria possível gerar 1.267.748 MWh/ano, o suficiente para atender ao consumo de energia elétrica anual de 853.357 residências do estado. A energia elétrica é superior àquela gerada com os municípios utilizando a tecnologia de forma isolada. Porém, não é possível afirmar somente a partir desta análise que com a prática de consórcios o potencial tende a ser maior, pois o ideal seria realizar uma projeção populacional para cada uma das regiões ou municípios para que se pudesse obter uma aproximação mais real do potencial em cada caso.

As Figuras 4.30, 4.31 e 4.32 trazem os resultados do potencial de geração elétrica para os cenários que utilizam a incineração para o tratamento do RSU. Na Figura 4.30 tem-se o potencial para o Cenário C3 – A1 nas microrregiões.

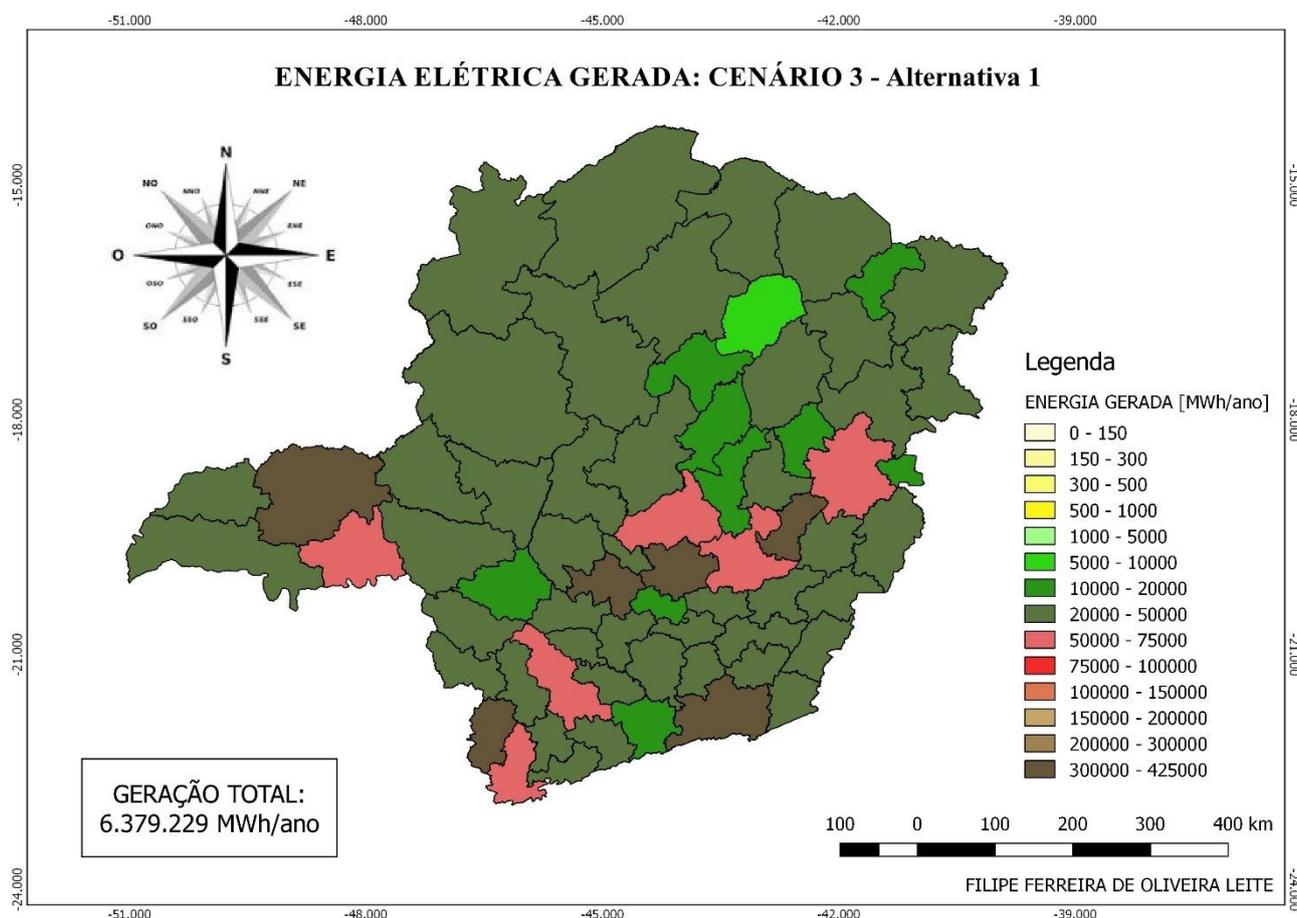


Figura 4.30: Geração de energia elétrica anual para o C3 – A1 com a aplicação de consórcios.

Na Figura 4.30, tem-se que os maiores potenciais de geração de eletricidade estariam entre 300.000 e 425.000 MWh ao ano. O maior potencial seria para as microrregiões de Uberlândia, Poços de Caldas, Divinópolis, Belo Horizonte, Juiz de Fora e Ipatinga, seguidos de Uberaba, Pouso Alegre, Varginha Sete Lagoas, Itabira e Governador Valadares (vide Figuras 3.13 e 3.14), estas com potencial para geração elétrica entre 50.000 e 75.000 MWh ao ano. A microrregião de Grão Mogol, apresentou o menor potencial energético, com uma geração elétrica anual na faixa entre 5.000 e 10.000 MWh.

Com isso, conforme a Figura 4.30, tem-se um potencial energético mais elevado comparado ao Cenário 2. No total, com este cenário, seria possível gerar 6.379.229 MWh ao ano, o suficiente para atender ao consumo de energia elétrica de 4.294.041 residências do estado por um ano.

A Figura 4.31 apresenta o potencial energético para o Cenário 3 – Alternativa 2, que utiliza a incineração das frações de madeira, têxteis e couro associada à digestão anaeróbia

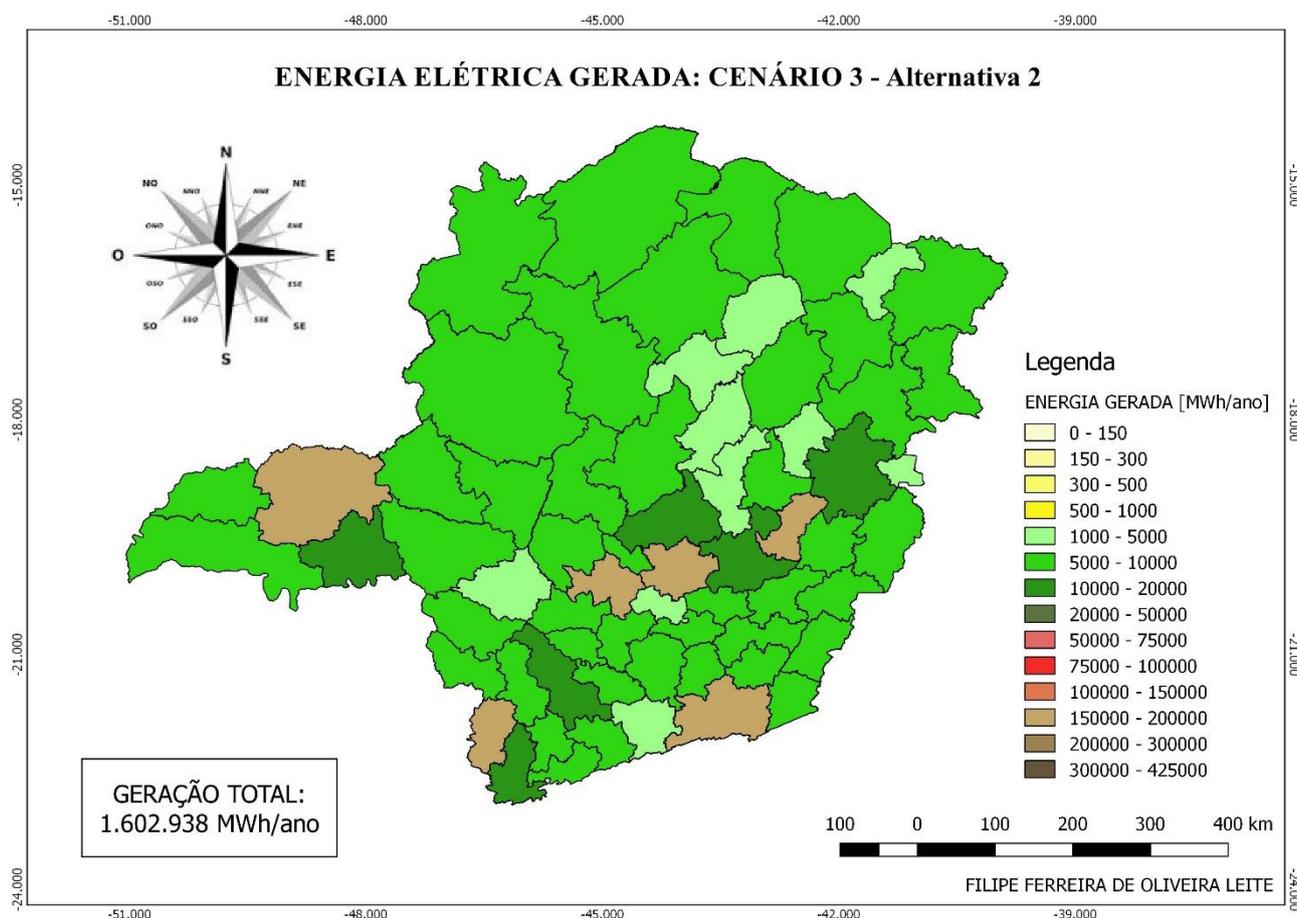


Figura 4.31: Geração de energia elétrica anual para o Cenário C3 – A2 com a aplicação de consórcios.

Com o Cenário 3 – Alternativa 2, as microrregiões que apresentaram maior potencial para geração elétrica alcançariam a faixa entre 150.000 e 200.000 MWh ao ano. A menor geração elétrica neste cenário estaria na faixa de 1.000 a 5.000 MWh ao ano para as microrregiões de Pedra Azul, Grão Mogol, Bocaiúva, Diamantina, Conceição do Mato Dentro, Peçanha, Mantena, Itaguara, Piumhi e Andrelândia (vide Figuras 3.13 e 3.14). A geração total de energia elétrica neste cenário seria de 1.602.938 MWh/ano, que poderia atender ao consumo de energia elétrica de 1.078.983 residências do estado de Minas Gerais durante um ano.

Neste cenário, ou seja, com a associação da incineração de uma pequena fração dos resíduos associada à digestão anaeróbia, tem-se uma geração inferior ao Cenário 3 – Alternativa 1 (incineração de uma maior fração de resíduos), porém superior ao Cenário 2 (somente com a digestão anaeróbia)

O terceiro cenário com a utilização da incineração analisado é mostrado na 4.32 (Cenário 3 – Alternativa 3). Neste cenário é considerada a incineração de papel e plástico associada à digestão anaeróbia.

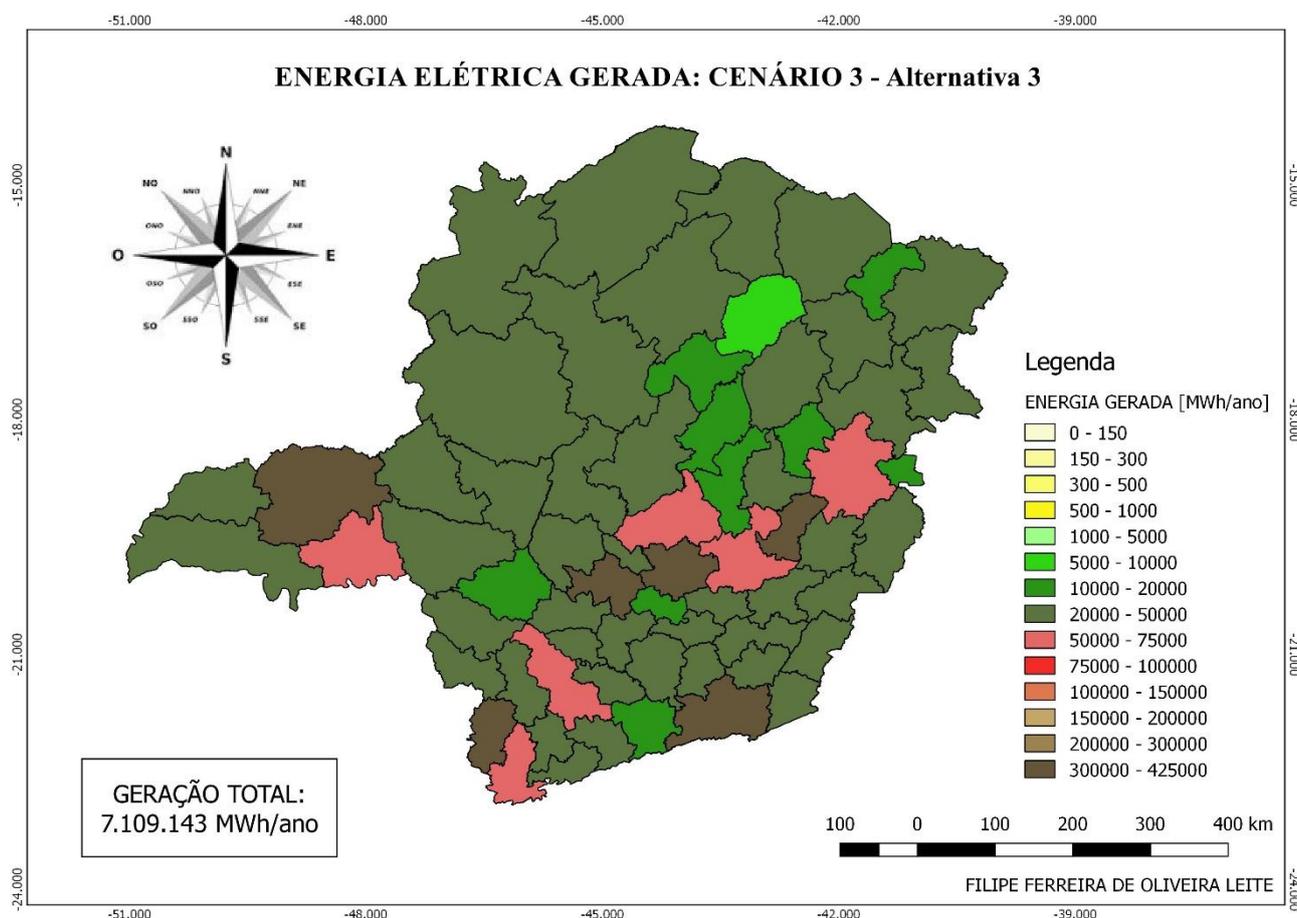


Figura 4.32: Geração de energia elétrica anual para o Cenário C3-A3 com a aplicação de consórcios.

