

OTÁVIA LIDIA KLAUS

**POTENCIAL DE APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS
URBANOS DA MESORREGIÃO OESTE DO PARANÁ PARA
GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

**CASCATEL
PARANÁ – BRASIL
JANEIRO – 2014**

OTÁVIA LIDIA KLAUS

**POTENCIAL DE APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS
URBANOS DA MESORREGIÃO OESTE DO PARANÁ PARA
GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Energia na Agricultura, para obtenção do título de Mestre em Energia na Agricultura.

Orientador: **Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza**

Coorientador: **Dr. Helton José Alves**

**CASCADEL
PARANÁ – BRASIL
JANEIRO – 2014**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

Ficha catalográfica elaborada por Jeanine da Silva Barros CRB-9/1362

K69p Klaus, Otávia Lidia
Potencial de aproveitamento de resíduos sólidos urbanos da Mesorregião Oeste do Paraná para geração de energia elétrica. / Otávia Lidia Klaus — Cascavel, PR: UNIOESTE, 2014.
110 p.

Orientador: Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza
Coorientador: Prof. Dr. Helton José Alves
Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná.
Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Energia na Agricultura,
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas.
Bibliografia.

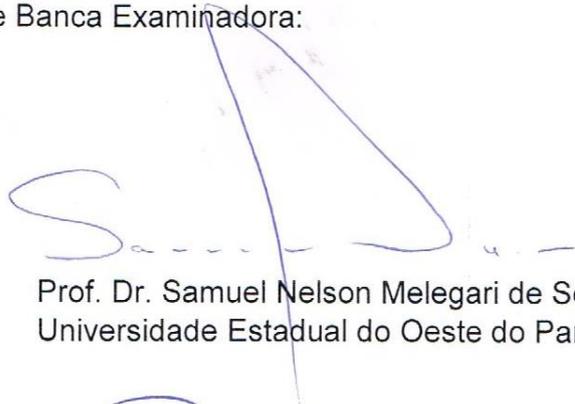
1. Biomassa. 2. Recuperação energética. 3. Energias renováveis. I. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. II. Título.

CDD 21.ed. 333.79

OTÁVIA LIDIA KLAUS

“Potencial de aproveitamento de resíduos sólidos urbanos da mesorregião oeste do Paraná para geração de energia elétrica”

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Energia na Agricultura em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Energia na Agricultura, área de concentração Agroenergia, **aprovada** pela seguinte Banca Examinadora:



Orientador: Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza
Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE/Cascavel



Prof. Dr. Reginaldo Ferreira Santos
Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE/Cascavel



Prof. Dr. Luis Fernando Souza Gomes
Universidade Federal do Paraná – UFPR/Palotina

Cascavel, 21 de janeiro de 2014.

*Dedico este trabalho às minhas mães-avós,
Clarinda Zanette e Elidia Klaus, por tanto amor que
me deram nesta vida. Vocês serão eternas para
mim.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus.

Meu agradecimento especial ao orientador, Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza, o qual me conduziu ao desenvolvimento do trabalho.

Agradeço a todos os professores do Mestrado em Energia na Agricultura, em especial ao Prof. Dr. Reginaldo Ferreira Santos.

Quero compartilhar este momento com algumas pessoas da minha família, meu pai, Claudir Klaus, minha mãe, Neuza Zanette, minha irmãzinha, Claudia Eliza Klaus, minhas tias, Nelci Zanette, Adriana Zanette e Naira Zanette.

A minha gratidão em especial ao colega de turma Douglas Bassegio e aos amigos que fiz ao longo dos estudos.

E obrigada Deus pelos anjos enviados durante a minha caminhada de mestrado, representados pelas pessoas que passaram pela minha vida trazendo força, carinho e esperança, em especial duas amigas, Andressa Thomazzoni e Raquel Texeira.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Rota de conversão energética da biomassa.	7
Figura 2. Composição gravimétrica de RSU no Brasil.	12
Figura 3. Composição gravimétrica dos RSU gerados ao longo dos anos no Brasil, segundo referências.	12
Figura 4. Processo de transformação dos resíduos sólidos.....	20
Figura 5. Fases típicas de produção do biogás em um aterro sanitário.	25
Figura 6. Aproveitamento energético do biogás.....	28
Figura 7. Esquema representativo de dupla camada de combustão.	32
Figura 8. Usina termelétrica.	33
Figura 9. Localização do estado do Paraná (Fig. a), localização da mesorregião Oeste no estado do Paraná (Fig. b), mesorregião Oeste (Fig. c).	38
Figura 10. Divisão territorial das microrregiões da MROP.....	38
Figura 11. Esquema dos processos dos Cenários 01 e 02.	40
Figura 12. Demanda suprida de energia elétrica no setor rural e residencial na microrregião de Cascavel.	75
Figura 13. Demanda suprida de energia elétrica no setor rural e residencial na microrregião de Foz do Iguaçu.	76
Figura 14. Demanda suprida de energia elétrica no setor rural e residencial na microrregião de Toledo.....	76
Figura 15. Demanda suprida de energia elétrica no setor rural e residencial na MROP.....	77

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Classificação dos biocombustíveis de biomassa.....	6
Quadro 2. Características físicas, químicas e biológicas para melhor limpeza pública, análise e disposição.....	10
Quadro 3. Destinação final de RSU no estado do Paraná.....	15
Quadro 4. Mecanismos de mercado para redução de emissões de gases poluentes	21
Quadro 5. Principais fatores que afetam a geração de gases	27
Quadro 6. Taxa de geométrica de crescimento da MROP.....	39
Quadro 7. Cenários avaliados para a estimativa do potencial técnico de geração de energia elétrica utilizando os RSU gerados na MROP.....	40
Quadro 8. Cenários avaliados para suprimento da demanda de geração de energia elétrica no setor rural e residencial na MROP.....	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Potencial de energia por fontes de biomassas instaladas no Brasil	5
Tabela 2. Percentual de composição média de RSU em alguns países	11
Tabela 3. Percentual de material degradável e não degradável em países em desenvolvimento	11
Tabela 4. Quantidade de RSU gerado no Brasil nos anos de 2010 a 2011	13
Tabela 5. Estimativa utilizada para geração <i>per capita</i> por número de habitantes	14
Tabela 6. Geração de RSU no estado do Paraná nos anos de 2011 e 2012.....	14
Tabela 7. Consórcios formados classificados por intervalo de população urbana total	16
Tabela 8. Caracterização dos gases presentes no gás de aterro sanitário	24
Tabela 9. Fases típicas de produção do biogás em um aterro sanitário.....	24
Tabela 10. Quantificação de produção de biogás por tonelada de resíduo ano.....	28
Tabela 11. Equivalência energética de 1m ³ de biogás.....	28
Tabela 12. Comparação das tecnologias de conversão de energia	30
Tabela 13. Aplicabilidade dos principais tipos de incineradores para resíduos sólidos.....	34
Tabela 14. População e área territorial das microrregiões e da MROP.....	37
Tabela 15. Valor médio de RSU gerado por habitante/dia na MROP.....	39
Tabela 16. Teor de carbono orgânico degradável para cada componente do resíduo	42
Tabela 17. Fator de correção de metano segundo os tipos de aterros	43
Tabela 18. Valores de índice de geração de metano (k) e de vida média (t _{1/2}) por tipo de resíduos, segundo Zona Climática.....	44
Tabela 19. Tecnologia adota para conversão de energia elétrica com biogás	45
Tabela 20. Taxa de produção de eletricidade por incineração segundo referências.....	46
Tabela 21. Potencial de produção de eletricidade adotado por gigagrama de RSU incinerado na MROP.	46
Tabela 22. Consumo de energia elétrica nos setores Rural e Residencial da MROP.....	48
Tabela 23. Demanda de geração de energia elétrica aplicada no suprimento do setor rural e residencial das microrregiões e de toda MROP.....	49
Tabela 24. Levantamento de geração de RSU e o potencial de produção de gás metano por meio de aterro sanitário da microrregião de Cascavel.....	51
Tabela 25. Levantamento de geração de RSU e o potencial de produção de gás metano por meio de aterro sanitário da microrregião de Foz do Iguaçu	52

Tabela 26. Levantamento de geração de RSU e o potencial de produção de gás metano por meio de aterro sanitário da microrregião de Toledo.....	53
Tabela 27. Levantamento de geração de RSU e o potencial de produção de gás metano por meio de aterro sanitário da MROP	54
Tabela 28. A potência e energia disponível gerada nas microrregiões e MROP, conforme IRB de 50% e IRB 70%	65
Tabela 29. Produção de geração de energia elétrica pela incineração de RSU na microrregião de Cascavel	66
Tabela 30. Produção de geração de energia elétrica pela incineração de RSU na microrregião de Foz do Iguaçu	67
Tabela 31. Produção de geração de energia elétrica pela incineração de RSU na microrregião de Toledo.....	68
Tabela 32. Produção de geração de energia elétrica pela incineração de RSU na MROP	69
Tabela 33. Média do potencial de geração de energia elétrica em função da Taxa 01 e Taxa 02 de incineração de RSU nas Microrregiões e toda MROP.....	72

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Comportamento da produção de gás metano por meio de aterros sanitários das microrregiões de Cascavel, Foz do Iguaçu e Toledo	55
Gráfico 2. Comportamento da produção de metano por meio de aterros sanitários da MROP	55
Gráfico 3. Recuperação de gás metano com o IRB 50%, por meio de aterros sanitários nas microrregiões de Cascavel, Foz do Iguaçu e Toledo	57
Gráfico 4. Recuperação de gás metano com o IRB 50% por meio de aterros na MROP	57
Gráfico 5. Recuperação de gás metano com o IRB 70% por meio de aterros nas microrregiões de Cascavel, Foz do Iguaçu e Toledo	58
Gráfico 6. Recuperação de gás metano com o IRB 70% por meio de aterros na MROP	58
Gráfico 7. Comportamento das curvas de potências da microrregião de Cascavel	60
Gráfico 8. Comportamento das curvas de potências da microrregião de Foz do Iguaçu	60
Gráfico 9. Comportamento das curvas de potências da microrregião de Toledo	61
Gráfico 10. Comportamento das curvas de potências da MROP	61
Gráfico 11. Potência média disponível da microrregião de Cascavel	63
Gráfico 12. Potência média disponível da microrregião de Foz do Iguaçu	63
Gráfico 13. Potência média disponível da microrregião de Toledo	63
Gráfico 14. Potência média disponível da MROP	64
Gráfico 15. Potencial de geração de energia elétrica das microrregiões utilizando a Taxa 01 para incineração do RSU	71
Gráfico 16. Potencial de geração de energia elétrica das microrregiões utilizando a Taxa 02 para incineração do RSU	71
Gráfico 17. Potencial de geração de energia elétrica da MROP utilizando Taxa 01 e Taxa 02 para incineração do RSU	72

LISTA DE SÍMBOLOS

°C	Graus Celsius
C	Carbono
CH ₄	Metano
CO ₂	Dióxido de Carbono
G.l ⁻¹	Gramas por litro
Gg	Gigagrama
Gg.ano ⁻¹	Gigagrama por ano
GW	Gigawatts
GWh	Gigawatts hora
h	Hora
H	Hidrogênio
h. ano ⁻¹	Hora por ano
H ₂ O	Água
HCl	Ácido clorídrico
kcal.kg ⁻¹	Quilocaloria por quilograma
Kg	Quilograma
kg C. kg ⁻¹ RSU	Quilograma de carbono por quilograma de resíduo sólido urbano
kg. m ³	Quilograma por metros cúbicos
kg.hab ⁻¹ .dia ⁻¹	Quilo por habitante por dia
km ²	Quilômetro quadrado
kW	Quilowatts
kWh	Quilowatts hora
kWh.Gg ⁻¹	Gigawatts hora por gigagrama
kWh.m ⁻³ CH ₄	Quilowatts hora por metro cúbico de metano
L	Litro
m ³	Metros cúbicos
m ³ CH ₄ .ano ⁻¹	Metros cúbicos de metano por ano
m ³ CH ₄ .h ⁻¹	Metros cúbicos de metano por hora
m ³ .ano ⁻¹	Metros cúbicos por ano
m ³ .Gg ⁻¹ .ano ⁻¹	Metros cúbicos por gigagrama por ano
m ³ CH ₄ . kg ⁻¹	Metros cúbicos de metano por quilograma