Conforme a Figura 4.32, nota-se que o mapa do Cenário 3 – Alternativa3 (Figura 4.3a) é semelhante ao mapa do Cenário 3 – Alternativa 1, os valores para geração de energia elétrica máxima e mínima se encontram na mesma faixa nos dois mapas. Assim, O maior potencial seria para as microrregiões de Uberlândia, Poços de Caldas, Divinópolis, Belo Horizonte, Juiz de Fora e Ipatinga, seguidos de Uberaba, Pouso Alegre, Varginha Sete Lagoas, Itabira e Governador Valadares. Contudo, os potenciais calculados, para cada faixa populacional foram ligeiramente maiores para o Cenário 3 – Alternativa 3 e isto resultou em um maior potencial total. Neste cenário tem-se uma maior geração comparado as demais alternativas que utilizam a incineração do RSU sendo possível gerar 7.109.143 MWh/ano, que pode atender ao consumo de energia elétrica anual de cerca de 4.785.367 residências do estado de Minas Gerais.

As Figuras 4.33, 4.34 e 4.35 apresentam os resultados para os potenciais de geração de energia elétrica anual com a utilização da gaseificação. Na Figura 4.33 tem-se o potencial com a aplicação do Cenário 4 - Alternativa 1, com a gaseificação das frações de matéria orgânica, papel e plástico.

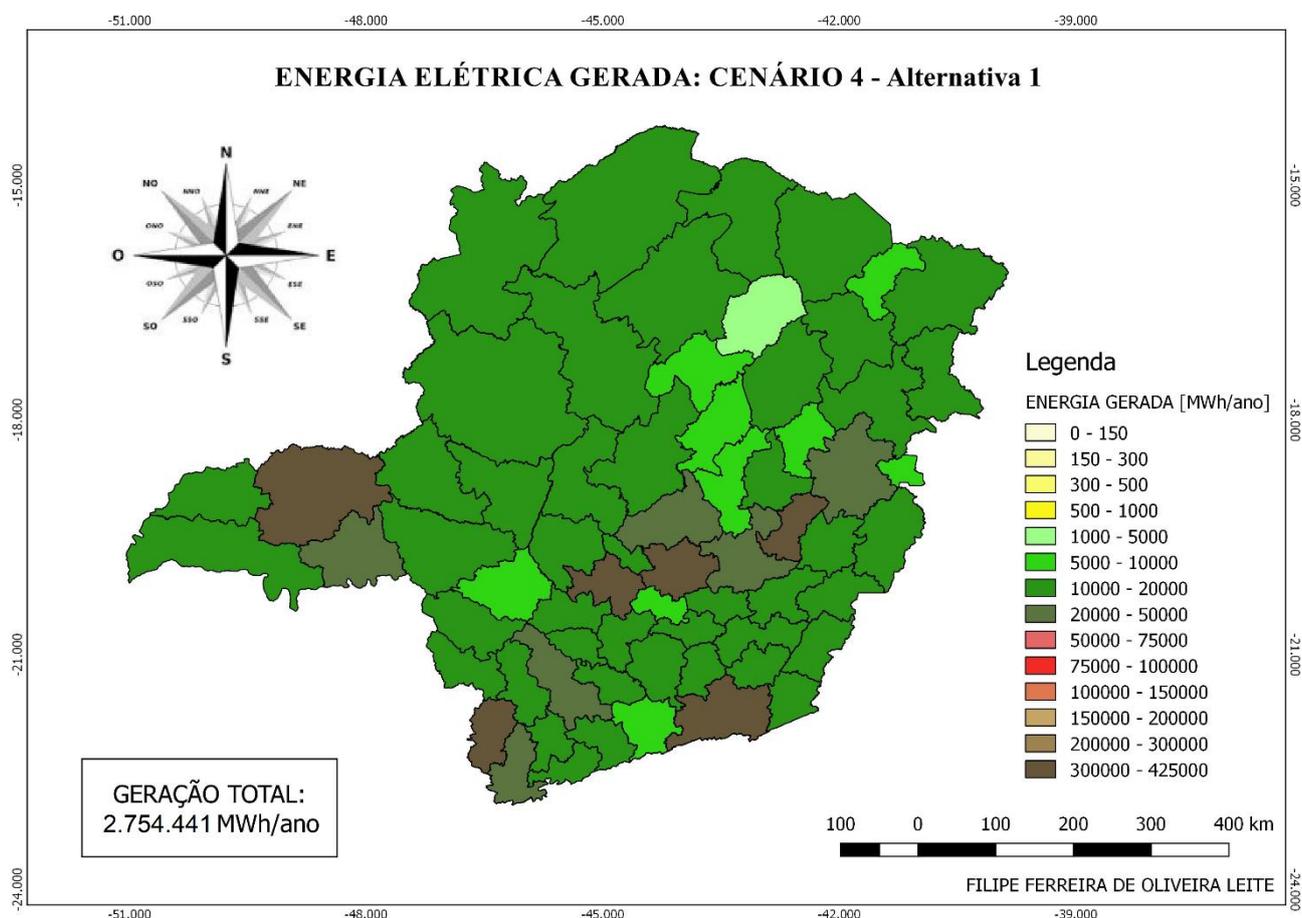


Figura 4.33: Geração de energia elétrica anual para o Cenário C4 - A1 com a aplicação de consórcios.

No cenário da Figura 4.33 tem-se o menor potencial na microrregião de Grão Mogol que aparece na faixa entre 1.000 e 5.000 MWh de energia elétrica ao ano. A maior geração elétrica verificada estaria na faixa entre 300.000 e 425.000 MWh ao ano, observada, com o auxílio das Figuras 3.13 e 3.14, nas microrregiões de Uberlândia, Poços de Caldas, Divinópolis, Belo Horizonte, Juiz de Fora e Ipatinga. Neste caso, a geração de energia elétrica total seria de 2.754.441 MWh ao ano que seria capaz de atender ao consumo anual de eletricidade de 1.854.093 residências do estado de Minas Gerais.

A Figura 4.34 apresenta a distribuição do potencial para geração de energia elétrica com o Cenário 4 - Alternativa 2, com a gaseificação das frações de papel, plástico e “outros” associada à digestão anaeróbia.

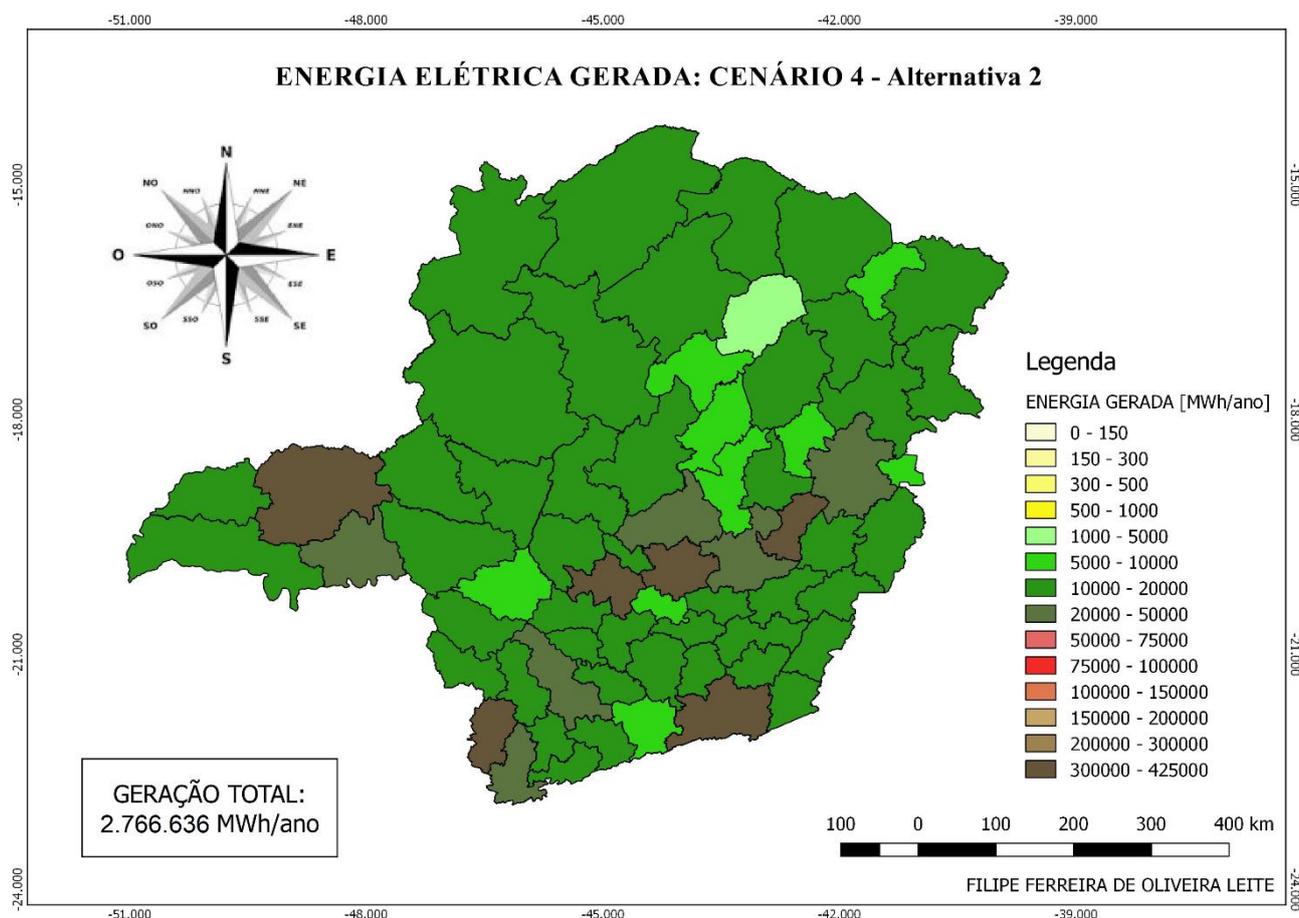


Figura 4.34: Geração de energia elétrica anual para o Cenário 4 - Alternativa 2 com a aplicação de consórcios.

Para o Cenário 4 – Alternativa 2 tem-se um potencial semelhante ao observado no Cenário 4 – Alternativa 1, onde é possível verificar um valor um pouco superior para a segunda alternativa analisada com a utilização da gaseificação. Tem-se as faixas de geração elétrica concentradas nos mesmos intervalos, conforme mostrado nas Figuras 4.33 e 4.34, ou seja, com o menor potencial verificado na microrregião de Grão Mogol, que aparece na faixa entre 1.000 e 5.000 MWh de energia elétrica ao ano. A maior geração elétrica é verificada na faixa entre 300.000 e 425.000 MWh ao ano.

Conforme o Cenário 4 - Alternativa 2, seria possível gerar energia elétrica para atender 1.862.302 residências do estado durante um ano, haja visto a geração elétrica total anual de 2.766.636 MWh. Neste caso, a diferença entre os cenários C4-A1 e C4-A2 seria de 8.209 residências a mais que poderiam ser atendidas com a eletricidade gerada no segundo caso, ou seja, para o Cenário C4 – A2 seriam gerados 12.195 MWh a mais em eletricidade ao ano em comparação ao Cenário C4 – A1.

O terceiro cenário avaliado com a utilização da gaseificação consiste na utilização da tecnologia para o tratamento da fração “outros” associado à digestão anaeróbia e seu potencial para geração elétrica anual, para o caso da aplicação de consórcios, é apresentado na Figura 4.35.