Mj .kg ⁻¹	Megajoule por quilograma
Mtpe	Milhões de toneladas equivalentes de petróleo
MW	Megawatts
MWh.ano ⁻¹	Megawatts hora por ano
N ₂	Nitrogênio
N ₂ O	Óxido nitroso
Ni	Níquel
O ₂	Oxigênio
ppm	Partes por milhão
SF ₆	Hexafluoreto de enxofre
SO _x	Dióxido de enxofre
TWh	Watt hora
TWh.ano ⁻¹	Terawatt hora por ano
Zn	Zinco

LISTA DE ABREVIATURAS

ABLP	Associação Brasileira de Resíduos Sólidos e Limpeza Pública
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CDR	Combustível Derivado de Resíduo
DA	Digestão Anaeróbia
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ESMAP	<i>Energy Sector Management Assistance Program</i> (Programa de Assistência à Gestão do Setor de Energia)
Hab.	Habitante
HFCs	Hidrofluorcarbonos
IAP	Instituto Ambiental do Paraná
IEA	<i>International Energy Agency</i> (Agência Internacional de Energia)
IBAM	Instituto Brasileiro de Administração Municipal
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPARDES	Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> (Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa)
IPT	Instituto de Pesquisa Tecnológica
IRB	Índice de Recuperação de Biogás
MB	<i>Mass Burn</i> (Queima de massa)
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MROP	Mesorregião Oeste do Paraná
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
PFCs	Perfluorcarbonos
pH	Potencial Hidrogeniônico
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PNUD	Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento
RCE	Redução Certificada de Emissão
RDF	<i>Refused Derived Fuel</i> (Combustível Derivado de Resíduo)

RSU	Resíduo Sólido Urbano
SEMA	Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos
SUDERHSA	Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental
UNFCCC	<i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i> – Quadro (Convenções das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas)
UNSTAT	<i>United Nations Statistical Commission</i> (Divisão de Estatística das Nações Unidas)
WTE	<i>Waste-to-energy technology</i> (Tecnologia de conversão de resíduos em energia)

KLAUS, O. L. Potencial de aproveitamento de Resíduos Sólidos Urbanos da Mesorregião Oeste do Paraná para geração de energia elétrica (2013). Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Energia na Agricultura), Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Orientador: Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza.

RESUMO

Diversos países estão empenhados em desenvolver novas tecnologias que visam a substituir uma parcela de combustíveis fósseis por combustíveis alternativos, seguindo uma nova ordem mundial que busca repensar as formas de obtenção e geração de energia elétrica, preservando, assim, o meio ambiente. Frente a essa realidade, o presente trabalho estimou o potencial de geração de energia elétrica, utilizando os resíduos sólidos urbanos (doravante RSU) gerados na Mesorregião Oeste do Paraná e em suas microrregiões, Cascavel, Foz do Iguaçu e Toledo. Foram avaliadas tecnologias de recuperação energética da biomassa de RSU em dois cenários. No Cenário 01 aplicou-se o aproveitamento do gás metano, oriundo de aterro sanitário, e o resultado foi dependente de alguns fatores, tais como: a tecnologia de conversão de energia, aplicando grupo gerador com eficiência de 31% (Módulo 1), 35,8% (Módulo 2), 38,9% (Módulo 3) e 33% (Módulo 4), utilizando microturbina; além do índice de recuperação de biogás de 50% e 70%. E no Cenário 02 o aproveitamento energético através da incineração, adotando taxas de produção de eletricidade por incineração, sendo, Taxa 01 de 230 kWh. Gg⁻¹ RSU e Taxa 02 de 430 kWh. Gg⁻¹ RSU. Os potenciais produzidos pelos cenários avaliados foram aplicados para suprir a demanda de energia elétrica no setor rural e residencial da Mesorregião Oeste do Paraná e de suas microrregiões. Entre os cenários estudados, a incineração (Cenário 02) obteve melhores resultados de geração de energia elétrica. Constatou-se ainda que a Mesorregião Oeste do Paraná tem o potencial de gerar 130.604 MWh.ano⁻¹ (Taxa 02) com a incineração dos RSU, e no que diz respeito às microrregiões: Cascavel potencial de 51.990 MWh.ano⁻¹ (Taxa 02); Foz do Iguaçu de 49.090 MWh.ano⁻¹ (Taxa 02); e Toledo de 45.383 MWh.ano⁻¹ (Taxa 02). Esses potenciais podem suprir uma demanda de energia elétrica de 27,10 % no setor rural e 15,84% no setor residencial, considerando toda Mesorregião Oeste do Paraná. No caso do Cenário 01, constatou-se que o aproveitamento do gás metano por meio de aterro sanitário mostrou melhor resultado para a Mesorregião Oeste do Paraná, principalmente, quando utilizado o Módulo 3 – coletando 70% do biogás gerado no aterro, o que produziu uma potência de 56.240 MWh.ano⁻¹. E nas microrregiões a produção foi de: Cascavel, 19.840 MWh.ano⁻¹; Foz do Iguaçu, 18.840 MWh.ano⁻¹; e Toledo de 17.600 MWh.ano⁻¹. Esses potenciais podem suprir uma demanda energética de 11,67% no setor rural e 6,82 % no setor residencial. Diante dos resultados, verificou-se que o aproveitamento energético de RSU pode ser considerado uma alternativa estratégica regional ou local para a Mesorregião Oeste do Paraná.

PALAVRAS-CHAVE: biomassa, recuperação energética, energias renováveis.

KLAUS, O. L. **Potential use of Solid Waste of the West of Paraná Mesoregion for electricity generation** (2013). Master (Graduate Program in Energy in Agriculture), Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Leader: Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza.

ABSTRACT

Several countries are committed to developing new technologies that aim to replace a portion of fossil fuels with alternative fuels, according to a new world order that seeks to rethink the ways of obtaining and power generation, thus preserving the environment. Facing this reality, the present study estimated the potential for power generation using municipal solid waste (hereinafter MSW) generated in Meso West of Paraná and its micro, Cascavel, Foz do Iguaçu and Toledo. Biomass from MSW in two scenarios of energy recovery technologies were evaluated. In Scenario 01 applied the use of methane gas coming from the landfill, and the result was dependent on certain factors such as: the technology of energy conversion, applying the generator with an efficiency of 31% (Module 1), 35,8% (Module 2), 38,9% (Module 3), 33% (Module 4) using microturbine; beyond the biogas recovery rate of 50% and 70%. And in Scenario 02 the energy recovery through incineration, adopting production of electricity through incineration rates being Rate 01 of 230 kWh.Gg⁻¹ and USW Rate 02 of 430 kWh.Gg⁻¹MSW. Potential produced by the evaluated scenarios were applied to meet the demand of electricity in rural and residential sector of Meso West of Paraná and its micro. Among the scenarios considered, incineration (Scenario 02) achieved better results to generate electricity. It was further observed that the Meso West of Paraná has the potential to generate 130.604 MWh.ano⁻¹ rate (02) with the MSW incineration, and with regard to micro: Rattlesnake potential 51.990 MWh.ano⁻¹ (Rate 02), Iguassu Falls of 49.090 MWh. ano⁻¹ rate (02) and Toledo 45.383 MWh.ano⁻¹ rate (02). These potentials can meet a demand for electricity of 27,10% in rural areas and 15,84% in the residential sector, considering all Meso West of Paraná. In the case of Scenario 01, it was found that the use of methane gas through landfill showed better results for Meso West of Paraná, especially when used Module 3 - collecting 70% of the biogas generated in the landfill, which produced an output of 56.240 MWh.ano⁻¹. And in the micro production was: Cascavel, 19.840 MWh.ano⁻¹, Foz do Iguaçu, 18.840 MWh.ano⁻¹, and Toledo 17.600 MWh.ano⁻¹. These potentials can learn an energy demand of 11,67% in the rural sector and 6,82% in the residential sector. Given the results, it was found that the energy use of MSW can be considered a regional or local strategic alternative for Meso West of Paraná.

KEYWORDS: biomass, energy recovery, renewable energy.

ÍNDICE

RESUMO	xiv
ABSTRACT	xv
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivo	2
1.1.1 Objetivo geral.....	2
1.1.2 Objetivos específicos	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Biomassa: Uma Fonte de Energia Renovável no Cenário Energético	4
2.1.1 Cenário energético no Brasil.....	4
2.1.2 Energia da biomassa.....	4
2.2 Definições e Conceitos de Biomassa.....	5
2.3 Panorama dos RSU no Brasil	7
2.3.1 Conceitos e definições.....	7
2.3.2 Origem e classificação	8
2.3.3 Caracterização do resíduo sólido urbano	9
2.3.4 Composição gravimétrica do RSU.....	10
2.3.5 Geração de RSU no Brasil	12
2.3.5.1 Geração e destinação de RSU no estado do Paraná.....	14
2.4 Legislação Aplicada ao RSU.....	15
2.4.1 Consórcios intermunicipais de resíduos sólidos	16
2.5 Alternativas de Tratamento e Destinação Final de RSU	17
2.5.1 Aterros.....	17
2.5.1.1 Aterros sanitários.....	17
2.5.1.2 Aterro controlado.....	18
2.5.1.3 Lixão.....	18
2.5.2 Digestão anaeróbia	18
2.5.3 Incineração	18
2.5.4 Reciclagem.....	19
2.5.5 Compostagem.....	20
2.5.6 Pirólise	20

2.6	Protocolo de Quioto e seus Mecanismos Cooperativos para Redução de Emissões de Gases Causadores do Efeito Estufa	20
2.6.1	Mecanismo desenvolvido limpo na aplicação à redução de emissões de gases gerados nas áreas de disposição final de RSU	21
2.7	Tecnologias de Recuperação Energética de RSU	22
2.8	Aterro Sanitário	23
2.8.1	Digestão anaeróbia	23
2.8.2	Biogás.....	23
2.8.3	Composição do biogás	23
2.8.4	Produção de biogás em aterro sanitário	24
2.8.5	Fatores que influenciam na produção de biogás de aterro	26
2.8.6	Geração de energia elétrica com biogás.....	27
2.8.7	Tecnologias de plantas de energia em aterro sanitário.....	29
2.8.7.1	Tecnologias de conversão de energia aplicadas ao biogás de aterro sanitário	29
2.8.8	Comparação entre as tecnologias de conversão de energia	30
2.9	Incineração de RSU	30
2.9.1	Processo de incineração	31
2.9.2	Sistemas de incineradores	32
2.9.3	Tipos de incineração de RSU	33
2.9.4	Tratamento dos gases nos incineradores	34
2.9.5	Geração de energia elétrica através da incineração de RSU	35
2.9.6	Situação atual da incineração no Brasil	36
3	MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1	Local do Estudo.....	37
3.1.1	Caracterização da área de estudo	37
3.2	Potencial de Produção de RSU.....	39
3.3	Potencial Técnico de Geração de Energia Elétrica com RSU	40
3.3.1	Definições dos cenários avaliados	40
3.3.2	Cenário 01 - Produção de eletricidade com biogás de aterro sanitário	41
3.3.2.1	Estimativa de geração de metano em aterro sanitário	41
3.3.2.2	Índice de recuperação de biogás (IRB).....	45
3.3.2.3	Módulos adotados para as tecnologias de conversão de energia.....	45
3.3.2.4	Vida útil do aterro sanitário	45
3.3.3	Cenário 02 - Produção de energia elétrica por incineração de RSU	46

3.4 Média de Produção de Energia Elétrica em Função da Capacidade de Operação	47
3.5 O Potencial de Substituição de Energia Elétrica Gerado pelos RSU no Setor Rural e Residencial nas Microrregiões e toda MROP	48
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	50
4.1 Cenário 01 - Avaliação de Produção de Eletricidade com Metano de Aterro Sanitário.....	50
4.1.1 Levantamento da produção de RSU e gás metano nos aterros sanitários da MROP	50
4.1.2 Potencial de energia elétrica por meio de aterro sanitários das microrregiões da MROP	59
4.2 Cenário 02 - Avaliação de Produção de Eletricidade com Incineração	65
4.2.1 Levantamento de produção de eletricidade gerada pela incineração de RSU	66
4.3 Suprimentos da Demanda de Energia Elétrica no Setor Rural e Residencial da MROP, Aplicando a Estimativa do Potencial Energético de RSU Produzido na Mesorregião	73
5 CONCLUSÃO.....	79
REFERÊNCIAS	81

1 INTRODUÇÃO

A biomassa foi responsável por atender a maior parte das necessidades de energia da humanidade durante milhares de anos. Mas, com o início da era dos combustíveis fósseis, meados do século XIX, sua utilização começou a diminuir nos países industrializados. O carvão passou a ser a principal fonte primária de energia na matriz energética mundial, sendo superado pelo petróleo a partir da década de 1960. Entretanto, com os choques do petróleo na década de 1970, a biomassa voltou a ser vista por muitos governantes e formuladores de políticas como um recurso energético viável e doméstico, com potencial para reduzir a dependência do petróleo (KLASS, 1998; SMIL, 2002).

Além do interesse dos países em reduzir a dependência em relação ao uso de petróleo, com a busca de energias renováveis, outro fator que vem influenciando na tomada de decisão é a crescente preocupação com as possíveis consequências negativas das mudanças climáticas, e as evidências da relação entre essas mudanças e o uso de combustíveis fósseis, responsáveis por mais da metade das emissões antrópicas dos gases causadores do efeito estufa. Isso reforça o interesse em ampliar a participação das fontes renováveis de energia.

Dentre as fontes das matrizes energéticas, têm-se uma visão positiva do uso da biomassa, que deverá se manter estável ou até mesmo aumentar por duas razões. Primeiro, pelo crescimento populacional e, segundo, devido à urbanização e à melhoria nos padrões de vida (HALL et al., 2000).

A biomassa é considerada uma das principais alternativas para a diversificação da matriz energética. Sua origem pode ser de âmbito florestal, resíduos de atividades agrícolas, ou rejeitos urbanos e industriais. Com essa fonte é possível obter energia elétrica e biocombustíveis, como o biodiesel e o etanol, cujo consumo é crescente em substituição aos derivados de petróleo, como o óleo diesel e a gasolina, além de reduzir a emissão de gases causadores do efeito estufa (ANEEL, 2008).

O aumento do consumo energético está diretamente relacionado ao desenvolvimento de um país, o que, conseqüentemente, ocasiona o crescimento da geração de lixo urbano por habitante. E no caso do problema energético, do qual o consumo é crescente, muitas vezes descontrolado, os impactos ambientais e sociais causados pela falta de energias tradicionais também mobilizam os setores públicos e privados, no desafio de conseguirem adquirir alternativas para sua geração. Nesse caso, a utilização da biomassa de resíduos sólidos urbanos (RSU) é vista como fonte geradora de energia que consolida uma alternativa promissora, capaz de minimizar problemas ambientais e com perspectivas de gerar dividendos

aos investidores do segmento.

Porém, o aproveitamento energético de RSU pode ser considerado uma alternativa promissora, mas, não se trata de um potencial suficiente para sustentar uma estratégia de expansão da oferta de energia elétrica do país no longo prazo. Contudo, ainda pode-se afirmar que a geração de eletricidade a partir de RSU é elemento importante de uma estratégia regional ou local e, portanto, não deve ser desconsiderada (EPE, 2008).

O Plano Nacional de Energia 2030 considera a possibilidade de instalação de até 1.300 MW nos próximos 25 anos em termelétricas utilizando RSU (EPE, 2008). Diante desse quadro, são esperados avanços importantes no aproveitamento energético do lixo urbano. Por esse fato, é de suma importância avaliar o potencial energético de RSU nos municípios brasileiros. Nesse viés, este estudo realizou levantamento de dados na Mesorregião Oeste do Paraná (MROP), estimando o potencial de geração de energia elétrica das microrregiões de Cascavel, Foz do Iguaçu e Toledo, constituída por 50 municípios.

Esse levantamento proporcionou uma avaliação do potencial energético de RSU gerado nas microrregiões da MROP, mostrando uma possibilidade de aplicar o Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos e realizar o aproveitamento energético de RSU. Por meio das diretrizes aplicadas pela Lei nº 12.305/10, os municípios poderão optar por soluções consorciadas intermunicipais para a gestão dos resíduos sólidos, sendo incluídas a elaboração e a implementação de plano intermunicipal, ou de outras ações que se inserirem de forma voluntária nos planos microrregionais de resíduos sólidos.

Assim, a análise do potencial técnico de geração de energia elétrica de RSU da MROP e de suas microrregiões oferece a possível recuperação energética em diferentes aplicações de tecnologias. As estimativas de quantidade de energia elétrica aproveitada a partir de RSU são feitas com base em duas propostas de cenários, aproveitando o gás metano oriundo de aterro sanitário e a partir da incineração de RSU.

1.1 Objetivo

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo do presente trabalho foi estimar o potencial técnico de geração de energia elétrica, utilizando a biomassa de RSU das microrregiões de Foz do Iguaçu, Cascavel e Toledo, que constituem a MROP, para avaliar as tecnologias de recuperação energéticas,

aplicando dois cenários: no Cenário 01 foi considerado o aproveitamento do gás metano, oriundo de aterro sanitário; e no Cenário 02 o aproveitamento de RSU para incineração.

1.1.2 Objetivos específicos

- determinar o potencial de geração de biogás e eletricidade para cada microrregião e toda a MROP, utilizando o gás metano gerado em aterros sanitários;
- determinar o potencial de eletricidade gerado pelo sistema de incineração para cada microrregião e toda MROP;
- estimar o potencial de substituição de energia elétrica no setor rural e residencial nas microrregiões e toda MROP.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Biomassa: Uma Fonte de Energia Renovável no Cenário Energético

2.1.1 Cenário energético no Brasil

No ano de 2011, a oferta de energia elétrica no Brasil atingiu 567,6 TWh, resultado 3,1% superior ao ano de 2010, o qual foi de 550,4 TWh. Frente a esse resultado, observa-se que o país apresenta uma matriz de geração elétrica de origem predominantemente renovável, correspondendo a 88,9% do total, na qual a geração hidráulica domina 81,9%, a biomassa 6,6% e a eólica 0,5% (EPE, 2012).

Entre as fontes de geração de energia renovável no Brasil, a biomassa vem se destacando no cenário nacional. No setor de geração de energia elétrica, entre as biomassas mais utilizadas estão a lenha, o bagaço de cana, a lixo e outras recuperações (EPE, 2012).

O Brasil está numa situação confortável, pois os números superam com grande vantagem o cenário mundial, contribuindo para a redução das emissões de carbono na atmosfera, quando comparado a outros países.

2.1.2 Energia da biomassa

As políticas públicas direcionadas para a redução de emissão de carbono e outros tipos de poluentes têm sido o motor do incentivo à demanda de energia renovável nos países.

A produção de energia através da biomassa será promissora nos próximos anos, tanto para o mercado interno quanto para o internacional, sendo considerada uma das principais alternativas para a diversificação da matriz energética e a consequente redução da dependência por combustíveis fósseis. Pois, estima-se que a quantidade de biomassa existente na Terra é da ordem de 1,8 trilhões de toneladas (ANEEL, 2008).

No ano de 2010 o uso da biomassa tradicional representou 751 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (Mtep), ou seja, 44,6% do uso total de energia renovável, tendo em vista um maior crescimento mundial no que tange a substituição do uso da biomassa tradicional por biomassa moderna, basicamente os biocombustíveis gasosos e líquidos (IEA, 2012).

As principais matérias-primas da biomassa utilizadas atualmente para geração de energia elétrica e calor são a madeira, os resíduos agrícolas, as plantas energéticas e os

resíduos municipais. De acordo com últimos dados da ANEEL (2008), existem 302 termelétricas no Brasil movidas a biomassa, que correspondem a um total de 5,7 mil MW instalados. A Tabela 1 define as fontes de biomassa instaladas no país e o potencial de energia.

Tabela 1. Potencial de energia por fontes de biomassas instaladas no Brasil

Biomassa	Usinas instaladas no Brasil	Potencial de energia (MW)
Licor negro (resíduo da celulose)	13	944
Bagaço de cana	252	4000
Madeira	27	232
Biogás	03	45
Casca de arroz	04	21

Fonte: ANEEL (2008)

Outra fonte de biomassa utilizada para geração de energia elétrica é o aproveitamento de RSU, uma técnica muito explorada em países desenvolvidos, que vem se destacando. Várias formas de aproveitamento energético de RSU podem ser aplicadas, e dependendo da tecnologia para conversão os RSU são transformados em uma forma de energia útil, tais como: eletricidade; vapor; combustível para caldeiras ou fogões; combustível veicular ou para abastecer gasodutos com gás de qualidade.

No Brasil a técnica é uma prática recente e pouco difundida, porém, algumas usinas já se encontram em funcionamento, como: a Usina de São João, com capacidade de produção de 200 mil MWh.ano⁻¹, no estado de São Paulo; a usina do Aterro Bandeirantes, com potencial de gerar aproximadamente 170 mil MWh.ano⁻¹, sendo comercializada pela prefeitura de São Paulo; e no Rio de Janeiro, o Aterro de Jardim Gramacho, que após seu fechamento, fornecerá aproximadamente 200 mil m³.dia⁻¹ de gás metano pelos próximos 15 anos para a refinaria Duque de Caxias da Petrobrás, substituindo o gás natural utilizado como insumo energético.

2.2 Definições e Conceitos de Biomassa

A biomassa é constituída de toda massa da biosfera, que engloba simultaneamente tanto os seres vivos como também o conjunto dos produtos orgânicos gerados por estes seres,

mas que não se encontra completamente decomposto em moléculas elementares. Essa biomassa contém uma energia química que, para as plantas verdes, provém da conversão da energia luminosa graças à fotossíntese. Sua origem pode ser florestal, ou ainda advinda dos produtos e subprodutos ou resíduos. Nesse contexto, a madeira é a principal fonte, assim como os subprodutos e resíduos de atividades agrícolas, como a soja, arroz, cana-de-açúcar, entre outros, e os rejeitos urbanos e industriais, que correspondem aos sólidos ou líquidos (ANEEL, 2008; CORTEZ et al. 2008; COUTO et al. 2004).

Os recursos energéticos da biomassa podem ser classificados de várias maneiras. Segundo Lora e Nogueira (2003), é necessário reconhecer que aos fluxos de energia da biomassa são associados aos biocombustíveis, que por sua vez dependem da origem da matéria que os constitui. Assim, classificam-se os biocombustíveis da madeira (dendrocombustíveis), os combustíveis de plantação florestal (agrocombustíveis) e os resíduos urbanos. No Quadro 1 é apresentada a classificação e a definição dos biocombustíveis.