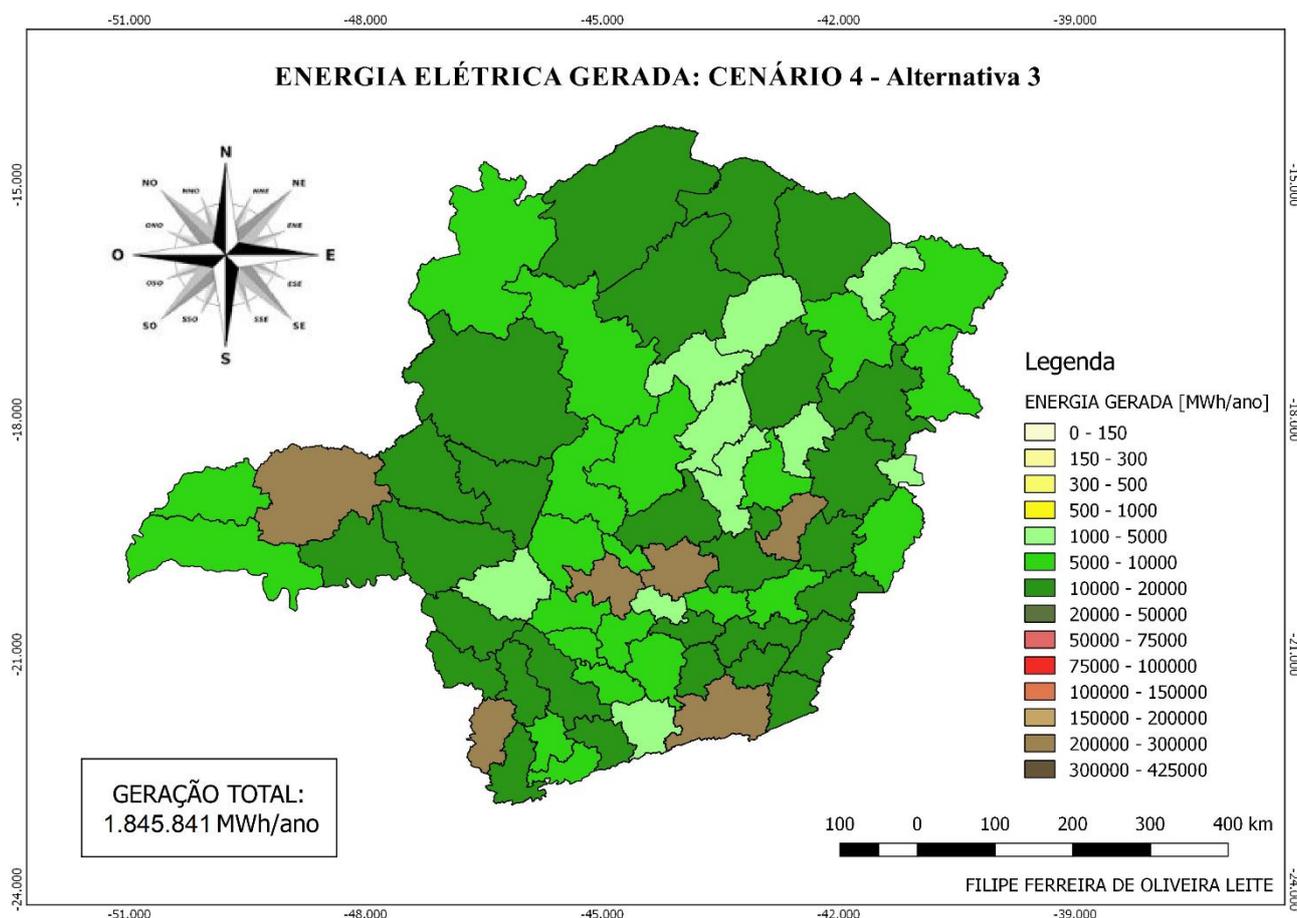


Figura 4.35: Geração de energia elétrica anual para o Cenário C4 - A3 com a aplicação de consórcios.

No Cenário 4 – Alternativa 3 tem-se um potencial menor do que os observados no Cenário 4 – Alternativa 1 e Cenário 4 – Alternativa 2. As microrregiões de Uberlândia, Poços de Caldas, Divinópolis, Belo Horizonte, Juiz de Fora e Ipatinga, seguidos de Uberaba, Pouso Alegre, Varginha Sete Lagoas, Itabira e Governador Valadares (vide Figuras 3.13 e 3.14), que apresentariam o maior potencial para geração elétrica, estariam na faixa entre 200.000 e 300.000 MWh gerados anualmente. A menor geração elétrica observada se encontra na faixa de 1.000 a 5.000 MWh ao ano, para as microrregiões de Pedra Azul, Grão Mogol, Bocaiúva, Diamantina, Conceição do Mato Dentro, Peçanha, Mantena, Itaguara, Piumhi e Andrelândia.

Desta forma com os potenciais calculados em função das populações das microrregiões, tem-se que a geração elétrica anual seria de 1.845.841 MWh para o Cenário 4 – Alternativa 3 e, assim, poderia atender ao consumo de eletricidade de 1.242.488 residências do estado durante um ano.

O último cenário a ser analisado consiste no aproveitamento energético do gás gerado em aterro. Com isso, para a utilização de consórcios, a geração de energia elétrica a partir do biogás de aterro é mostrada na Figura 4.36.

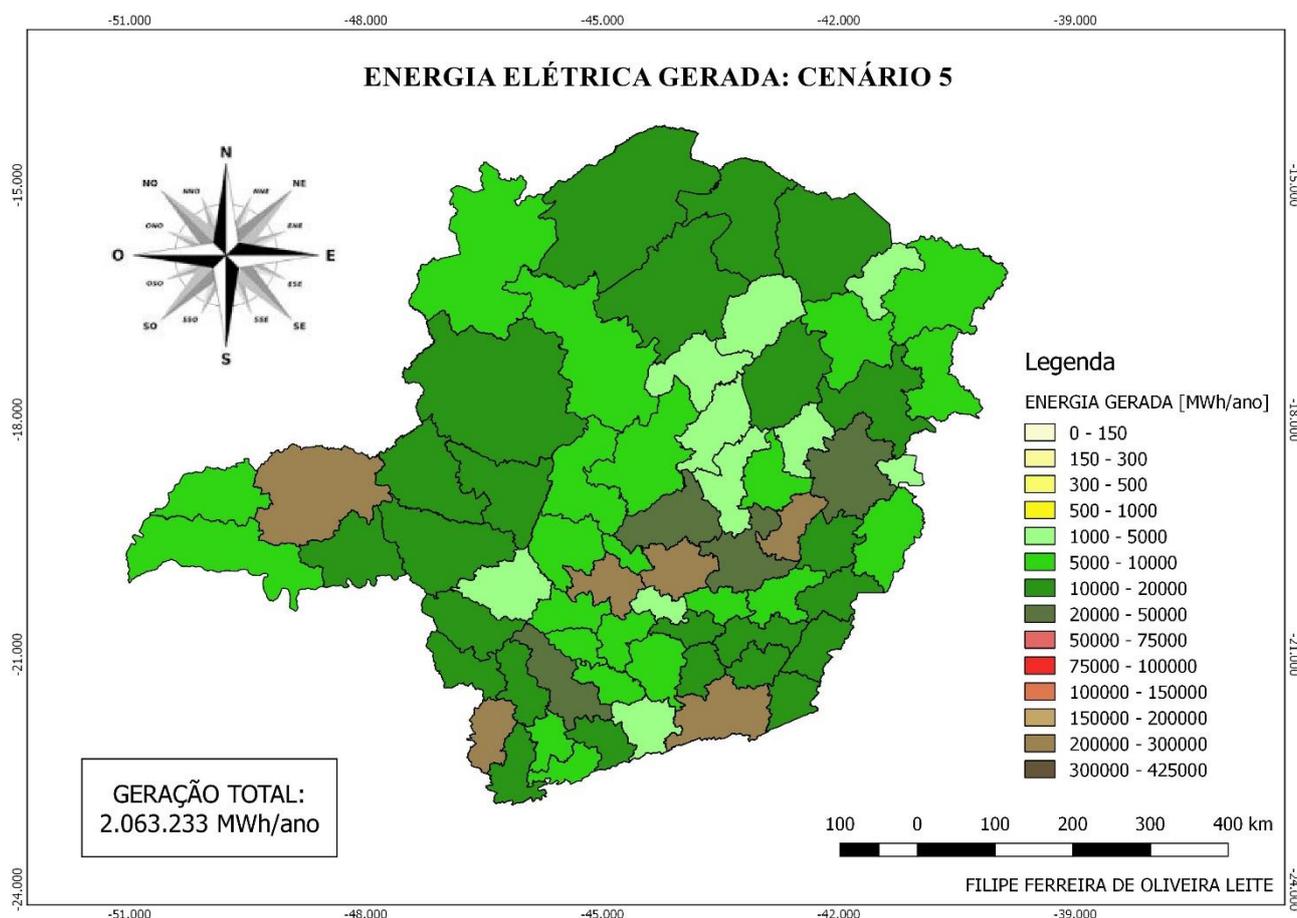


Figura 4.36: Geração de energia elétrica anual para o Cenário C5 com a aplicação de consórcios.

Com a utilização do gás de aterro para geração elétrica, conforme o Cenário 5, nota-se um potencial maior do que nos cenários C2, C3 – A2 e os que consideraram a gaseificação (C4 – A1, C4 – A2 e C4 – A3). Os maiores potenciais de geração elétrica, observados nas microrregiões de Uberlândia, Poços de Caldas, Divinópolis, Belo Horizonte, Juiz de Fora e Ipatinga, seguidos de Uberaba, Pouso Alegre, Varginha Sete Lagoas, Itabira e Governador Valadares, estariam entre 200.000 e 300.000 MWh ao ano. Para as microrregiões que apresentariam menor potencial energético, a geração elétrica estaria entre 1.000 e 5.000 MWh ao ano. A geração elétrica anual total com o Cenário 5 é de 2.063.233 MWh por ano, que poderia suprir a demanda de eletricidade de 1.388.821 residências do estado durante um ano.

A Tabela 4.30 apresenta a geração elétrica anual para cada faixa populacional dos consórcios, conforme microrregiões, nela são destacadas (coloridas) as faixas nas quais cada cenário apresenta viabilidade econômica para implantação.

Tabela 4.30: Comparação da energia elétrica gerada em cada cenário com destaque as faixas viáveis destacadas

Energia elétrica gerada [MWh/ano]								
Faixa	Cenário C2	Cenário C3 – A1	Cenário C3 – A2	Cenário C3 – A3	Cenário C4 – A1	Cenário C4 – A2	Cenário C4 – A3	Cenário C5
De 20.001 até 50.000	1.249,01	6.284,95	1.579,25	7.004,08	2.713,73	2.725,75	1.818,56	2.032,74
De 50.001 até 100.000	2.498,03	12.569,91	3.158,50	14.008,16	5.427,47	5.451,50	3.637,13	4.065,48
De 100.001 até 200.000	4.996,05	25.139,82	6.317,00	28.016,33	10.854,94	10.903,00	7.274,25	8.130,97
De 200.001 até 300.000	7.494,08	37.709,73	9.475,49	42.024,49	16.282,41	16.354,50	10.911,38	12.196,45
De 300.001 até 400.000	9.992,10	50.279,63	12.633,99	56.032,65	21.709,88	21.806,00	14.548,50	16.261,94
De 400.001 até 500.000	12.490,13	62.849,54	15.792,49	70.040,81	27.137,35	27.257,50	18.185,63	20.327,42
500.001 ou mais	149.881,50	754.194,50	189.509,90	840.489,76	325.648,18	327.090,04	218.227,52	243.929,06

Através da Tabela 4.30 pode-se observar que para a situação de consórcio seria possível promover a viabilidade de pelo menos uma tecnologia para a geração de energia em todas as faixas populacionais. Assim, o máximo potencial viável para os consórcios conforme faixas de população é mostrado na Tabela 4.31, que traz o potencial o número de microrregiões contido na faixa, os cenários utilizados para a composição do cenário viável e a energia total gerada a partir do número de microrregiões.

Tabela 4.31: Potencial máximo viável de acordo com a população das microrregiões

Faixa – intervalo	Cenário viável	Número de microrregiões	Cenário viável	
	Energia [MWh/ano]		Cenários	Energia total [MWh/ano]
De 20.001 até 50.000	2.713,73	1	C4 - A1	2.713,73
De 50.001 até 100.000	5.451,50	9	C4 - A2	49.063,50
De 100.001 até 200.000	10.903,00	22	C4 - A2	239.866,00
De 200.001 até 300.000	42.024,49	22	C3 – A3	924.538,78
De 300.000 até 400.000	56.032,65	2	C3 – A3	112.065,30
De 400.001 até 500.000	70.040,81	4	C3 – A3	280.163,24
500.001 ou mais	840.489,76	6	C3 – A3	5.042.938,56

Neste caso, a geração total de energia elétrica anual seria de 6.651.349 MWh ao ano. Para compreender o potencial máximo a ser obtido com aplicação das tecnologias em todo estado e o potencial máximo viável, a Figura 4.37 traz um comparativo entre os cenários.

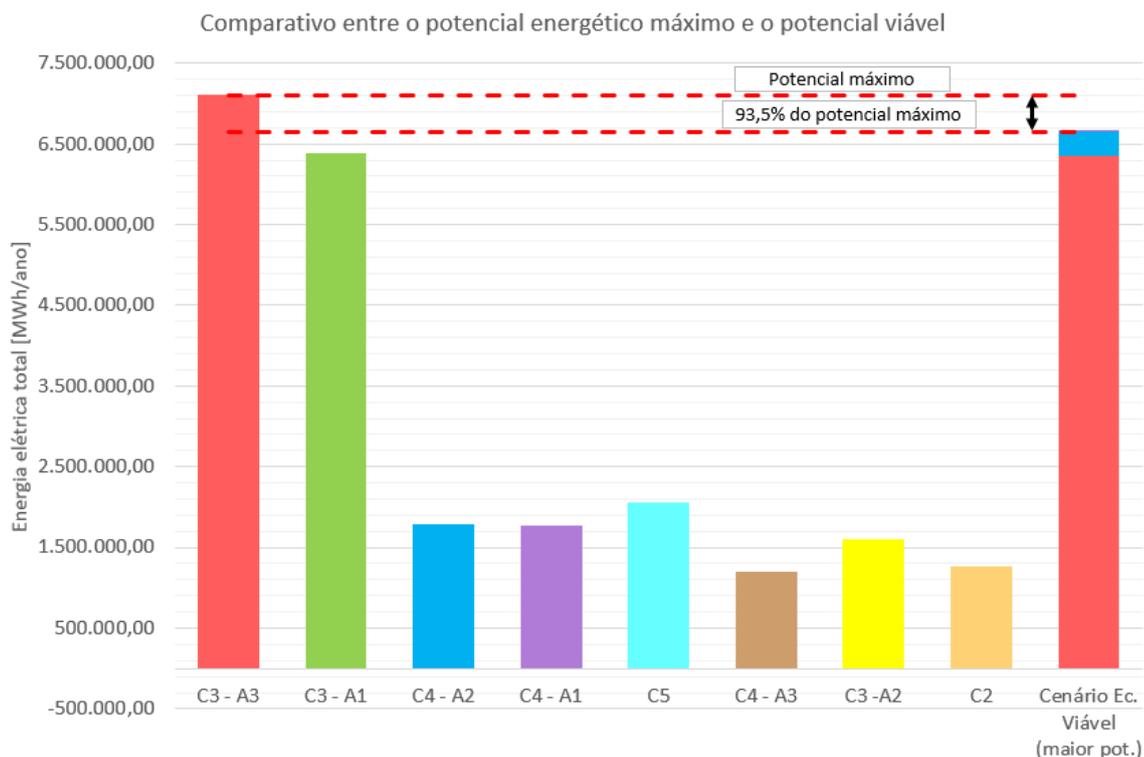


Figura 4. 37: Comparativo entre o potencial para os cenários para o caso de consórcios.

Nota-se que ao agrupar os municípios em consórcios, aumentou-se o número de regiões nas faixas acima de 200.000 habitantes, o que viabilizou a maior aplicação do Cenário C3 – A3 (com a incineração integrada à digestão anaeróbia), que foi o cenário que apresentou maior potencial para geração elétrica. Com isso, a diferença entre o potencial máximo e o potencial viável diminuiu para o caso de consórcios, pois tem-se que o potencial viável economicamente alcança até 93,5% do potencial com o Cenário 3 – Alternativa 3.

Para o caso dos consórcios, são mostradas na Figura 4.38 as quantidades de RSU depositadas em aterro respeitadas as proporções assumidas anteriormente para cada cenário, onde para o “Cenário Ec. Viável” utilizou-se a combinação dos cenários de acordo com a faixa populacional conforme a Tabela 4.31. Para o cenário de maior redução (“Cenário Maior Redução”), indicado na Figura 4.38 a combinação dos cenários utilizada para composição da alternativa é mostrada na Tabela 4.32, que considera as alternativas de maior redução na disposição e que são economicamente viáveis em cada faixa populacional.

Tabela 4.32: Cenário mais viável para a redução na disposição em aterros

Faixa populacional	Cenário selecionado	Depósito em aterro [t/ano]	Número de microrregiões	Total depositado em aterro [t/ano]
De 20.001 até 50.000	Cenário 2	2.904,82	1	2.904,82
De 50.001 até 100.000	Cenário 4 - Alternativa 2	786,72	9	7.080,49
De 100.001 até 200.000	Cenário 4 - Alternativa 2	1.573,44	22	34.615,72
De 200.001 até 300.000	Cenário 4 - Alternativa 2	2.360,16	22	51.923,59
De 300.000 até 400.000	Cenário 4 - Alternativa 2	3.146,88	2	6.293,77
De 400.001 até 500.000	Cenário 4 - Alternativa 2	3.933,61	4	15.734,42
500.001 ou mais	Cenário 4 - Alternativa 2	47.203,26	6	283.219,56

Para efeitos comparativos a energia gerada com o cenário de maior redução em aterro é mostrada na Tabela 4.33, de acordo com a faixa populacional.

Tabela 4.33: Energia gerada com o cenário de maior redução de RSU depositado em aterro

Faixa populacional	Cenário selecionado	Energia Total gerada [MWh/ano]
De 20.001 até 50.000	Cenário 2	1.249,01
De 50.001 até 100.000	Cenário 4 - Alternativa 2	48.102,75
De 100.001 até 200.000	Cenário 4 - Alternativa 2	235.169,00
De 200.001 até 300.000	Cenário 4 - Alternativa 2	352.753,50
De 300.000 até 400.000	Cenário 4 - Alternativa 2	42.757,98
De 400.001 até 500.000	Cenário 4 - Alternativa 2	106.894,96
500.001 ou mais	Cenário 4 - Alternativa 2	1.924.109,52
Total		1.783.889,63

Na Figura 4.38 é indicada a redução possível de ser alcançada com relação ao caso em que todos o resíduo fosse destinado ao aterro, que, no caso, foi assumido como o Cenário 5.

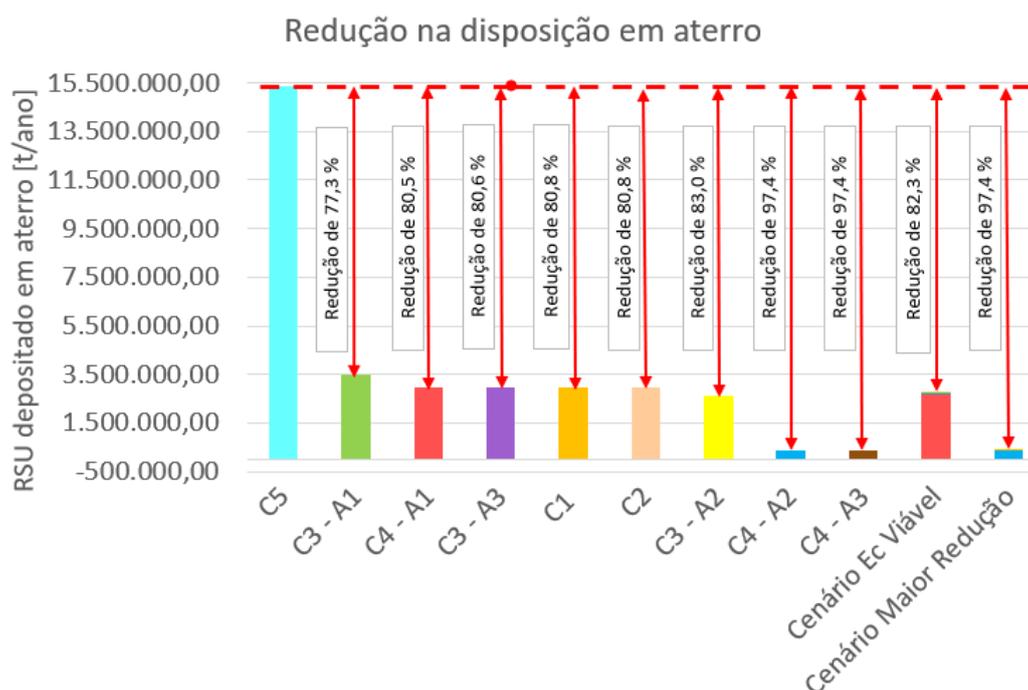


Figura 4.38: Redução no depósito em aterro em cada cenário com a implantação de consórcios.

Com o cenário de máxima geração e economicamente viável (“Cenário Ec Viável”), seria possível reduzir em 82,3% a disposição de resíduos em aterro. O cenário de maior redução, selecionando-se as alternativas viáveis com menor disposição de RSU em aterro, possibilitaria reduzir em 97,4% a quantidade de resíduos em aterro, assim como os cenários C4 – A2 e C4 – A3. Porém, de acordo com a Tabela 4.33, a geração de energia elétrica para o cenário de maior redução do volume em aterro em aterros é de 1.783.889,63 MWh/ano, que corresponde a 27% da que poderia ser gerada com o cenário economicamente viável de maior geração. De maneira geral, nota-se que a redução no volume em aterro seria significativa com a utilização de quaisquer alternativas comparadas ao Cenário 5, a menor redução alcançada seria de 77,3%, com o Cenário C4 – A1 (gaseificação associada à reciclagem).

Ao comparar a redução da disposição de RSU em aterro com os municípios tratando resíduos sem a formação de consórcios, nota-se que a redução no cenário economicamente viável de maior geração seria de 84 %, ou seja, superior ao caso de utilização de consórcios, que é de 82,3%. Porém, ao selecionar alternativas economicamente viáveis com maior capacidade de reduzir o depósito em aterro, nota-se que a redução com a formação de consórcios poderia alcançar melhores resultados, ou seja, seria possível reduzir 97,4% do RSU em aterro, enquanto que os municípios atuando de maneira isolada poderiam reduzir até 93%.

Por fim, a última análise a ser feita em termos comparativos entre a utilização de consórcios e municípios atuando de forma isolada é quanto as emissões evitadas a serem obtidas. Com a utilização do WARM e tomando-se como caso base a disposição em aterro com queima em *flare* os resultados para as emissões evitadas com cada cenário aplicado aos consórcios são mostrados na Figura 4.39.

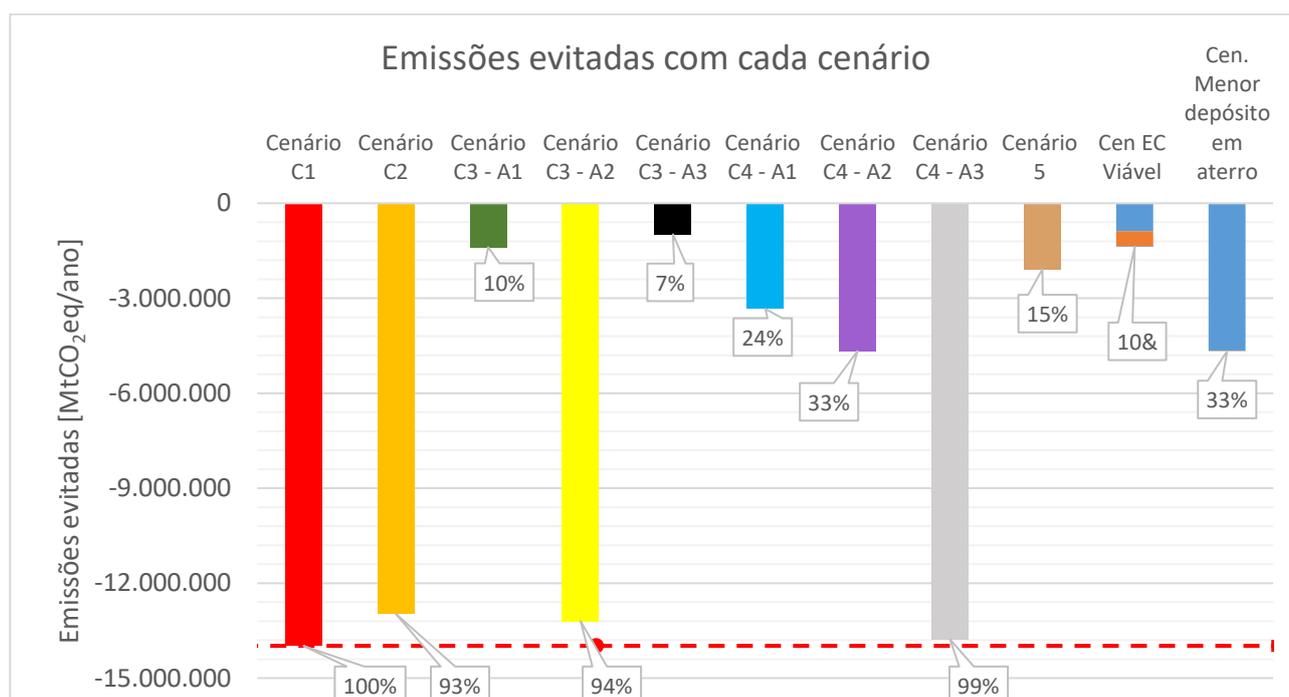


Figura 4.39: Emissões evitadas com cada cenário para o caso de formação de consórcios.