Quadro 1. Classificação dos biocombustíveis de biomassa

1 Nível	2 Nível	Definição
Biocombustíveis da madeira (Dendrocombustíveis)	Combustíveis diretos da madeira	Madeira produzida para fins energéticos, usada diretamente ou indiretamente como combustível;
	Combustíveis indiretos da madeira	Biocombustíveis sólidos, líquidos ou gasosos, subprodutos da exploração florestal e resultante do processamento industrial da madeira para fins energéticos;
	Combustíveis de madeira recuperada	Madeira usada diretamente ou indiretamente como combustível, derivada de atividades socioeconômicas que empregam produtos de origem florestal;
Biocombustíveis não florestais (agrocombustíveis)	Combustíveis de plantação energética	Tipicamente combustíveis sólidos e líquidos produzidos a partir de plantações anuais, como é o caso do álcool da cana-de-açúcar;
	Subprodutos agrícolas	Resíduos de colheita e outros tipos de subprodutos de culturas, como palha e folha;
	Subprodutos animais	Basicamente esterco de aves, bovinos e suínos;
	Subprodutos agroindustriais	Subprodutos de agroindustriais, como bagaço de cana e a casca de arroz;
Resíduos urbanos		Resíduos sólidos e líquidos gerados em cidades e vilas.

Fonte: Lora e Nogueira (2003).

Para a transformação da biomassa em bioenergia existem diversificadas rotas de

conversão. Várias tecnologias de conversão têm sido desenvolvidas devido às diferentes características físicas e químicas da biomassa, e o tipo de conversão final (calor, potência, combustível para transporte) (WORLD ENERGY COUNCIL, 2010). A Figura 1 mostra as rotas de conversão da biomassa.

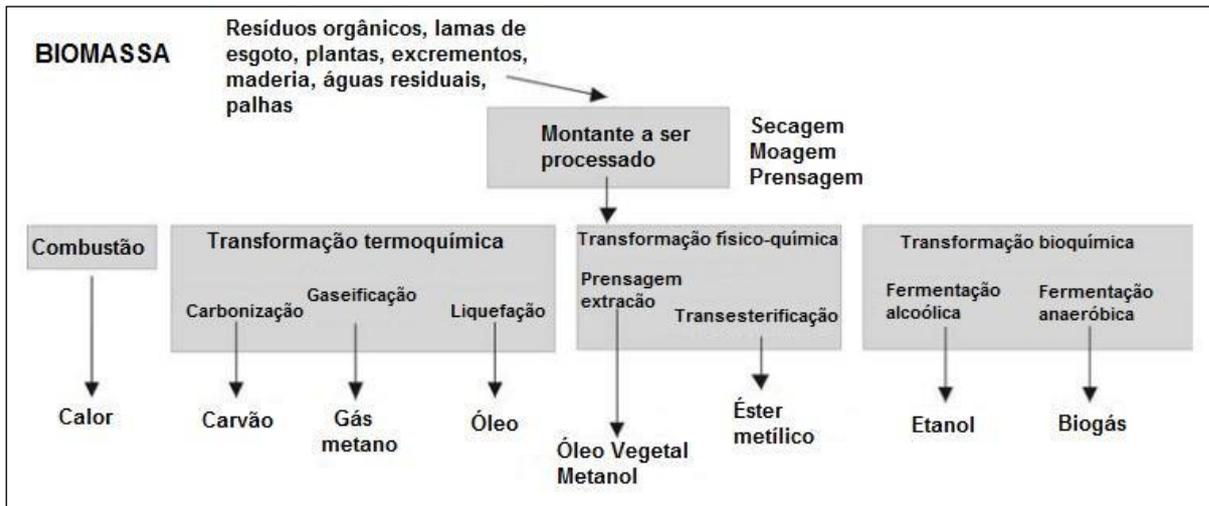


Figura 1. Rota de conversão energética da biomassa.

Fonte: adaptado de Dublein (2008)

No caso dos resíduos urbanos compreendem os resíduos sólidos e líquidos, e constituem-se em uma grande fonte de biomassa. Os sólidos constituem-se no lixo, que consiste numa massa heterogênea com metais, plásticos, vidros, restos celulósicos e vegetais. Portanto, o teor de matéria orgânica do lixo brasileiro corresponde aproximadamente a 60%, conferindo um bom potencial energético e apresentando um poder calorífico inferior médio de $1300 \text{ kcal.kg}^{-1}$ ou $5,44 \text{ MJ.kg}^{-1}$ (LORA; NOGUEIRA, 2003; CORTEZ et al., 2008).

Os métodos empregados para conversão energética de RSU podem ser através da queima, da gaseificação e da biodigestão nos aterros sanitários, técnicas que serão detalhadas ao longo do trabalho.

2.3 Panorama dos RSU no Brasil

2.3.1 Conceitos e definições

A palavra lixo origina-se do latim *lix*, significa cinzas ou lixívia. Mas, atualmente, o lixo é identificado em alguns países de língua espanhola como *basura*, e em países de língua inglesa como *refuse*, *garbage*, *solid waste* (BIDONE; POVINELLI, 1999).

No Brasil a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010, define o lixo como:

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

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

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), a partir da NBR 10.004/2004, traz uma definição de lixo relacionando-a com resíduos sólidos:

[...] Resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível [...]. (ABNT, 2004, p.01).

2.3.2 Origem e classificação

A classificação do resíduo sólido leva em consideração a origem, conforme exposto a seguir (BIDONE; POVINELLI, 1999; PINTO, 1979; PNUD, 2010):

- a) urbanos: os originários de resíduos domiciliares, limpeza urbana, estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços;
- b) industriais: os gerados nos processos produtivos e instalações industriais;
- c) serviços de saúde: os gerados nos serviços de saúde, como hospitais, clínicas médicas e veterinárias, de centros de saúde, de consultórios odontológicos e de farmácia;
- d) resíduos da construção civil: os gerados em construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e

- escavação de terrenos para obras civis;
- e) resíduos agrossilvopastoris: os gerados nas atividades agropecuárias e silviculturas, incluídos os relacionados a insumos utilizados nessas atividades;
 - f) resíduos de serviços de transportes: os originários de portos, aeroportos, terminais alfandegários, rodoviários e ferroviários, e passagens de fronteira;
 - g) resíduos de mineração: os gerados na atividade de pesquisa, de extração ou beneficiamento de minérios.

Os resíduos sólidos são definidos segundo sua origem e classificados de acordo com seu risco em relação ao homem e ao meio ambiente, conforme exposto pela ABNT a partir da NBR 10.004 (ABNT, 2004):

- Classe I - Perigosos: apresentam risco à saúde pública ou ao ambiente, por conterem as propriedades: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade; e,
- Classe II - Não perigosos: classificam-se em duas categorias A e B, nas quais:
 - *Classe II A* – aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduo classe I – Perigosos ou de resíduo classe II B – Inertes. Podem conter propriedade como combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água; e,
 - *Classe II B* – Inertes: Aqueles resíduos que, quando amostrados de forma representativa, segundo a ABNT NBR 10007, e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme ABNT NBR 10006, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspectos cor, turbidez, dureza e sabor.

2.3.3 Caracterização do resíduo sólido urbano

Segundo Lima (2004), a caracterização do resíduo sólido é de suma importância para melhor escolha e opção por mais adequado sistema de tratamento e disposição final.

O conhecimento das características físicas, químicas e biológicas, apresentadas no Quadro 2, possibilita o gerenciamento integrado de RSU, podendo-se calcular a capacidade e tipos de equipamentos de coleta, tratamento e destinação final.

Quadro 2. Características físicas, químicas e biológicas para melhor limpeza pública, análise e disposição

Características	Importância
Geração per capita	Quantidade de lixo gerado por habitante num período de tempo específico. É fundamental para o planejamento de todo sistema de gerenciamento de resíduo sólido, principalmente no dimensionamento de instalação e equipamentos.
Composição Gravimétrica	Indica a possibilidade das frações de aproveitamento para comercialização de materiais recicláveis e da matéria orgânica para produção de composto orgânico
Peso específico aparente	Relação da massa e do volume do resíduo sólido. Fundamental para o correto dimensionamento de frota de coleta.
Teor de umidade	Quantidade de água contida na massa de lixo. Influencia a escolha da tecnologia de tratamento e equipamentos de coleta. Tem influência notável no poder calorífico, densidade e velocidade de decomposição biológica da massa do resíduo sólido.
Poder Calorífico	É a quantidade de calor liberada durante a combustão de 1 kg do mesmo. Importante para avaliar a instalação de incineração.
Composição química	Normalmente são analisados nitrogênio, potássio, enxofre, carbono, relação C:N, pH e sólidos voláteis. Ajuda a definir a forma mais adequada para o tratamento e disposição final dos resíduos.
Relação C:N	Fundamental para estabelecer a qualidade do composto produzido.
Características biológicas	Fundamentais na fabricação de inibidores de cheiro e retardadores na decomposição da matéria orgânica presente no resíduo sólido.
pH	Indica o grau de corrosividade dos resíduos coletados.

Fonte: IPT (2000); IBAM (2001); LIMA (2004).

2.3.4 Composição gravimétrica do RSU

Vários fatores influenciam a composição do RSU de um local, variando em função do número de habitantes do município, nível educacional da população, o poder aquisitivo, o nível de renda familiar, os hábitos e os costumes, as condições climáticas e sazonais e a industrialização de alimentos (LIMA, 2004; PINTO, 1979; VIEIRA et al. 2000).

A maioria dos estudos sobre a composição gravimétrica dos materiais presentes nos resíduos sólidos no Brasil é realizada com amostras obtidas dos resíduos recém coletados, pois as propriedades dos resíduos sólidos aterrados são de difícil quantificação, por esses serem muito heterogêneos, variarem em diferentes lugares, bem como devido à dificuldade de obtenção de amostras representativas e inexistência de amostradores e procedimentos de ensaios adequados, e, ainda, por essas propriedades mudarem drasticamente com o tempo (CUSSIOL et al. 2006; FARIAS; JUCÁ, 2000; JUCÁ et al. 2002).

A Tabela 2 mostra a média de composição percentual de RSU em alguns países,

destacando o contraste de valores obtidos entre países de primeiro mundo como os Estados Unidos, Alemanha, Holanda e países em desenvolvimento, no caso o Brasil.

Tabela 2. Percentual de composição média de RSU em alguns países

Materiais	Percentual de composição média de RSU (%)					
	Brasil	Malásia	Turquia	EUA	Holanda	Alemanha
Vidro	3.0	3.18	1.70	8.20	14.50	10.40
Metal	4.0	4.22	1,70	8.70	6.70	3.80
Plástico	3.00	11.22	4,30	6.50	6.00	5.80
Papel	25.00	23.73	11.00	41.00	22.50	18.80
Matéria orgânica	65.00	57.65	81.30	35.60	50.30	61.20

Fonte: IBAM (2001)

A massa de RSU constitui-se de matéria orgânica degradável ou resíduo úmido (resto animal ou vegetal) e de matéria orgânica não degradável ou resíduo seco (plástico, vidro, couro, metal e outros) (LINO, 2009). Nos países em desenvolvimento predomina a geração de resíduo composto por matéria degradável, menos no caso da Índia, conforme mostra a Tabela 3.

Tabela 3. Percentual de material degradável e não degradável em países em desenvolvimento

Países	População em 2007 (milhões hab.)	Ano	Material degradável (%)	Material não degradável (%)
Croácia	5	2002	80	40
Índia	1136	2004	35	65
México	110	2006	52	48
Turquia	75	2004	98	2
Brasil	191	2004	60	40

Fonte: UNSTAT (2007)

Segundo o Ministério do Meio Ambiente (MMA) do total de RSU coletados, a composição média do Brasil é de 31,9% de resíduos secos e 51,4% de resíduos úmidos (MMA, 2012). Portanto, a composição média de RSU no país apresenta um maior teor de matéria orgânica do que de resíduos secos, como mostra a Figura 2.