Com a utilização de consórcios, nota-se que foram alcançados maiores níveis de emissões evitadas em cada cenário, exceto para o cenário economicamente viável de máxima geração. Porém, isto pode estar relacionado ao tipo de análise feita, pois o limite para a classe acima de 500.000 habitantes foi de 6.000.000 de habitantes para incluir a microrregião de Belo Horizonte, isso pode indicar um valor superestimado para as emissões totais. O cenário economicamente viável alcançaria 10% das emissões no caso de máxima redução de emissões, que seria com a compostagem aplicada em todas as microrregiões do estado. Para o caso dos municípios tratando seus resíduos de maneira isolada este cenário alcançaria 34% do valor de máxima emissão evitada, isto se deve ao fato de não se utilizar a compostagem ou a digestão anaeróbia, por exemplo, na composição do cenário economicamente viável.

No cenário em que fosse priorizada a redução do volume depositado em aterro, tem-se uma emissão evitada de 33% do valor de máxima emissão evitada. Com este cenário também não seriam alcançados grandes níveis de emissões evitadas, vale ressaltar que a redução das emissões com os municípios tratando resíduos isoladamente permitiria alcançar 39% da máxima possível.

Com isso, percebe-se que a formação de consórcios permite viabilizar tecnologias capazes de gerar mais energia elétrica, ao invés de aplicar alternativas como a compostagem, por exemplo, porém isto, pode não indicar grandes níveis de redução de emissões. Com a aplicação de consórcios é possível utilizar, também alternativas viáveis economicamente capazes de reduzir as quantidades de RSU depositadas em aterros. Porém, isto pode não ser traduzido em resultados expressivos em termos de redução de emissões. Assim como já observado nas análises para os municípios tratando seus resíduos de forma isolada, tem-se que alternativas que utilizam a compostagem, a digestão anaeróbia e com maiores taxas de reciclagem podem apresentar maiores benefícios quanto a redução de emissões.

5. Conclusões

Os cálculos do potencial de cada tecnologia e, conseqüentemente, de cada cenário mostraram que é possível obter produtos e benefícios com o tratamento do RSU. Para a produção de composto, nota-se que a digestão anaeróbia é capaz de gerar maior quantidade do que com o uso da compostagem. Para a geração de energia o Cenário C3 – A3 (com a incineração de papel e plástico associada à digestão anaeróbia da fração orgânica) é aquele capaz de gerar mais energia elétrica.

Ao analisar a viabilidade econômica para os cenários propostos no trabalho, notou-se que a compostagem seria a única alternativa viável para a aplicação em quaisquer faixas populacionais. Ao criar um cenário com as alternativas capazes de gerar mais energia elétrica e que fossem viáveis economicamente em cada faixa populacional, obteve-se que a compostagem deveria ser utilizada em municípios até 20.000 habitantes; o Cenário C4 - A1 (com a gaseificação das frações de matéria orgânica, papel e plástico) em municípios de 20.001 até 50.000 habitantes; o Cenário C4 – A2 (gaseificação das frações de papel, plástico e “outros” associada à digestão anaeróbia da fração orgânica) em municípios com mais de 50.000 habitantes até 200.000 e, por fim, para populações acima de 200.000 habitantes a máxima geração viável economicamente seria com o Cenário C3 – A3 (incineração das frações de papel e plástico associada à digestão anaeróbia da fração orgânica). Desta forma a geração total no estado seria de 2.869.666 MWh ao ano, suficiente para atender ao consumo de 1.931.654 residências do estado durante um ano. Assim, o cenário economicamente viável alcançaria 56% do potencial máximo a ser obtido (caso fosse possível aplicar o cenário C3 - A3 em todos os municípios).

No contexto da economia circular, os cenários C1, C2, C3 – A2 e C4 – A3 seriam os mais adequados. A gaseificação de plástico papéis e outros, por exemplo, poderia ser aplicada em um cenário no qual não fosse possível alcançar uma boa eficiência de reciclagem da fração de plástico e papel ou em situações nas quais a distância para o transporte até as unidades de reciclagem tornasse o processo inviável. De forma semelhante, a mesma ressalva deve ser feita para a incineração de papel e plástico associada à digestão anaeróbia e à reciclagem de metais e vidros (Cenário C3 – A3).

Quanto à adequação dos cenários ao contexto de economia circular, no que diz respeito à redução na disposição em aterro pelos municípios, tem-se que o cenário economicamente viável de maior geração de energia, alcançaria uma redução de cerca de 84% de RSU em aterro se comparado ao Cenário C5. Ao elaborar um cenário no qual fosse priorizada a redução da quantidade de RSU em aterro, ou seja, com utilização do cenário de maior redução viável em cada faixa, seria possível reduzir em até 93% da disposição em aterro, porém, a energia elétrica gerada seria de aproximadamente 1/3 da gerada no cenário economicamente viável de maior geração.

A partir dos resultados de emissões obtidos com o WARM, nota-se que a compostagem associada à reciclagem (Cenário 1) ao ser utilizada em todos os municípios apresentaria uma maior emissão evitada, sendo esta da ordem de 13.983.538 MtCO₂eq, que equivale a 15.414.213 tCO₂eq, conforme a calculadora USEPA (2020). Com os cenários C2 (digestão anaeróbia aliada à reciclagem), C3 – A2 (incineração com a reciclagem de papel, plástico, metais e vidros e digestão anaeróbia da fração orgânica) e C4 – A3 (gaseificação de “outros”, digestão anaeróbia da fração orgânica e reciclagem de papel, plástico, metais e vidros) tem-se uma boa capacidade para evitar emissões. Com o cenário economicamente viável de máxima geração de energia elétrica seria possível alcançar uma emissão evitada de 34% do valor máximo possível.

Caso fosse priorizada redução na disposição de resíduos em aterros, poderia ser alcançada uma emissão evitada de 39% do valor máximo encontrado (Cenário 1). Assim, tem-se que a redução do depósito de RSU em aterros, conforme o WARM, não se mostra, necessariamente, um fator de relevância para obtenção de maiores níveis de emissão evitadas em termos de CO₂ equivalente, por outro lado, a reciclagem, principalmente de papel e plástico, se mostrou determinante para redução nas emissões. De maneira geral, percebe-se que os cenários que consideraram a reciclagem de papel e plástico, obtiveram maiores níveis de emissões evitadas, ou seja, os cenários C1, C2, C3 – A2, e C4 – A3, que são, também, aqueles que se mostram mais adequados no contexto da economia circular.

Ao assumir uma situação hipotética de utilização de consórcios formados conforme as microrregiões que compõem o estado, verificou-se que seria possível viabilizar mais tecnologias capazes de gerar energia elétrica. Assim, seria possível obter cerca de 93% da energia gerada com o máximo potencial possível (caso fosse viável a aplicação do Cenário C3 – A3, referente a incineração das frações papel e plástico associada ao tratamento da fração orgânica a partir da digestão anaeróbia), ou seja, esta forma de gerenciamento viabiliza a aplicação de tecnologias de maior potencial em mais áreas do que no caso de municípios tratando seus resíduos de modo isolado. Com o cenário viável de máxima geração de energia elétrica seria possível gerar 6.651.349 MWh/ano, que seria suficiente para atender ao consumo de 4.477.214 residências do estado de Minas Gerais.

A redução na disposição de resíduos em aterro para o cenário viável de máxima geração de energia seria de 82,3% comparado ao caso onde todo o RSU fosse depositado em aterro. Se fosse priorizada a redução no depósito em aterro, escolhendo-se os cenários de maior redução viáveis em cada faixa, para o caso da implantação de consórcios seria possível reduzir em 97,4% a disposição em aterro.

Quanto a redução de emissões, ao utilizar a formação de consórcios no estado, tem-se para o cenário viável de máxima geração de energia as emissões evitadas alcançariam um valor de 10% do valor máximo possível (caso de aplicação da compostagem em todo o estado). Para o cenário ao qual se priorize a redução do volume depositado em aterro tem-se uma emissão evitada de 33% do valor máximo possível.

Através da utilização de consórcios nota-se que é possível obter maior energia elétrica gerada, porém, como mostra a Figura 4.39, isto não se traduz, necessariamente, em emissões evitadas. É possível constatar que maiores taxas de reciclagem permitem obter maior redução de emissões em termos de CO₂eq, principalmente com a reciclagem de papel e plástico. Assim, os cenários mais adequados ao contexto de economia circular seriam capazes, conforme as considerações assumidas no *software* WARM, de produzir ganhos ambientais relevantes quanto a emissões evitadas.

Quanto a avaliação econômica realizada acerca dos cenários, pode-se constatar que com as circunstâncias assumidas é possível que se tenha com a economia circular, ganhos em termos econômicos. Como o estudo foi realizado para o estado de Minas Gerais de maneira geral, é possível que as estimativas não retratem a realidade de cada município ou microrregião, seria necessária a realização de mais estudos para regiões específicas, com dados locais e projeções de crescimento populacional. Porém, os levantamentos realizados no presente trabalho já podem indicar os cenários mais adequados à aplicação da economia circular e as possibilidades para aplicação conforme a característica populacional.

As sugestões para trabalhos futuros seriam a aplicação dos modelos de economia circular, bem como o uso das tecnologias de tratamentos para regiões específicas, estendendo-se as análises econômicas e de emissões evitadas em diversos cenários hipotéticos com análises de sensibilidade. Quanto às emissões evitadas, poderia ser realizada uma análise de ciclo de vida com dados característicos de uma localidade, a fim de se comparar alternativas e confrontar resultados com os do WARM e com os demais encontrados na literatura. Além disso, caracterizar para uma localidade um modelo real de economia circular que seja viável técnica e economicamente, de modo a favorecer a difusão da prática. Desta forma, estas sugestões poderiam alcançar algumas limitações as quais o presente trabalho não pode abordar devido ao fato de que a análise foi conduzida para o estado de Minas Gerais, levando-se em conta dados que podem não retratar as particularidades de algumas localidades.

Referências

ABETRE. Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos. Estudo sobre aspectos econômicos e financeiros da implantação e operação de aterros sanitários. 2008. Disponível em: <<http://www.abetre.org.br/estudos-e-publicacoes/publicacoes/publicacoes-abetre/FGV%20-%20Aterros%20Sanitarios%20-%20Estudo.pdf>>. Acesso em: <03 abril 2019.

ABITI, Benedicta, et al. Resource Prospects of Municipal Solid Wastes Generated in the Ga East Municipal Assembly of Ghana. **Journal of Health and Pollution**, 2017, 7.14: 37-47.

ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2011. Disponível em: <<http://a3p.jbrj.gov.br/pdf/ABRELPE%20Panorama%202001%20RSU-1.pdf>>. Acesso em: 07 de março de 2019.

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. (2019a). Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2018/2019. São Paulo: ABRELPE. Disponível em: <https://www.migalhas.com.br/arquivos/2020/1/492DD855EA0272_PanoramaAbrelpe_-2018_2019.pdf>. Acesso em 17 de dezembro de 2019.

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. (2019b). Os descaminhos do lixo. **ABRELPE**. São Paulo. 27 de nov. de 2019 Disponível em: <https://www.migalhas.com.br/arquivos/2020/1/492DD855EA0272_PanoramaAbrelpe_-2018_2019.pdf>. Acesso em 17 de dezembro de 2019.

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. (2019c). Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2017. São Paulo: ABRELPE. Disponível em: <http://abrelpe.org.br/pdfs/panorama/panorama_abrelpe_2017.pdf>. Acesso em 20 de agosto de 2019.

ACHILLAS, Ch et al. Social acceptance for the development of a waste-to-energy plant in an urban area. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 55, n. 9-10, p. 857-863, 2011.

AGÊNCIA BRASIL. Brasil gera 79 milhões de toneladas de resíduos sólidos por ano. **Agência Brasil**. 08 de nov. de 2019. Disponível em: <<https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2019-11/brasil-gera-79-milhoes-de-toneladas-de-residuos-solidos-por-ano>>. Acesso em: 18 de dezembro de 2019.

AMINI, Hamid R.; REINHART, Debra R.; NISKANEN, Antti. Comparison of first-order-decay modeled and actual field measured municipal solid waste landfill methane data. **Waste management**, v. 33, n. 12, p. 2720-2728, 2013.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica, 2018. Nota sobre o Leilão A-6 de 2017. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa/-/asset_publisher/zXQREz8EVIZ6/content/id/16504035>. Acesso em: 20 março de 2019.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Matriz de energia elétrica. 2019. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>>. Acesso em: 14 março 2019.

AKUNNA, Joseph Chukwuemeka. Anaerobic Waste-Wastewater Treatment and Biogas Plants: A Practical Handbook. CRC Press, 2018.

ALMASI, Ali et al. Assessing the knowledge, attitude and practice of the kermanshahi women towards reducing, recycling and reusing of municipal solid waste. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 141, p. 329-338, 2019.

ALMENDRO-CANDEL, María Belén et al. The Use of Composted Municipal Solid Waste Under the Concept of Circular Economy and as a Source of Plant Nutrients and Pollutants. In: **Municipal Solid Waste Management**. IntechOpen, 2019.

ARENA, Umberto. Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review. **Waste management**, v. 32, n. 4, p. 625-639, 2012.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **NBR 10004** – Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 71 p., 2004.

ATEŞ, Funda; MISKOLCZI, Norbert; BORSODI, Nikolett. Comparison of real waste (MSW and MPW) pyrolysis in batch reactor over different catalysts. Part I: Product yields, gas and pyrolysis oil properties. **Bioresource technology**, v. 133, p. 443-454, 2013.

Banco Central do Brasil. BCB. 2019. Calculadora do Cidadão. Disponível em: <<https://www3.bcb.gov.br/CALCIDADA0/publico/exibirFormCorrecaoValores.do?method=exibirFormCorrecaoValores>>. Acesso em 03 abril 2019.

BANCO MUNDIAL. WORLD BANK GROUP. Brazil - Integrated Solid Waste Management and Carbon Finance Project. Report No. 123798. 2018. Disponível em: <<http://documents.worldbank.org/curated/en/395271521557013485/pdf/123798-PPAR-P106702-P124663-P164310-PUBLIC.pdf>>. Acesso em: 12 de maio de 2019.

Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social - BNDES. 2019 a. BNDES Finem - Geração de energia. Taxa de Juros. Energia de Resíduos Sólidos. Disponível em: <<https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/produto/bndes-finem-energia>>. Acesso em: 14 maio de 2019.

Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social – BNDES. 2019 b. Taxa de Longo Prazo – TLP para contratos assinados em maio de 2019. Disponível em: <<https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/guia/custos-financeiros/tlp-taxa-de-longo-prazo>>. Acesso em: 14 maio de 2019.

RAND, T.; HAUKOHL, Jorgen; MARXEN, U. **Municipal solid waste incineration: requirements for a successful project**. World Bank Publications, 2000.

BARROS, Regina Mambeli; TIAGO FILHO, Geraldo Lúcio; DA SILVA, Tiago Rodrigo. The electric energy potential of landfill biogas in Brazil. **Energy Policy**, v. 65, p. 150-164, 2014.

BARROS, R. M., Tiago Filho, G. L., Santos, A. H. M., Ferreira, C. H., Pieroni, M. F., Moura, J. S., ... & de Freitas, J. V. R. 2018. A potential of the biogas generating and energy recovering from municipal solid waste. **Renewable Energy Focus**, 25, 4-16.

Basu, P. (2010). Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory. Academic press.

BOSMANS, A., VANDERREYDT, I., GEYSEN, D., & HELSEN, L. . The crucial role of Waste-to-Energy technologies in enhanced landfill mining: a technology review. **Journal of Cleaner Production**, v. 55, p. 10-23, 2013.

BRASIL. Lei nº 11.445, de 5 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. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 5 jan. 2007. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2007/Lei/L11445.htm>. Acesso em: 11 de abril de 2019.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; Altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**. Brasília, DF, 03 de agosto de 2010. Seção 1.

BRASIL. 2016. Ministério de Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações – MCTIC. Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil. Brasília. 2016. Disponível em: <https://sirene.mctic.gov.br/portal/export/sites/sirene/backend/galeria/arquivos/2018/10/11/Estimativas_3ed.pdf>. Acesso em 15 de junho de 2019.

BRASIL. 2018. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental – SNSA Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos – 2016. – Brasília: MCIDADES, SNSA, 2018.

BRASIL. 2019. Brasil. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento - SNIS. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos - 2017. Brasília: MDR.SNS, 2019.

CETESB. 2006. Biogás: Materiais de Apoio. Softwares. Manual de Apoio. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. CETESB. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/biogas/softwares/>>. Acesso em 23 março 2019.

CHEN, Dezhen & Lijie, Yin & Wang, Huan & He, Pinjing. (2014). Reprint of: Pyrolysis technologies for municipal solid waste: A review. **Waste Management**. 37. 10.1016/j.wasman.2014.08.004.

CHERNICHARO, C. A. L. UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais. **Reatores anaeróbios**. 2. ed., v. 5. Belo horizonte, 2007.

COM. 2015a. 614 final. Fechar o ciclo – plano de ação da UE para a economia circular. Comunicação da Comissão ao Parlamento Europeu, ao Conselho, ao Comitê econômico e social europeu e ao comitê das regiões. Bruxelas, Comissão Europeia. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:8a8ef5e8-99a0-11e5-b3b7-01aa75ed71a1.0007.02/DOC_1&format=PDF>. Acesso em: 19 de novembro de 2018.

COM. 2015b. 595 final. Proposta de Diretiva do parlamento europeu e do conselho que altera a Diretiva 2008/98/CE relativa aos resíduos. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:c2b5929d-999e-11e5-b3b7-01aa75ed71a1.0004.02/DOC_1&format=PDF>. Acesso em: 19 de novembro de 2018.

CONKE, Leonardo S. Barriers to waste recycling development: Evidence from Brazil. **Resources, conservation and recycling**, v. 134, p. 129-135, 2018.

CORTEZ, Luíz Augusto Barbosa; LORA; Electo Eduardo Silva; GÓMEZ, Edgardo Olivares. Biomassa para energia. Campinas. Editora da UNICAMP. 2008.

DALMO, Francisco César et al. Energy recovery overview of municipal solid waste in São Paulo State, Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 212, p. 461-474, 2019.

DE OLIVEIRA, Fabio Ribeiro; FRANÇA, Sergio Luiz Braga; RANGEL, Luís Alberto Duncan. Challenges and opportunities in a circular economy for a local productive arrangement of furniture in Brazil. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 135, p. 202-209, 2018.

DESCHAMPS, Joris, SIMON, Balint, TAGNIT-HAMOU, Arezki, & AMOR, Ben. Is open-loop recycling the lowest preference in a circular economy? Answering through LCA of glass powder in concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 185, p. 14-22, 2018.

DIVYA, D.; GOPINATH, L. R.; CHRISTY, P. Merlin. A review on current aspects and diverse prospects for enhancing biogas production in sustainable means. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 42, p. 690-699, 2015.

DOS SANTOS, Rafaela Ediene et al. Generating electrical energy through urban solid waste in Brazil: An economic and energy comparative analysis. **Journal of environmental management**, v. 231, p. 198-206, 2019.

DOS SANTOS, Ivan Felipe Silva et al. Incineration of municipal solid waste in Brazil: An analysis of the economically viable energy potential. **Renewable Energy**, v. 149, p. 1386-1394, 2020.

DREYER & BOSSE KRAFTWERKE GMBH (2014). Profitable Power and Heat. Disponível em: <http://www.dreyer-bosse.de/fileadmin/inhalte/Download-Dateien/RZ_ImageBiogas2014_engkIES-2014-05-06.pdf>. Acesso em: 21 de janeiro de 2020.

EIA. U.S. Energy Information Administration. 2019. Washington State Profile and Energy Estimates. Disponível em: <<https://www.eia.gov/state/?sid=WA#tabs-4>>. Acesso em: 14 de junho de 2019.

EOS CONSULTORES. Os números dos Resíduos Sólidos no mundo. **EOS Organização e Sistemas**. 26 de dez. de 2018. Disponível em: <<https://www.eosconsultores.com.br/os-numeros-dos-residuos-solidos-no-mundo/>>. Acesso em: 18 de julho de 2019.

ELLYIN, Claudine and Themelis, Nickolas J. Small Scale Waste-To-Energy Technologies. 2012. Thesis (M.S. degree in Earth Resources Engineering). Columbia University New York, NY.

Ellen Macarthur Foundation - EMF. **Towards the circular economy - Vol. 1: Economic and business rationale for an accelerated transition**. Isle of Wight: EMF, 2012.

Ellen Macarthur Foundation - EMF. 2017. **Cities In The Circular Economy: An Initial Exploration**. Disponível em: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/Cities-in-the-CE_An-Initial-Exploration.pdf>. Acesso em 20 de junho de 2019.

ENGEBIO ENGENHARIA S/S LTDA. Estudo do estado da arte e análise de viabilidade técnica, econômica e ambiental da implantação de uma usina de tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos com geração de energia elétrica no estado de Minas Gerais. Belo Horizonte: ENGEBIO, 2010.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos de Campo Grande, MS. Ministério de Minas e Energia. Rio de Janeiro. 2008.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. Economicidade e Competitividade do Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos. Ministério de Minas e Energia. Rio de Janeiro. 2014a.

EPE. Inventário Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos. Nota Técnica DEA 18/14. Empresa de Pesquisa Energética. Ministério de Minas e Energias. Rio de Janeiro, Brasil. 2014b. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-251/topico-311/DEA%2018%20-%2020Invent%C3%A1rio%20Energ%C3%A9tico%20de%20Res%C3%ADduos%20S%C3%B3lidos%20Urbanos%5B1%5D.pdf>>. Acesso em 29 de agosto de 2019.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. 2017. Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2017 ano base 2016. Brasília. 2017. Disponível em: <<http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Anuario2017vf.pdf>>. Acesso em 15 de agosto de 2019.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. 2018. Balanço Energético Nacional - BEN. 2018. Disponível em: <<http://epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2018>>. Acesso em 14 de junho de 2019.

European Commission. Communication from the commission to the European parliament, the council, the European economic and social committee and the committee of the regions - the role of waste-to-energy in the circular economy. COM/2017/0034 Final. 2017. Disponível em: <<http://ec.europa.eu/environment/waste/waste-to-energy.pdf>>. Acesso em: 09 março 2019.

FERRONATO, Navarro et al. Introduction of the circular economy within developing regions: A comparative analysis of advantages and opportunities for waste valorization. **Journal of environmental management**, v. 230, p. 366-378, 2019.

Fundação Estadual do Meio Ambiente – FEAM. 2012. Aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos: guia de orientação para governos municipais de Minas Gerais / Fundação Estadual do Meio Ambiente. Belo Horizonte: FEAM, 2012. 163 p.; il. Disponível em: <[http://www.resol.com.br/cartilhas/aproveitamento_energetico_de_rsu_guia_feam_\(2\).pdf](http://www.resol.com.br/cartilhas/aproveitamento_energetico_de_rsu_guia_feam_(2).pdf)>. Acesso em 17 de maio de 2019.

Fundação João Pinheiro. FJP. 2017. Diretoria de Estatística e Informações. Saneamento Básico de Minas Gerais – 2014 / Fundação João Pinheiro. Diretoria de Estatística e Informações – Belo Horizonte, 2017. **Sistema Estadual de Informações Sobre Saneamento (Seis)**. 80p.

FURNAS. Furnas Centrais Elétricas. Notícias. Usina Termoquímica de Geração de Energia. 2017. Disponível em: <<http://www.furnas.com.br/detalhesNoticiaExterna.aspx?Tp=N&idN=5265>>. Acesso em: 25 fev. 2019.

GHISELLINI, Patrizia; CIALANI, Catia; ULGIATI, Sergio. A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. **Journal of Cleaner production**, v. 114, p. 11-32, 2016.

GÓMEZ, Antonio; ZUBIZARRETA, J.; RODRIGUES, M.; DOPAZO, C. & FUEYO, N. (2010). Potential and cost of electricity generation from human and animal waste in Spain. **Renewable Energy**, v. 35, n. 2, p. 498-505, 2010.

HALKOS, George; PETROU, Kleoniki Natalia. Assessing 28 EU member states' environmental efficiency in national waste generation with DEA. **Journal of cleaner production**, v. 208, p. 509-521, 2019.

HENRÍQUEZ, Aline Isabel Melo. Análise de Ciclo de Vida (ACV) de Sistemas Integrados de Tratamento e disposição final de Resíduos Sólidos Urbanos para cidades de médio porte. 2016.

IAQUANIELLO, Gaetano et al. Waste to chemicals for a circular economy. **Chemistry–A European Journal**, v. 24, n. 46, p. 11831-11839, 2018.

IBAM - Instituto Brasileiro de Administração Municipal. Manual de Gerenciamento Integrado de resíduos sólidos / José Henrique Penido Monteiro ...[et al.]; coordenação técnica Victor Zular Zveibil. Rio de Janeiro: IBAM, 2001. Disponível em: <http://www.ibam.org.br/media/arquivos/estudos/manual_girs.pdf>. Acesso em 16 maio de 2019.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2010. População Residente em Minas Gerais. Rio de Janeiro: IBGE. IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2010. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/pesquisa/23/25207?tipo=ranking>>. Acesso em 11 de abril de 2019.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Estimativas por ano. 2018. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas-novoportal/sociais/populacao/9103-estimativas-de-populacao.html?=&t=downloads>>. Acesso em: 20 maio 2018.

INTERNATIONAL, R. Feasibility of Generating Green Power through Anaerobic Digestion of Garden Refuse from the Sacramento Area - Final Report. Report to SMUD Advanced Renewable and Distributed Generation Program – Ris International Ltda. and MacViro Consultants Inc. Sacramento, EUA. 2005. Disponível em: <https://nerc.org/documents/sacramento_feasibility_study.pdf>. Acesso em: 19 março 2019.