Figura 2. Composição gravimétrica de RSU no Brasil.

Fonte: adaptado MMA (2012)

Conforme observado em Abrelpe (2012), Pereira Neto (2007), Philippi Júnior (1999), tem-se, de um modo geral, a participação de diferentes materiais na fração total de RSU no Brasil, conforme é apresentado na Figura 3.

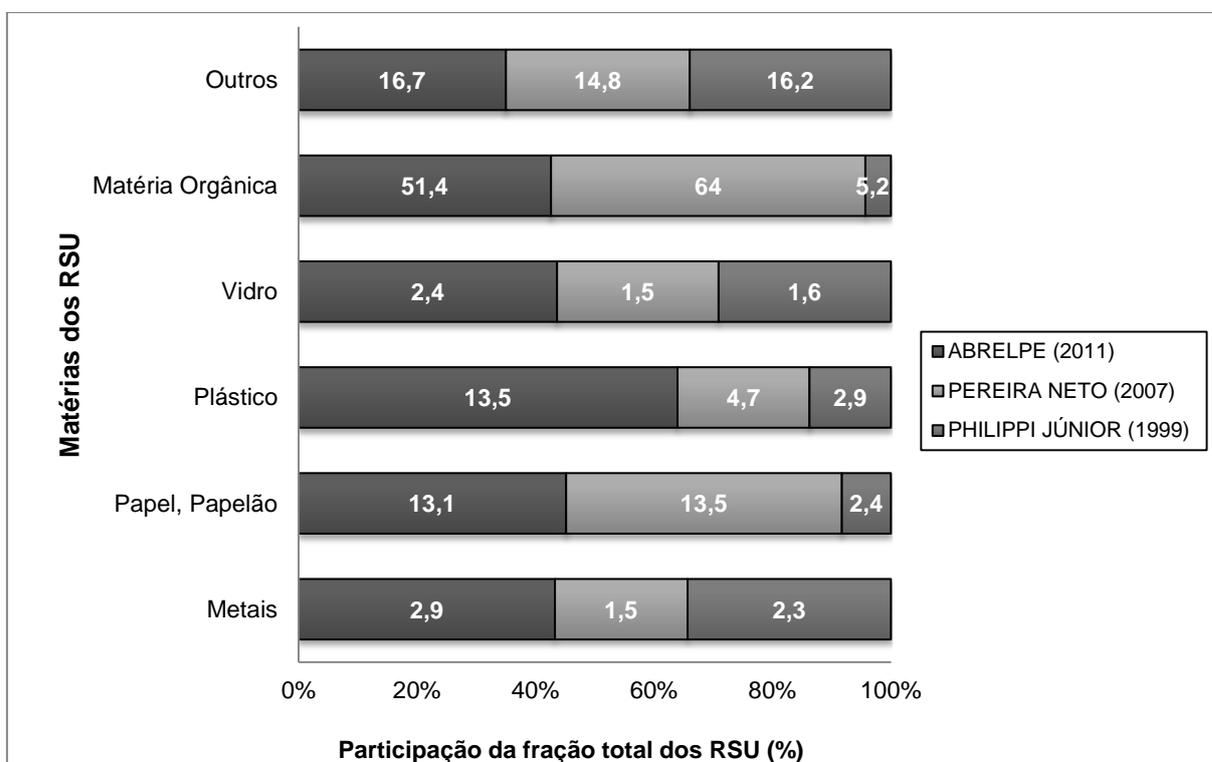


Figura 3. Composição gravimétrica dos RSU gerados ao longo dos anos no Brasil, segundo referências.

Fonte: ABRELPE (2012), PEREIRA NETO (2007), PHILIPPI JÚNIOR (1999).

2.3.5 Geração de RSU no Brasil

Nos últimos vinte anos, o resíduo sólido gerado no Brasil se modificou muito quanto à quantidade, à qualidade e à composição. Isso se deve ao crescimento acelerado das cidades e, ao mesmo tempo, às mudanças de hábitos dos cidadãos, o que vem gerando um resíduo muito diferente daquele que as cidades produziam anos atrás.

Entre os anos de 1991 a 2010 a população brasileira cresceu 12% e a produção de resíduos, no mesmo período, cresceu 90%. Somente no ano de 2010 em comparação ao ano de 2011 a geração de RSU no país registrou crescimento de 1,8%, índice percentual que é superior à taxa de crescimento populacional urbano, que foi de 0,9% no mesmo período. Isso resultou em um montante de 61.936.368 milhões Gg.ano⁻¹ de RSU (ABLP, 2011; ABRELPE, 2012).

Vários fatores influenciam a geração e a composição de RSU, como as variações sazonais e climáticas, hábitos e costumes da população, densidade demográfica, leis e regulamentações específicas, entre outros. Isso, infelizmente, é um fato inevitável no processo de geração de RSU, o qual tem seu aumento acelerado e torna-se um dos grandes problemas enfrentados atualmente (OLIVEIRA, 2004).

De acordo com a ABRELPE (2012), a geração *per capita* de RSU no Brasil foi estimada em 1,309kg.hab⁻¹ dia⁻¹, tendo a região Nordeste a maior geração de resíduos por habitante, e a região Sul a menor, com 0,905kg.hab⁻¹ dia⁻¹, conforme mostra a Tabela 4.

Tabela 4. Quantidade de RSU gerado no Brasil nos anos de 2010 a 2011

Região	2012		
	População Urbana (hab.)	RSU Gerado (Gg.dia ⁻¹)	Índice (kg.hab ⁻¹ dia ⁻¹)
Norte	12.010.233	13.754	1,145
Nordeste	39.477.754	51.689	1,309
Centro	12.829.644	16.055	1,251
Oeste			
Sudeste	75.812.738	98.215	1,295
Sul	23.583.048	21.345	0,905
Brasil	163.713.417	201.058	1,228

Fonte: ABRELPE (2012)

Na ausência de dados mais precisos, a geração *per capita* pode ser estimada, sendo considerada por muitos técnicos uma faixa de variação média para o Brasil de 0,5 a 0,8kg.hab⁻¹.dia⁻¹ de RSU, conforme mostra a Tabela 5 (IBAM, 2001).

Tabela 5. Estimativa utilizada para geração *per capita* por número de habitantes

Faixas mais utilizadas de geração <i>per capita</i>		
Tamanho da cidade	População urbana (habitante)	Geração <i>per capita</i> (kg.hab⁻¹ dia⁻¹)
Pequena	Até 30.000	0,50
Média	De 30 mil a 500 mil	De 0,50 a 0,80
Grande	De 500 mil a 5 milhões	De 0,80 a 1,00
Megalópole	Acima de 5 milhões	Acima de 1,00

Fonte: IBAM (2001)

2.3.5.1 Geração e destinação de RSU no estado do Paraná

A geração de RSU no estado do Paraná no ano de 2012 foi de 8.507 Gg.dia⁻¹, mas desta quantia gerada foram coletadas apenas 7.771 Gg.dia⁻¹ e destinada para disposição final. Portanto, a geração *per capita* de RSU é de 0.860 kg.hab⁻¹.dia⁻¹. Esses dados são apresentados na Tabela 6 (ABRELPE, 2012)

Tabela 6. Geração de RSU no estado do Paraná nos anos de 2011 e 2012

População Urbana		RSU Coletado				RSU Gerado (Gg.dia⁻¹)	
		kg.hab⁻¹.dia⁻¹		(Gg.dia⁻¹)			
2011	2012	2011	2012	2011	2012	2011	2012
8.974.350	9.035.534	0,855	0,860	7.672	7.771	8.401	8.507

Fonte: ABRELPE (2012)

O estado do Paraná está aos poucos regularizando a situação da destinação final de RSU, como mostra o Quadro 3, e 70% dos RSU gerados no estado estão sendo destinados para aterros sanitários, locais apropriados para a destinação dos resíduos de forma segura ao meio ambiente e para saúde pública. E assim, conseqüentemente, diminuindo a disposição inadequada em lixões, locais que causam poluição ambiental e danos a saúde pública, mas ainda essa inadequação revela um índice de 10,5% no estado (ABRELPE, 2012).

Quadro 3. Destinação final de RSU no estado do Paraná

Destinação	Aterro Sanitário		Aterro Controlado		Lixão	
	2011	2012	2011	2012	2011	2012
Ano	2011	2012	2011	2012	2011	2012
RSU (Gg.ano ⁻¹)	5.355	5.433	1.501	1520	816	818
Porcentagem (%)	69,8	70,0	19,6	19,5	10,6	10,5

Fonte: ABRELPE (2012)

2.4 Legislação Aplicada ao RSU

A gestão e manejo dos resíduos sólidos no Brasil são definidos pela Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305/10 e regulamentada pelo Decreto nº 7.404/10.

Entre os pontos mais importantes da PNRS (BRASIL, 2010), no que tange aos objetivos, aos instrumentos, e às diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, estão:

- a) responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos: a destinação correta dos resíduos é compartilhada em cadeia, desde a produção, passando pelo consumidor, até seu destino final. A responsabilidade é dividida a todos os envolvidos no processo de ciclo de vida dos produtos. Depois de descartado o resíduo, o cliente continua tendo a responsabilidade até que o ciclo de vida do produto se encerre.
- b) gestão integrada de resíduos sólidos: é um sistema de cooperação entre o governo federal, estados, municípios e companhias privadas. Por meio do qual os municípios poderão optar por soluções consorciadas intermunicipais, para a gestão dos resíduos sólidos, incluída a elaboração e implementação de plano intermunicipal, ou que se inserirem de forma voluntária nos planos microrregionais de resíduos sólidos.
- c) aproveitamento energético de RSU: poderão ser utilizadas tecnologias visando à recuperação energética de RSU, desde que comprove a sua viabilidade técnica e ambiental e com implantação de programas de monitoramento de emissão de gases tóxicos dentro das legalidades permitidas pelo órgão ambiental.

2.4.1 Consórcios intermunicipais de resíduos sólidos

A Lei Federal nº 11.107/05, de 06 de abril de 2005, que dispõe sobre as normas gerais de contratação de consórcios públicos, possibilita a relação vertical entre os três níveis de governo: federal, estadual e municipal.

Consórcio Intermunicipal é considerado uma alternativa para solução dos resíduos sólidos urbanos em microrregião, utilizando tratamento adequado, ou o aproveitamento e disposição final de RSU (OLIVEIRA, 1997).

Conforme Gomes e Suzuki (2009), o Departamento de Resíduos Sólidos da Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (SUDERHSA) do estado do Paraná realizou um estudo de regionalização da destinação final de RSU, no qual os resíduos gerados nos municípios partícipes do consórcio são destinados a um aterro regional, localizado dentro do território do respectivo consórcio.

Alguns critérios de planejamento foram adotados, como dados demográficos (população urbana), logísticos (malha viária existente e distância entre sedes urbanas, da Secretaria Estadual de Transportes) e outras diretrizes utilizadas como referência (distância máxima de 50 km, gestão por unidades hidrográficas), tendo como pressuposto de planejamento a não necessidade de estações de transbordo.

A Tabela 7 apresenta os consórcios formados e classificados por intervalo de população urbana total no estado do Paraná. Assim, o modelo proposto sugere a implantação de 58 aterros regionais recebendo RSU gerados nos territórios dos 58 consórcios intermunicipais, o que poderia substituir a implantação e a operação de 377 aterros se cada município tivesse seu próprio aterro.