IEA. International Energy Agency. IEA Bioenergy. Waste to Energy Summary and Conclusions from the IEA Bioenergy ExCo71 Workshop. 2014. Disponível em: <<https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2014/03/ExCo71-Waste-to-Energy-Summary-and-Conclusions-28.03.14.pdf>>. Acesso em: 12 fev. 2019.

IPEA. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. 2012. Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Urbanos. Relatório de Pesquisa. Brasília. 2012. disponível em: <http://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/121009_relatorio_residuos_solidos_urbanos.pdf>. Acesso em: 03 de julho de 2019.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. 1996. Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Workbook – Volume 2. Disponível em: <ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs5e.html>. Acesso em: 03 de março de 2019.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories. Task force on national greenhouse gas inventories. 2001. Disponível em: <<https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/english/>>. Acesso em: 30 março 2019.

ISWA – the International Solid Waste Association. 2012. **Waste-to-Energy State-of-the-Art-Report**. Statistics. 6th Edition.

JACOBI, P. R.; BESEN, G. R. Gestão de resíduos sólidos em São Paulo: desafios da sustentabilidade. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 25, n. 71, abr. 2011. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0103-40142011000100010&script=sci_arttext>. Acesso em: 01 nov. 2018.

JIMENEZ, Ana Carolina Medina et al. Evaluation of two different alternatives of energy recovery from municipal solid waste in Brazil. **Waste Management & Research**, v. 35, n. 11, p. 1137-1148, 2017.

JOSEPH, Aneeta Mary, et al. The use of municipal solid waste incineration ash in various building materials: A Belgian point of view. *Materials*, 2018, 11.1: 141.

KAZA, Silpa; Yao, Lisa C.; Bhada-Tata, Perinaz; Van Woerden, Frank. 2018. **What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050**. Urban Development. Washington, DC: World Bank. © World Bank. License: CC BY 3.0 IGO. Disponível em: <<https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30317>>. Acesso em: 20 de dezembro de 2019.

JUNG, Yoojin et al. Influence of high-permeability layers for enhancing landfill gas capture and reducing fugitive methane emissions from landfills. **Journal of Environmental Engineering**, v. 135, n. 3, p. 138-146, 2009.

KENDALL, Alissa. A life cycle assessment of biopolymer production from material recovery facility residuals. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 61, p. 69-74, 2012.

KIRKELS, Arjan F.; VERBONG, Geert PJ. Biomass gasification: Still promising? A 30-year global overview. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 15, n. 1, p. 471-481, 2011.

KUMAR, Atul; SAMADDER, Sukha Ranjan. A review on technological options of waste to energy for effective management of municipal solid waste. **Waste Management**, v. 69, p. 407-422, 2017.

LEME, Marcio Montagnana Vicente. Avaliação das opções tecnológicas para geração de energia a partir dos resíduos sólidos urbanos: estudo de caso. 2010.

LEME, Marcio Montagnana Vicente et al. Techno-economic analysis and environmental impact assessment of energy recovery from Municipal Solid Waste (MSW) in Brazil. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 87, p. 8-20, 2014.

LEVOSO, Ana Sánchez; GASOL, C. M.; MARTÍNEZ-BLANCO, J.; DURANY, X. G.; LEHMANN, M. & GAYA, R. F. Methodological framework for the implementation of circular economy in urban systems. **Journal of Cleaner Production**, v. 248, p. 119227, 2020.

LINO, F. A. M.; ISMAIL, K. A. R. Energy and environmental potential of solid waste in Brazil. **Energy Policy**, v. 39, n. 6, p. 3496-3502, 2011.

LIU, Lili et al. A review of waste prevention through 3R under the concept of circular economy in China. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 19, n. 4, p. 1314-1323, 2017.

LU, J. W.; et al. Status and perspectives of municipal solid waste incineration in China: A comparison with developed regions. **Waste Management**, v. 69, p. 170-186, 2017.

LUZ, Fábio Codignole. Avaliação Técnico-Econômica de Plantas de Gaseificação do Lixo Urbano para Geração Distribuída de Eletricidade. 2013.

LUZ, Fábio Codignole et al. Techno-economic analysis of municipal solid waste gasification for electricity generation in Brazil. **Energy Conversion and Management**, v. 103, p. 321-337, 2015.

MALINAUSKAITE, J., Jouhara, H., Czajczyńska, D., Stanchev, P., Katsou, E., Rostkowski, P., ... & Anguilano, L. Municipal solid waste management and waste-to-energy in the context of a circular economy and energy recycling in Europe. **Energy**, v. 141, p. 2013-2044, 2017.

MAMEDE, Mauricio Cuba dos Santos et al. Avaliação econômica e ambiental do aproveitamento energético de resíduos sólidos no Brasil. 2013. Disponível em: <<http://repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/265334>>. Acesso em 17 de maio de 2019.

MESQUITA JÚNIOR, José Maria Gestão integrada de resíduos sólidos. Rio de Janeiro. 2007. 40 p. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/srhu_urbano/_publicacao/125_publicacao12032009023803.pdf>. Acesso em: 17 de junho de 2019.

MARSIGLIA, Michael Corredor. Projeto conceitual de uma planta industrial de geração de eletricidade a partir de cdr (1mwe). 2019.

METCALF, Leonard; EDDY, Harrison P. **Tratamento de efluentes e recuperação de recursos**. McGraw Hill Brasil, 2015.

MINAS GERAIS. Governo do Estado de Minas Gerais. Arquivos. 2016. Lista de microrregiões. Disponível em: <https://www.mg.gov.br/sites/default/files/paginas/arquivos/2016/ligminas_10_2_04_listamesomicro.pdf>. Acesso em: 20 de junho de 2019.

Ministério de Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. MCTIC - Brasil. 2019. Ciência. Clima. Fatores de Emissão de CO₂. Disponível em: <https://www.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/textogeral/emissao_corporativos.html>. Acesso em 17 de julho de 2019.

Ministério de Minas e Energia – MME, 2017. Consultoria Jurídica. PORTARIA N° 293, DE 4 DE AGOSTO DE 2017. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/documents/10584/0/PORTARIA+No+293+DE+4+DE+AGOSTO+DE+2017.pdf/ba9a03df-ec9a-48bc-87fe-24baa6090728>>. Acesso em: 20 março de 2019.

Ministério do meio ambiente. MMA em números. Resíduos Sólidos. 2019. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/mma-em-numeros/residuos-solidos>>. Acesso em: 03 abril 2019

Ministério do Meio Ambiente - MMA. Informação sobre materiais recicláveis e não recicláveis. 2019. Disponível em: <https://www.mma.gov.br/estruturas/a3p/_arquivos/reciclavel_ao_reciclavel1.pdf>. Acesso em 7 de julho de 2019.

NÁSNER, A. M. L. (2015). Modelagem de uma Planta Piloto de Gaseificação de Combustível Derivado de Resíduos (CDR) em um Sistema Integrado a Motor Ciclo Otto, Utilizando o Software Aspen Plus™. Disponível em: <<https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/handle/123456789/474>>. Acesso em: 17 de outubro de 2019.

NÁSNER, Albany Milena Lozano et al. Refuse Derived Fuel (RDF) production and gasification in a pilot plant integrated with an Otto cycle ICE through Aspen plus™ modelling: Thermodynamic and economic viability. **Waste Management**, v. 69, p. 187-201, 2017.

ONU. Organização das Nações Unidas. Departamento de Assuntos Econômicos e Sociais, Divisão de Populacional (2017). *Perspectivas da População Mundial: A Revisão 2017, Volume II: Perfis Demográficos*. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2017). *World Population Prospects: The 2017 Revision, Volume II: Demographic Profiles*. Disponível em: <https://population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2017_Volume-II-Demographic-Profiles.pdf>. Acesso em: 11 de abril de 2019.

ONU. Organização das Nações Unidas. Um terço do lixo da América Latina e Caribe acaba em aterros ou na natureza, diz ONU. 2018. 09 de Out. de 2018. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/um-terco-do-lixo-da-america-latina-e-caribe-acaba-em-aterros-ou-na-natureza-diz-onu/>>. Acesso em: 20 de dezembro de 2019.

OGUNJUYIGBE, A. S. O.; AYODELE, T. R.; ALAO, M. A. Electricity generation from municipal solid waste in some selected cities of Nigeria: An assessment of feasibility, potential and technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 80, p. 149-162, 2017.

OSTREM, Karena et al. Greening waste: Anaerobic digestion for treating the organic fraction of municipal solid wastes. **Earth Engineering Center Columbia University**, p. 6-9, 2004.

OUDA, O. K. M., Raza, S. A., Nizami, A. S., Rehan, M., Al-Waked, R., & Korres, N. E. Waste to energy potential: a case study of Saudi Arabia. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 61, p. 328-340, 2016.

PAN, Shu-Yuan et al. Strategies on implementation of waste-to-energy (WtE) supply chain for circular economy system: a review. **Journal of Cleaner Production**, v. 108, p. 409-421, 2015.

PAVAN, Margareth de Cassia Oliveira. **Geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos: avaliação e diretrizes para tecnologias potencialmente aplicáveis no Brasil**. 2010. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

PECES, M.; ASTALS, S.; MATA-ALVAREZ, J. Response of a sewage sludge mesophilic anaerobic digester to short and long-term thermophilic temperature fluctuations. **Chemical engineering journal**, v. 233, p. 109-116, 2013.

PEREIRA, Alessandro Sanches. **Ecologia industrial**. Senac, 2017.

PERAZZINI, Hugo et al. Thermal treatment of solid wastes using drying technologies: A review. **Drying Technology**, v. 34, n. 1, p. 39-52, 2016. PLANOS DE GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS: MANUAL DE ORIENTAÇÃO.

PMGIRS-BH. Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de Belo Horizonte. Relatório Consolidado do Produto 2 Diagnóstico dos Resíduos Sólidos. 2016. Superintendência de Limpeza Urbana. Belo Horizonte. Disponível em: <<https://prefeitura.pbh.gov.br/sites/default/files/estrutura-de-governo/slu/2018/documentos/Diagn%C3%B3stico%20Consolidado.pdf>>. Acesso em: 25 fev. 2019.

PROBIOGÁS. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Catálogo de tecnologias e empresas de biogás / Probiogás; organizadores, Ministério das Cidades, DeutscheGesellschaft für

Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ); autores, Elisa Thieme ... [et al.]. – Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2015a. 190p. Disponível em: <<http://www.cidades.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/probiogas/probiogas-catalogo.pdf>>. Acesso em: 18 março 2019.

PROBIOGÁS. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Probiogás. Tecnologias de digestão anaeróbia com relevância para o Brasil: substratos, digestores e uso de biogás / Probiogás; organizadores, Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ) ; autores, Oliver Jende ... [et al.]. – Brasília, DF : Ministério das Cidades, 2015b. Disponível em: <<https://www.giz.de/en/downloads/probiogas-tecnologias-biogas.pdf>>. Acesso em 05 abril 2019.

PROBIOGÁS. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Probiogás. Viabilidade econômica de projetos de valorização integrada de RSU com produção de biogás / Probiogás; organizadores, Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ) ; autores, Luis Felipe de D. B. Colturato ... [et al.]. – Brasília, DF : Ministério das Cidades, 2016. 124 p. : il. – (Aproveitamento energético de biogás de resíduos sólidos urbanos; 2). Disponível em: <http://www.cidades.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/probiogas/Viabilidade_RSU.pdf>. Acesso em: 15 de março de 2019.

QGIS Development Team, 2017. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. Disponível em: <<http://www.qgis.org/>>. Acesso em: 14 de Agosto de 2018.

RADA, Elena Cristina; CIOCA, Lucian-Ionel; IONESCU, Gabriela. Energy recovery from Municipal Solid Waste in EU: proposals to assess the management performance under a circular economy perspective. In: MATEC Web of Conferences. EDP Sciences, 2017. p. 05006.

RAJAEIFAR, Mohammad Ali et al. Electricity generation and GHG emission reduction potentials through different municipal solid waste management technologies: A comparative review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 79, p. 414-439, 2017.

REMY, Florian. Potential for the anaerobic digestion of municipal solid waste (MSW) in the city of Curitiba, Brazil. 2018.

REZAEI, Mahdi et al. Electric power generation from municipal solid waste: A techno-economical assessment under different scenarios in Iran. **Energy**, v. 152, p. 46-56, 2018.

RIERA, Pere. **Manual de economía ambiental y de los recursos naturales**. Editorial Paraninfo, 2005.

ROGOFF, Marc J.; SCREVE, Francois. **Waste-to-energy: technologies and project implementation**. William Andrew, 2011.

SANTOS, Ivan Felipe Silva; BARROS, Regina Mambeli; TIAGO FILHO, Geraldo Lúcio. Economic study on LFG energy projects in function of the number of generators. *Sustainable cities and society*, v. 41, p. 587-600, 2018.

SAVEYN, Hans, et al. Towards a better exploitation of the technical potential of waste-to-energy. **Science for Policy report by the Joint Research Centre (JRC), European Union**, 2016.

SCARLAT, N. et al. Evaluation of energy potential of municipal solid waste from African urban areas. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 50, p. 1269-1286, 2015.