Tabela 7. Consórcios formados classificados por intervalo de população urbana total

Intervalos de população urbana total	Consórcios	Municípios	População urbana total	População urbana total do estado do PR (%)
$X \leq 10.000$	2	7	15.279	0,2
$10.000 < X \leq 30.000$	14	49	264.739	3,4
$30.000 < X \leq 50.000$	9	43	341.820	4,4
$50.000 < X \leq 70.000$	12	90	713.821	9,2
$X > 70.000$	21	188	6.239.607	80,1
Subtotal	58	377	7.575.266	97,3
Não consorciados	-	22	210.368	2,7
Total	58	399	7.785.634	100

Fonte: GOMES; SUZUKI (2009).

Segundo o Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD) os aterros sanitários que atendem a pequenos municípios têm custo operacional unitário elevado quando comparados com aqueles que recebem grandes volumes de resíduos (PNUD, 2010). Dessa forma, o consórcio entre pequenos municípios torna-se vantajoso, pois, viabiliza tanto os custos operacionais como os investimentos.

2.5 Alternativas de Tratamento e Destinação Final de RSU

As formas inadequadas de destinação dos resíduos sólidos podem causar vários problemas ambientais relevantes, como: a produção de lixiviação, que são percolados potencialmente tóxicos com alta concentração de carga orgânica; problemas com a saúde pública, que decorrem do contato da população com RSU (LIMA, 2004).

Dentre as várias alternativas conhecidas, como a incineração, compostagem, digestão anaeróbia, gaseificação, reciclagem, entre outras formas de destinação, a prática de utilização de áreas para aterramento do lixo ainda é a mais comum. Parte do resíduo sólido gerado pela população mundial tem sido disposta em aterros sanitários, locais adequados para a disposição final de RSU, que dispõem de técnicas corretas para a impermeabilização do solo, cobertura dos resíduos, captação do chorume, além da captação e queima do biogás.

2.5.1 Aterros

2.5.1.1 Aterros sanitários

O aterro é considerado um local utilizado para a disposição dos resíduos sólidos no solo, particularmente lixo domiciliar, com o propósito de isolar todo tipo de ação que possa poluir o meio ambiente. É baseado em critérios de engenharia e normas operacionais específicas, que permitem o confinamento em camadas cobertas com material inerte, seguro em termos de controle de poluição ambiental e proteção à saúde pública. Local de disposição de resíduo sólido no solo, construído sob critério de engenharia e normas operacionais específicas, de maneira que seja operacionalizado com segurança e sem o risco de causar danos à saúde pública (ABNT, 1992; IPT, 2000; LIMA, 2004; PINTO, 1979).

No Brasil, os aterros sanitários recebem resíduos brutos, sem qualquer processamento. Os resíduos são lançados nos aterros sanitários e a compactação é realizada

diretamente sem qualquer tratamento prévio, diferente do que ocorre em vários países desenvolvidos, onde o lixo é beneficiado através do emprego de trituração prévia ou o enfardamento dos resíduos (SILVA, 2010).

2.5.1.2 Aterro controlado

O Aterro Controlado é um local de disposição de RSU, construído a partir de alguns critérios de engenharia, que exclui o sistema de impermeabilização da base, tratamento de percolado e biogás. O resíduo sólido é confinado apenas com uma camada de material inerte ao final da operacionalização diária (IPT, 2000).

2.5.1.3 Lixão

O lixão pode ser chamado de “vazadouro”, nele o RSU é exposto sobre o solo, a céu aberto, sem medidas de proteção ao meio ambiente ou à saúde pública. Considerado uma forma inadequada de disposição de resíduos sólidos, pois propicia a proliferação de vetores de doença, a geração de maus odores e, principalmente, a poluição das águas subterrâneas e superficiais pela infiltração do chorume, um líquido de cor preta, de mau cheiro e de elevado potencial poluidor produzido pela decomposição de matéria orgânica contida no lixo (BIDONE; POVINELLI, 1999).

2.5.2 Digestão anaeróbia

A digestão anaeróbia (DA) é um processo de conversão de matéria orgânica em ambientes com ausência de oxigênio livre, e ocorre em dois estágios. No primeiro ocorre a conversão de orgânicos complexos em materiais como ácidos voláteis. No segundo ocorre a conversão dos ácidos orgânicos, gás carbônico e hidrogênio em produtos finais gasosos, o metano e o gás carbônico (CHERNICHARO, 1997).

A DA tem sido utilizada há mais de 100 anos e tem sido aplicada ao tratamento de lodo de esgotos. Durante as últimas quatro décadas, muitas experiências foram feitas com a DA de resíduos líquidos, tais como resíduos rurais e esgotos industriais de altas concentrações (REICHERT, 2005).

2.5.3 Incineração

Desde o início do século XVIII a incineração tem sido utilizada como um método para processar resíduos. Atualmente estão sendo construídas modernas plantas de incineração para o aproveitamento energético.

Incineração consiste na queima de resíduo sólido, com o objetivo de reduzir peso e volume, cujo processo possibilita o aproveitamento da energia que é liberada durante a queima para geração de vapor e eletricidade.

Segundo Moraes Junior (2012), o impacto causado pelos incineradores é relativamente pequeno, se comparado ao gerado pela disposição de RSU em aterros sanitários. Nesse sentido, leva-se em consideração a seguinte estimativa, que uma planta com vida útil de 30 anos com capacidade de processar 1 milhão de toneladas de RSU ao ano requer menos de 0,1 km² de terra, enquanto que para aterrar 30 milhões de toneladas são necessários 3 km².

Uma usina de incineração pode ser usada como usina termelétrica. Porém, os custos iniciais são altos. Os gases gerados são filtrados e as cinzas provenientes da incineração de RSU são consideradas perigosas. Portanto, sua destinação deverá ser em aterros sanitários de classe I A (perigosos).

2.5.4 Reciclagem

A reciclagem tem como principal objetivo a reintegração dos resíduos sólidos no ciclo de produção e consumo, baseado no princípio dos 3R's: Reduzir, Reutilizar e Reciclar.

Reciclagem consiste no processo envolvendo várias etapas, que se inicia com a separação do resíduo na fonte (domicílio) até seu retorno à cadeia produtiva como matéria reciclada.

Em caso onde existe a coleta seletiva no município é adotado o método de centro de triagem, centro de apoio a reciclagem e a reutilização, onde os resíduos separados, ou não, na fonte, são encaminhados para serem escolhidos, enfardados e armazenados, conseqüentemente, para serem vendidos (POLZIN, 2004). A Figura 4 mostra o processo de transformação dos resíduos sólido.

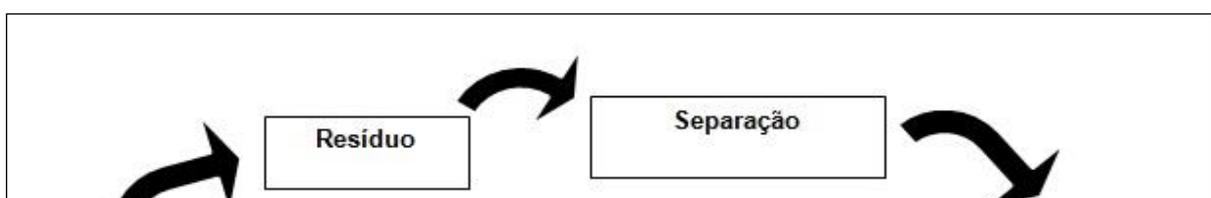


Figura 4. Processo de transformação dos resíduos sólidos.

Fonte: elaboração própria

2.5.5 Compostagem

A compostagem é um processo biológico aeróbico e controlado de transformação de resíduos orgânicos em resíduos estabilizados (BIDONE; POVINELLI, 1999). A matéria degradável colocada em condições adequadas de temperatura, de umidade e de aeração é transformada em produto estável, denominado composto orgânico, que tem propriedades condicionadoras ao solo, com aplicabilidade na agricultura.

2.5.6 Pirólise

É o processo de decomposição química por calor na ausência de oxigênio. Através da pirólise a matéria orgânica pode ser convertida em diversos subprodutos como o óleo combustível, alcatrão, gases combustíveis, sulfato de amônia e char (LIMA, 2004).

2.6 Protocolo de Quioto e seus Mecanismos Cooperativos para Redução de Emissões de Gases Causadores do Efeito Estufa

Todo ano são emitidos na atmosfera aproximadamente 7 bilhões de toneladas de gás carbônico, devido a esse fato, há uma grande preocupação com a degradação do meio ambiente.

Durante a Terceira Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas, realizada em 1997, em Quioto, no Japão, foi criado o Protocolo de Quioto, assinado por

representantes de mais de 160 países como complemento à Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, realizada no Rio de Janeiro, em 1992.

O Protocolo de Quioto foi ratificado em 2005, unindo os países, entre eles 38 países industrializados (incluindo 11 países da Europa Central e do Leste Europeu), para proteger o meio ambiente e atingir o desenvolvimento sustentável, por meio de obrigações legais criadas para reduzir os níveis de emissões de gases causadores do efeito estufa, entre o período de 2008 a 2012, cerca de 5,2%, abaixo dos níveis de 1990 (UNFCCC, 2013).

Entre os principais gases causadores do efeito estufa, e que devem ser diminuída a emissão, estão o dióxido de carbono (CO₂), o metano (CH₄), o óxido nitroso (N₂O), os hidrofluorcarbonos (HFCs), os perfluorcarbonos (PFCs) e o hexafluoreto de enxofre (SF₆).

O Protocolo introduziu mecanismos cooperativos, com o objetivo de reduzir o custo da política de redução de emissões de gases poluentes em países desenvolvidos, para se fazer cumprir as exigências de redução de emissões dos referidos gases. Os mecanismos de mercado e as metas são descritos no Quadro 4.

Quadro 4. Mecanismos de mercado para redução de emissões de gases poluentes

Mecanismo	Meta
Comércio Internacional de Emissões	Os países podem transferir parte de suas emissões permitidas.
Implementação Conjunta	Autoriza aos países a obterem crédito pelas reduções de emissões obtidas a partir do investimento em projetos em países industrializados, que resultam em uma transferência de “unidades de redução de emissões” equivalentes.
Mecanismo de Desenvolvimento Limpo	São liberados projetos de redução de emissões que contribuam para o desenvolvimento sustentável nos países em desenvolvimento, visando gerar “Redução certificada de emissão – RCE” para uso pelo investidor. Nesse mecanismo incluem-se projetos de energias renováveis, eficiência energética, manejo de resíduos, agricultura, substituição de combustíveis, processos industriais e reflorestamento.

Fonte: adaptado de ZANETTE (2009)

2.6.1 Mecanismo desenvolvido limpo na aplicação à redução de emissões de gases gerados nas áreas de disposição final de RSU

A disposição final de resíduos orgânicos em aterros sanitários gera a emissão composta de vários gases conhecida como biogás, sendo o seu principal componente o

metano (CH_4), responsável por cerca de 17% do problema dos gases de efeito estufa. Porém, o CH_4 é 21 vezes mais agressivo que o CO_2 , pois é mais ativo na retenção de calor na estratosfera.

A implantação de projeto de mecanismo desenvolvido limpo (MDL) busca evitar a dispersão do CH_4 no meio ambiente, ou mesmo a redução dessa emissão, por meio de uma captação adequada, promovendo a combustão desse gás e a sua consequente transformação em CO_2 , por meio de tratamento e aproveitamento energético, beneficiando, assim, o meio ambiente. Esse tipo de projeto pode buscar a obtenção de RCE, desde que esteja dentro dos requisitos estabelecidos pelo Protocolo de Quioto (MESQUITA JÚNIOR, 2007).