SILVA, Edevaldo. Temas em ecologia e educação ambiental. 1ed. – Rio de Janeiro: Gramma, 2017.

SILVEIRA, B; CHERNICHARO, C.; CABRAL, C.; SUIDEDOS, C.; PLATZER, C. & SILVA, G. Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto. Brasília, DF. **Ministério das Cidades**, 2015.

SINGH, Arashdeep; BASAK, Prasenjit. Economic and environmental evaluation of municipal solid waste management system using industrial ecology approach: Evidence from India. **Journal of cleaner production**, v. 195, p. 10-20, 2018.

SNIS. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Série Histórica. Resíduos Sólidos. 2019. Disponível em: < <http://www.snis.gov.br/> >. Acesso em: 26 de setembro de 2019.

SIPRA, Ayesha Tariq; GAO, Ningbo; SARWAR, Haris. Municipal solid waste (MSW) pyrolysis for bio-fuel production: A review of effects of MSW components and catalysts. **Fuel processing technology**, v. 175, p. 131-147, 2018.

STANTEC. Stantec Consulting Ltd. **Waste to Energy - A Technical Review of Municipal - Solid Waste Thermal Treatment Practices**. FINAL REPORT. 2011.

SU, Biwei et al. A review of the circular economy in China: moving from rhetoric to implementation. **Journal of cleaner production**, v. 42, p. 215-227, 2013.

TABATA, Tomohiro. Waste-to-energy incineration plants as greenhouse gas reducers: A case study of seven Japanese metropolises. **Waste Management & Research**, v. 31, n. 11, p. 1110-1117, 2013.

TEIXEIRA, Sandra et al. Prospective application of municipal solid wastes for energy production in Portugal. **Energy Policy**, v. 71, p. 159-168, 2014.

TERRAZA, Horacio; Daza, Diego; Arce, Evelyn Martínez Martín; Faure, Soulier; Espinoza, Pilar Tello. Relatório da avaliação regional da gestão de resíduos sólidos urbanos na América Latina e Caribe 2010. Banco Interamericano de desenvolvimento. BID. 2010. Disponível em: < <https://play.google.com/books/reader?id=LdN5DwAAQBAJ&hl=pt&pg=GBS.PP2> >. Acesso em 12 de maio de 2018.

THAKARE, Shweta; NANDI, Somnath. Study on potential of gasification technology for municipal solid waste (MSW) in Pune city. **Energy Procedia**, v. 90, p. 509-517, 2016.

TISSERANT, Alexandre et al. Solid waste and the circular economy: A global analysis of waste treatment and waste footprints. **Journal of Industrial Ecology**, v. 21, n. 3, p. 628-640, 2017.

TRIPATHI, Manoj; SAHU, Jaya Narayan; GANESAN, P. Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 55, p. 467-481, 2016.

TSILEMOU, Konstantinia; PANAGIOTAKOPOULOS, Demetrios. Approximate cost functions for solid waste treatment facilities. **Waste management & research**, v. 24, n. 4, p. 310-322, 2006.

UNFCCC. United Nations Framework Convention on Climate Change. 2018. Approved baseline and monitoring methodology AM0025 “Alternative waste treatment processes”. Clean Development Mechanism – CDM. Methodologies. AM0025. Disponível em: <

https://cdm.unfccc.int/filestorage/w/a/D3ILGQEHVNMVY1K6J0ZUFP9CA4BOXT.pdf/EB%2068_repan08_AM0025_ver14.0.0.pdf?t=d0d8cHo4N2k0fDBnDLqRjw0p3ZIVpxZPwbYU. Acesso em 12 de maio de 2019.

United Nations Framework Convention on Climate Change. UNFCCC. What is CDM. 2019. Definição do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo. Disponível em: <<https://cdm.unfccc.int/about/index.html>>. Acesso em: 17 de junho de 2019.

United Nations Framework Convention on Climate Change. UNFCCC. What is CDM. 2019. Project Search. CDM. Disponível em: <<https://cdm.unfccc.int/Projects/projsearch.html>>. Acesso em: 18 de julho de 2019.

USEPA. United States Environmental Protection Agency. 2017. Landfill Methane Outreach Program (LMOP). Basic Information about Landfill Gas. Disponível em: <<https://www.epa.gov/lmop/basic-information-about-landfill-gas>>. Acesso em 14 maio de 2019.

USEPA. 2019a. United States Environmental Protection Agency. Waste Reduction Model (WARM). Disponível em: <<https://www.epa.gov/warm/basic-information-about-waste-reduction-model-warm>>. Acesso em 14 junho de 2019.

United States Environmental Protection Agency – USEPA. 2019b. Waste Reduction Model (WARM). Documentation Chapters for Greenhouse Gas Emission, Energy and Economic Factors Used in the Waste Reduction Model (WARM). Management Practices Chapters. Disponível em: <<https://www.epa.gov/warm/documentation-chapters-greenhouse-gas-emission-energy-and-economic-factors-used-waste-reduction>>. Acesso em: 14 de junho de 2019.

United States Environmental Protection Agency – USEPA. 2019c. Waste Reduction Model (WARM). Versions of the Waste Reduction Model (WARM). Disponível em: <<https://www.epa.gov/warm/versions-waste-reduction-model-warm#15>>. Acesso em: 17 de dezembro de 2019.

USEPA. 2019d. United States Environmental Protection Agency. Greenhouse Gas Equivalencies Calculator. Disponível em: <<https://www.epa.gov/energy/greenhouse-gas-equivalencies-calculator>>. Acesso em: 22 de novembro de 2019.

WEI, Yunmei et al. Environmental challenges impeding the composting of biodegradable municipal solid waste: A critical review. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 122, p. 51-65, 2017.

WELLINGER, Arthur; MURPHY, Jerry D.; BAXTER, David (Ed.). **The biogas handbook: science, production and applications**. Elsevier, 2013.

WHITING, K; WOOD, S., FANNING, M., & VENN, M. (2013). Review of state-of-the-art waste-to-energy technologies. **Report, WSP Environmental Limited, London, UK**. 2013. Disponível em: <http://www.wtert.com.br/home2010/arquivo/noticias_eventos/WSP%20Waste%20to%20Energy%20Technical%20Report%20Stage%20Two.pdf>. Acesso em: 02 de maio de 2019.

WILLIAMS, Paul T.; SLANEY, Edward. Analysis of products from the pyrolysis and liquefaction of single plastics and waste plastic mixtures. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 51, n. 4, p. 754-769, 2007.

WINANS, Kiara; KENDALL, Alissa; DENG, Hui. The history and current applications of the circular economy concept. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 68, p. 825-833, 2017.

Apêndices

Apêndice A - Emissões de gases de efeito estufa por tonelada de diferentes tipos de resíduo para cada alternativa de tratamento assumidas no WARM

Tabela A - 1: Emissões de gases de efeito estufa por tonelada de diferentes tipos de resíduo para cada alternativa de tratamento assumidas no WARM. Fonte: USEPA (2019c).

Material	Emissões de gases de efeito estufa por tonelada de material reduzido na fonte (MtCO ₂ eq)	Emissões de gases de efeito estufa por tonelada de material reciclado (MtCO ₂ eq)	Emissões de gases de efeito estufa por tonelada de material aterrado (MtCO ₂ eq)	Emissões de gases de efeito estufa por tonelada de material incinerado (MtCO ₂ eq)	Emissões de gases de efeito estufa por tonelada de material enviado à compostagem (MtCO ₂ eq)	Emissões de gases de efeito estufa por tonelada de material enviado à digestão anaeróbia (MtCO ₂ eq)
Recipientes de papelão	-5,58	-3,14	0,26	-0,49	NA	NA
Revistas	-8,57	-3,07	-0,39	-0,35	NA	NA
Jornal	-4,68	-2,71	-0,82	-0,56	NA	NA
Papel de escritório	-7,95	-2,86	1,25	-0,47	NA	NA
Agenda de telefones	-6,17	-2,62	-0,82	-0,56	NA	NA
Livros didáticos	-9,02	-3,10	1,25	-0,47	NA	NA
Papel misto (geral)	-6,07	-3,55	0,14	-0,49	NA	NA
Papel Misto (principalmente residencial)	-6,00	-3,55	0,08	-0,49	NA	NA
Papel Misto (principalmente de escritórios)	-7,37	-3,58	0,18	-0,45	NA	NA
Comida	-3,66	NA	0,54	-0,13	-0,18	-0,04
Desperdício de alimentos (sem carne)	-0,76	NA	0,54	-0,13	-0,18	-0,04
Desperdício de alimentos (apenas carne)	-15,10	NA	0,54	-0,13	-0,18	-0,04
Carne	-30,09	NA	0,54	-0,13	-0,18	-0,04
Aves	-2,45	NA	0,54	-0,13	-0,18	-0,04
Grãos	-0,62	NA	0,54	-0,13	-0,18	-0,04
Pão	-0,66	NA	0,54	-0,13	-0,18	-0,04
Frutas e vegetais	-0,44	NA	0,54	-0,13	-0,18	-0,04
Laticínios	-1,75	NA	0,54	-0,13	-0,18	-0,04
Resíduos de quintal	NA	NA	-0,18	-0,17	-0,15	-0,09

Material	Emissões de gases de efeito estufa por tonelada de material reduzido na fonte (MtCO ₂ eq)	Emissões de gases de efeito estufa por tonelada de material reciclado (MtCO ₂ eq)	Emissões de gases de efeito estufa por tonelada de material aterrado (MtCO ₂ eq)	Emissões de gases de efeito estufa por tonelada de material incinerado (MtCO ₂ eq)	Emissões de gases de efeito estufa por tonelada de material enviado à compostagem (MtCO ₂ eq)	Emissões de gases de efeito estufa por tonelada de material enviado à digestão anaeróbia (MtCO ₂ eq)
Relva	NA	NA	0,13	-0,17	-0,15	0,00
Folhas	NA	NA	-0,52	-0,17	-0,15	-0,14
Ramos	NA	NA	-0,50	-0,17	-0,15	-0,22
PET	-2,17	-1,15	0,02	1,24	NA	NA
PVC	-1,93	NA	0,02	0,66	NA	NA
Plásticos misturados	-1,87	-1,03	0,02	1,26	NA	NA
PLA	-2,45	NA	-1,64	-0,63	-0,15	NA
CPUs de desktop	-20,86	-1,49	0,02	-0,66	NA	NA
Dispositivos eletrônicos portáteis	-29,83	-1,07	0,02	0,65	NA	NA
Monitores de tela plana	-24,19	-1,00	0,02	0,03	NA	NA
Monitores CRT	NA	-0,57	0,02	0,45	NA	NA
Periféricos eletrônicos	-10,32	-0,37	0,02	2,08	NA	NA
Dispositivos de cópia impressa	-7,65	-0,57	0,02	1,20	NA	NA
Eletrônica mista	NA	-0,79	0,02	0,39	NA	NA
Latas de alumínio	-4,80	-9,13	0,02	0,03	NA	NA
Lingote de alumínio	-7,48	-7,20	0,02	0,03	NA	NA
Latas de aço	-3,03	-1,83	0,02	-1,59	NA	NA
Fio de cobre	-6,72	-4,49	0,02	0,03	NA	NA
Metais mistos	-3,65	-4,39	0,02	-1,02	NA	NA
Vidro	-0,53	-0,28	0,02	0,03	NA	NA
Concreto asfáltico	-0,11	-0,08	0,02	NA	NA	NA
Telhas de asfalto	-0,19	-0,09	0,02	-0,35	NA	NA
Tapete	-3,68	-2,38	0,02	1,10	NA	NA
Tijolos de argila	-0,27	NA	0,02	NA	NA	NA
Concreto	NA	-0,01	0,02	NA	NA	NA
Madeira dimensional	-2,02	-2,47	-1,01	-0,58	NA	NA
Drywall	-0,22	0,03	-0,06	NA	NA	NA
Fibra de vidro	-0,38	NA	0,02	NA	NA	NA
Cinzas voláteis	NA	-0,87	0,02	NA	NA	NA
Painel de fibras de média densidade	-2,22	-2,47	-0,88	-0,58	NA	NA
Chão de vinil	-0,58	NA	0,02	-0,31	NA	NA

Material	Emissões de gases de efeito estufa por tonelada de material reduzido na fonte (MtCO₂eq)	Emissões de gases de efeito estufa por tonelada de material reciclado (MtCO₂eq)	Emissões de gases de efeito estufa por tonelada de material aterrado (MtCO₂eq)	Emissões de gases de efeito estufa por tonelada de material incinerado (MtCO₂eq)	Emissões de gases de efeito estufa por tonelada de material enviado à compostagem (MtCO₂eq)	Emissões de gases de efeito estufa por tonelada de material enviado à digestão anaeróbia (MtCO₂eq)
Piso de madeira	-4,03	NA	-0,86	-0,74	NA	NA
Pneus	-4,30	-0,38	0,02	0,50	NA	NA
Mix de Recicláveis	NA	-2,85	0,09	-0,42	NA	NA
Orgânicos mistos	NA	NA	0,21	-0,15	-0,16	-0,06
RSU misto	NA	NA	0,36	0,01	NA	NA