2.7 Tecnologias de Recuperação Energética de RSU

A conversão de energia química armazenada nos resíduos em calor, vapor e eletricidade é conhecida como tecnologia de recuperação da energia contida em resíduos, *waste-to-energy* (WTE). Entre as tecnologias de processamento de conversão de energia e combustível, encontram-se consolidados pelo mundo a incineração de RSU e os combustíveis derivados. Outra forma de sistema é a combustão de gases resultantes de decomposição anaeróbia não controlada, em aterros sanitários, e, também, gases provindos de digestores apropriados, biogás, neste o processo ocorre de forma controlada (MORAES JUNIOR, 2012).

O aproveitamento energético de RSU é considerado uma alternativa promissora, porém, não se trata de um potencial suficiente para sustentar uma estratégia de expansão da oferta de energia elétrica do país no longo prazo. A geração de eletricidade a partir de RSU é, sem dúvida, elemento importante de uma estratégia regional ou local e, portanto, não deve ser desconsiderada (EPE, 2008).

De acordo com a IEA (2012), os RSU representam 1,5% da geração de eletricidade renovável nos países da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OECD), um total de 31,8 TWh de eletricidade produzida. O maior produtor de energia elétrica a partir de RSU foi os Estados Unidos, gerando 9,5 TWh (29,8%) da produção da OECD. O segundo maior produtor foi a Alemanha, com uma produção de 5,0 TWh (15,7%). Na sequência está o Japão, com uma produção de 3,0 TWh (9,4%). Nesse cenário, ainda se destaca a Itália, a qual experimentou a maior taxa de crescimento, com o aumento da produção de 37 GW.h para 2.362 GW.h, uma taxa de crescimento de 21,9% ao ano.

No Brasil o Plano Nacional de Energia 2030 (EPE, 2008) considera a possibilidade de instalação de até 1.300 MW em termelétricas, nos próximos 25 anos, utilizando RSU. São esperados avanços importantes no aproveitamento energético do lixo urbano.

2.8 Aterro Sanitário

2.8.1 Digestão anaeróbia

A digestão anaeróbia é o processo biológico que dá origem à formação de biogás a partir da degradação de compostos orgânicos. Esse é um processo de digestão orgânica que ocorre naturalmente em ambientes onde a presença de oxigênio livre é muito reduzida ou inexistente. Conseqüentemente, a fração de um composto pode ser convertida em biogás sob condições anaeróbias, mediada por um consórcio de microorganismos (GUWY, 2004).

2.8.2 Biogás

O biogás é um combustível de alto valor energético, proveniente da fermentação anaeróbica da matéria orgânica. Os processos microbiológicos governam o processo de geração do gás, e este é uma mistura gasosa de proporções variadas, influenciada pelo tipo de substrato e pelas condições em que o processo é realizado. Os principais gases constituintes do biogás são o dióxido de carbono (CO_2) e metano (CH_4) (CHRISTENSEN et al., 2001; ZACHOW, 2000).

Segundo Pecora (2006), é possível produzir o biogás a partir de uma vasta variedade de resíduos orgânicos, como o lixo doméstico, resíduos de atividades agrícolas e pecuárias, lodo de esgoto, entre outros. A composição do biogás é basicamente de 60% de metano, 35% de dióxido de carbono e 5% de uma mistura de outros gases como hidrogênio, nitrogênio, gás sulfídrico, monóxido de carbono, amônia, oxigênio e aminas voláteis. Mas, dependendo da eficiência do processo, o biogás chega a conter entre 40% e 80% de metano.

2.8.3 Composição do biogás

A avaliação do potencial de um biogás varia muito devido à composição do resíduo, e esta é um fator importante para avaliação. O volume potencial do biogás depende da

quantidade e do tipo de conteúdo orgânico dentro da massa de resíduo segundo *Energy Sector Management Assistance Program* (ESMAP) (ESMAP, 2004). A Tabela 8 apresenta algumas características dos principais gases presentes no biogás.

Tabela 8. Caracterização dos gases presentes no gás de aterro sanitário

Gás	Concentração típica	Densidade (kg. m ⁻³)	Potencial Calorífico (kj .m ⁻³)	Solubilidade em água (g.L ⁻¹)	Propriedades gerais
CH ₄	45 -60 %	0,717	35.600	0,0645	Incolor, inodoro, asfixiante Inflamável
CO ₂	35 -50 %	1,977	---	1,688	Incolor, inodoro, asfixiante
N ₂	0 -10 %	1,250	---	0,019	Incolor, inodoro,
O ₂	0 - 4 %	1,429	---	0,043	Incolor, inodoro,
CO	< 0,1 %	1,250	12,640	0,028	Incolor, inodoro, inflamável, tóxico
H ₂	< 0,1%	0,090	10.760	0,001	Incolor, inodoro, inflamável
H ₂ S	0 - 70 ppm	1,539	---	3,846	Incolor, tóxico

Fonte: MACIEL (2003)

2.8.4 Produção de biogás em aterro sanitário

A formação e a taxa de geração dos gases constituintes do biogás de aterro são variáveis ao longo do tempo, e seguem várias fases, conforme representado na Figura 5 (ENSINAS, 2003). É possível observar que a produção de biogás pode ser dividida em cinco fases, ou quatro para aqueles que desconsideram a segunda por compreender se tratar de uma fase de transição, que ocorrem durante a vida de um aterro devido à biodegradabilidade do resíduo. A complementar, as fases típicas, condições e o período de produção do biogás em um aterro sanitário são mostrados na Tabela 9.

Tabela 9. Fases típicas de produção do biogás em um aterro sanitário

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

Fonte: ESMAP (2004)

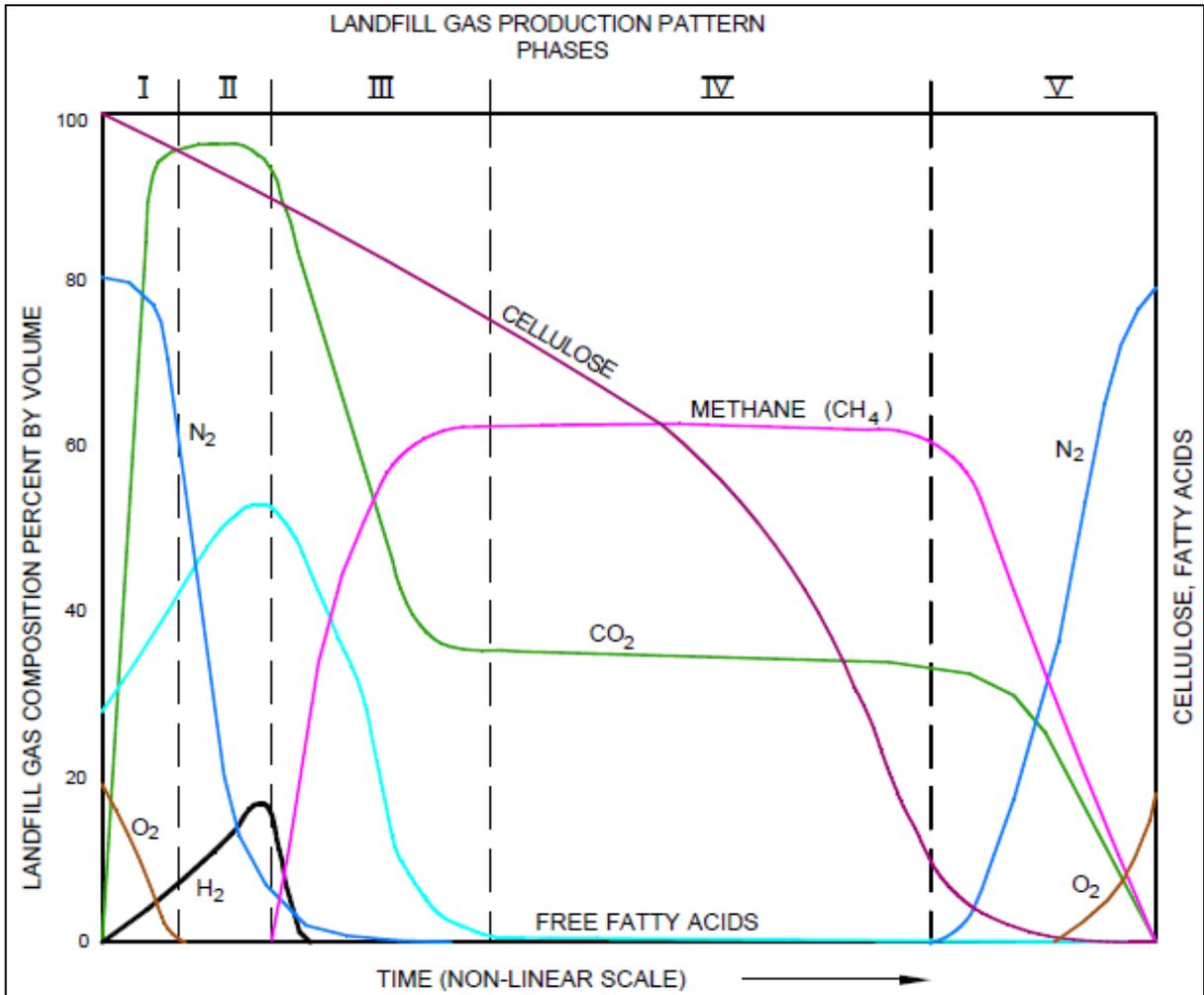


Figura 5. Fases típicas de produção do biogás em um aterro sanitário.
Fonte: ESMAP (2004).

As fases de formação do biogás são descritas a seguir (ENSINAS, 2003):

- **Fase I** (ajuste inicial) – Por causa da presença de ar no interior do aterro, nessa fase os resíduos depositados e sua fração biodegradável (matéria orgânica) sofrem a decomposição biológica em condições aeróbias. Essa fase da decomposição aeróbia se estende por um período de poucos dias após a execução da camada de cobertura, diminuindo a presença de oxigênio, podendo durar horas ou uma semana;
- **Fase II** (transição) - A fase em que ocorre o decaimento do oxigênio e inicia a reação anaeróbia. Nitratos e sulfatos podem ser utilizados como receptores de elétrons nas reações biológicas de conversão. Com a constante diminuição do potencial de óxido-redução, os microrganismos responsáveis pela transformação da matéria orgânica em metano e dióxido de carbono iniciam a conversão do

material orgânico complexo em compostos orgânicos simples e produtos intermediários. Essa fase pode durar de 3 meses a 3 anos;

- **Fase III** (ácida) – Nessa fase acontece a formação do gás metano, em que as reações iniciadas na fase de transição são aceleradas com a produção de quantidades significativas de ácidos orgânicos e pequenas quantidades de gás hidrogênio. Essa etapa é denominada hidrólise, a qual se inicia com a transformação enzimática dos constituintes de maior massa molecular. A etapa seguinte é a acidogênese, em que ocorre a transformação microbiológica dos constituintes resultantes da hidrólise em compostos intermediários com massa molecular menor. O principal gás gerado durante essa fase é o dióxido de carbono, e os microrganismos envolvidos nessa transformação, denominados como não-metanogênicos, são compostos por bactérias anaeróbias facultativas. Devido ao baixo pH, os constituintes inorgânicos como os metais pesados serão solubilizados. O tempo de duração dessa fase é de 8 a 40 anos;
- **Fase IV** (metanogênica) - Nessa fase de produção do metano predominam microrganismos estritamente anaeróbios, denominados metanogênicos, que convertem ácido acético e gás hidrogênio em CH_4 e CO_2 . Simultaneamente ocorre a formação do metano e dos ácidos, embora a taxa de formação dos ácidos seja reduzida consideravelmente. O tempo de duração dessa fase é de 1 a 40 anos;
- **Fase V** (maturação) - após a maior parte ser transformada em metano e dióxido de carbono, ocorre a fase de maturação. A taxa de geração do gás diminui consideravelmente, pois a maioria dos nutrientes disponíveis foi consumida nas fases anteriores e os substratos que restam no aterro são de degradação lenta. Nitrogênio e oxigênio podem ser encontrados no gás de aterro. Isso acontece devido à maneira como ocorre o fechamento do aterro. Essa fase pode ter duração de 1 a 80 anos.

2.8.5 Fatores que influenciam na produção de biogás de aterro

Alguns fatores influenciam na geração de gases de aterro, como a composição, o teor de umidade, o conteúdo dos nutrientes, a temperatura, a concentração de bactéria e o nível de pH (BRITO FILHO, 2005; ENSINAS, 2003; ESMAP, 2004). Além dos fatores citados, os aspectos relacionados com a geometria e operação do aterro e com o ambiente externo à célula também influenciam na produção de gases (MACIEL, 2003).

O Quadro 5 mostra os principais fatores que afetam a geração de gases relacionados, com as seguintes classificações: geometria e operação do aterro; características iniciais dos resíduos; e características do ambiente interno e externo à célula.

Quadro 5. Principais fatores que afetam a geração de gases

Fatores	Características
Geometria e operação do aterro	Dimensão do aterro Impermeabilização Compactação do resíduo
Características iniciais dos resíduos	Composição do resíduo Umidade do resíduo
Ambiente interno	Umidade da massa na degradação pH nas células Temperatura Disponibilidade de bactérias Presença de agentes inibidores
Ambiente externo	Precipitação e infiltração Variação pressão atmosférica Temperatura Evapotranspiração Umidade relativa do ar

Fonte: MACIEL (2003)

2.8.6 Geração de energia elétrica com biogás

O biogás é um combustível gasoso com um conteúdo energético elevado semelhante ao gás natural. Esse combustível pode ser utilizado para geração de energia elétrica, térmica ou mecânica.

Nos aterros sanitários, além de visarem ao armazenamento correto do resíduo, o aproveitamento do gás gerado, conforme mostra a Figura 6, pode ser captado e queimado em *flare*, onde ocorre transformação do metano em dióxido de carbono, ou então ser convertido em energia. Essa energia elétrica gerada no aterro sanitário a partir do biogás pode ter a opção de ser consumida pelo próprio aterro ou, em caso de excedente de energia, pode ser comercializada, assim, proporcionando uma receita adicional ao aterro.

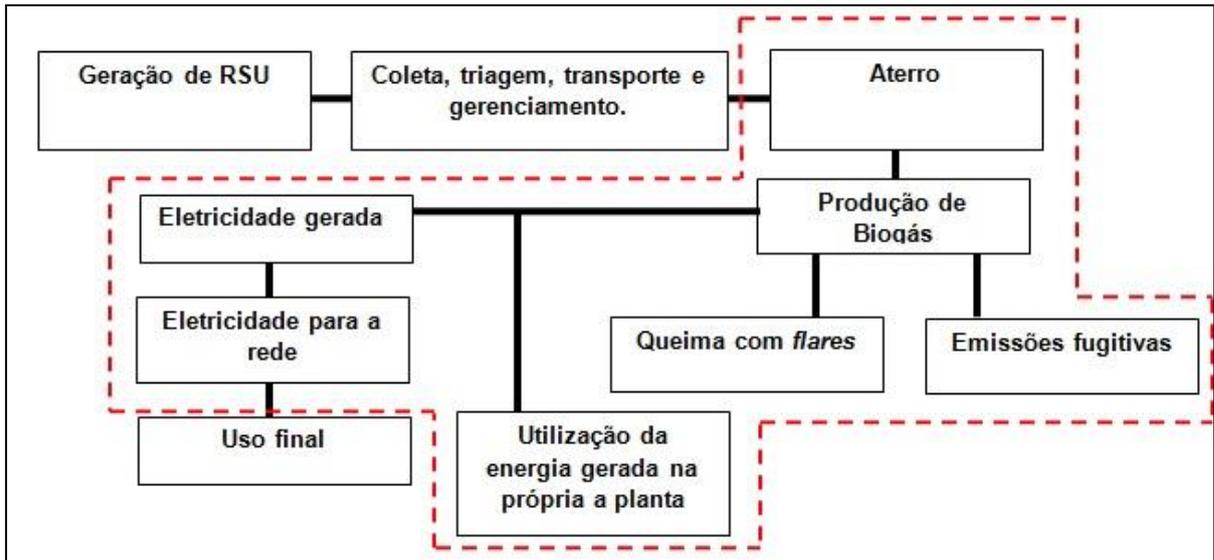


Figura 6. Aproveitamento energético do biogás.

Fonte: elaboração própria.

O potencial de energia elétrica através do aproveitamento do gás de aterro varia conforme a quantidade total de gases que é produzida distintamente ao longo do tempo. Isso ocorre de acordo com as fases de decomposição dos resíduos e os inúmeros fatores intervenientes no processo de degradação. A Tabela 10 mostra a produção de biogás por gigagrama de resíduo ano, segundo referências citadas.

Tabela 10. Quantificação de produção de biogás por tonelada de resíduo ano

Produção de Biogás ($\text{m}^3 \cdot \text{Gg}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$)	Referência
0 a 240	Maciel (2003)
0,8 a 20	Willumsfn e Bach (1991)
1 a 14	El- Fadel et al. (1997)

Fonte: EL- FADEL et al. (1997); MACIEL (2003); WILLUMSFN E BACH (1991)

Ao comparar a equivalência energética de 1m^3 de biogás em relação a outras fontes de combustíveis, tem-se o resultado representado na Tabela 11 (FARRET, 1999):

Tabela 11. Equivalência energética de 1m^3 de biogás

Combustível	Quantidades equivalentes
Carvão	$1,5 \text{ m}^3$
Gás Natural	$1,5 \text{ m}^3$
Óleo cru	0,72 L
Gasolina	0,98 L
Álcool	1,34 L
Eletricidade	2,21 kwh

Fonte: FARRET (1999).

Mas para a recuperação de gás de aterro devem ser analisados alguns fatores que interferem nos resultados de viabilidade do projeto, como a localidade, as necessidades energéticas do local, os recursos financeiros a serem utilizados e a legislação vigente (ENSINAS, 2003).

2.8.7 Tecnologias de plantas de energia em aterro sanitário

A planta de energia de um aterro sanitário é a unidade responsável pela conversão da energia térmica do biogás em energia elétrica. No caso, alguns fatores, dentre os principais a vazão estimada de biogás do aterro, a capacidade de geração, o custo, a eficiência energética e as emissões de gases poluentes, para a escolha da tecnologia, influenciaram na escolha da tecnologia para consolidação do processo (COSTA JUNIOR, 2012).

2.8.7.1 Tecnologias de conversão de energia aplicadas ao biogás de aterro sanitário

Dentre as tecnologias de conversão de energia aplicadas ao biogás de aterro sanitário, cita-se como exemplo: o grupo gerador; as microturbinas; e a turbina a gás.

O grupo gerador é a tecnologia mais utilizada para geração de energia elétrica em gases de aterros sanitários, principalmente pela viabilidade econômica, facilidade de operação e manutenção. Muitas vezes o tamanho de um sistema adequando para uma receita econômica aceitável é entre 1 a 3 MW. Além de ser uma tecnologia consolidada os riscos econômicos são muito baixo em comparação com outras tecnologias (BOVE; LUNGHI, 2006). Outra característica do grupo gerador importante é o tamanho compacto e fácil de transportar, podendo ser movido de um poço para outro, em caso de escassez de biogás. Mas, uma desvantagem é a poluição atmosférica, pois os valores de NO_x e CO em comparação com outras tecnologias são muito elevados (BOVE; LUNGHI, 2006).

As microturbinas são aplicadas geralmente para projetos de pequeno porte com menos de 1MW de potência, atendendo à demanda de eletricidade do próprio aterro ou de locais próximo (ENSINAS, 2003). No caso das microturbinas os níveis de emissão são baixos. Devido ao processo de queima o gás pode ser controlado, a fim de obter máxima eficiência (PECORA, 2006). Porém, uma desvantagem da microturbina é a baixa eficiência em relação a motor a gás e turbina a gás, pois, seu consumo de combustível é 35% maior por kWh produzido (ENSINAS, 2003).

As turbinas a gás são projetos aplicados para geração de energia de 3 a 4 MW no mínimo, é uma tecnologia empregada para aterros sanitários de grande porte. Tratando-se da segunda tecnologia mais aplicada para conversão de energia elétrica em biogás (BOVE; LUNGHI, 2006; ENSINAS, 2003).

2.8.8 Comparação entre as tecnologias de conversão de energia

A Tabela 12 mostra a eficiência das tecnologias disponíveis comercialmente para a conversão de energia, segundo referências.

Tabela 12. Comparação das tecnologias de conversão de energia

Tecnologia de conversão de energia	Potência	Eficiência	Referência
Grupo gerador	30 kW – 20 MW	30% a 34%	PECORA (2006)
	716 kW	37,3%	CARESSANA et al. (2011)
Turbina	500 kW -150 MW	20% a 30%	PECORA (2006)
Microturbina	30 kW – 100 kW	24% a 28%	PECORA (2006)
	500 kW	27%	CARESSANA et al. (2011)

Fonte: PECORA (2006); CARESSANA et al. (2011)

O grupo gerador é mais utilizado para geração de energia de capacidades pequenas e médias, devido ao seu menor custo e maior eficiência nessa faixa. No entanto, a turbina a gás é usada somente para altas capacidades, devido à economicidade e melhora quando utilizadas em ciclos combinados (ABREU, 2009).

2.9 Incineração de RSU

Desde o início do século XX a incineração tem sido utilizada para o tratamento térmico dos resíduos. Nas últimas décadas, tecnologias modernas e confiáveis têm sido aplicadas nos processos e, atualmente, quase todos os incineradores estão sendo projetados com aproveitamento energético.

A incineração é definida como um processamento térmico no qual os resíduos sólidos são oxidados com quantidades de oxigênio em excesso (TCHOBANOGLIOUS, 1996).

Hauser e Lemme (2007) consideram a incineração um dos métodos mais eficientes no reaproveitamento dos resíduos, tanto na redução de sua potencialidade nociva ao meio ambiente como na possibilidade de utilização para a geração de energia elétrica.

O aproveitamento energético por meio dos resíduos incinerados é uma maneira de recuperação direta de energia. Essa forma de obtenção de energia é possível desde que os resíduos sejam combustíveis e não tenham excesso de umidade. O calor gerado por esse sistema pode ser utilizado para o aquecimento direto ou para gerar eletricidade.

2.9.1 Processo de incineração

Uma das principais vantagens do processo de incineração está na redução do volume e peso dos resíduos (reduz o volume de massa de 70%, podendo chegar até 90%), o que não exige uma longa permanência em aterro sanitário. Outra vantagem oferecida pela incineração é a sua implantação, podendo ser instalados incineradores em locais próximos ou estratégicos. As emissões gasosas podem ser controladas não ocasionando risco ambiental. Os produtos gerados na queima, as cinzas, são inertes. Ademais, as tecnologias existentes permitem completa destruição de materiais perigosos e pode-se recuperar a energia no processo. Porém, a incineração apresenta algumas desvantagens, como o alto custo, a necessidade de mão de obra especializada e o fato de que nem todos os materiais encontrados no lixo podem ser incinerados (KREITH, 1994; SINGH. et al., 2011).

Segundo Henriques (2004), geralmente o processo de incineração consiste em dois estágios. O processo se inicia com a queima de resíduo na câmara primária, cuja função é de converter os resíduos sólidos em gases, através do processo de volatilização, destilação destrutiva e reações parciais de combustão. Nesse dispositivo, a temperatura varia entre 500°C e 900°C. Em todas as configurações, a alimentação de oxigênio nessa câmara é sub-estequiométrica, evitando-se gradientes elevados de temperatura. Assim, a volatilização evita grandes quantidades de metais presentes no lixo, como chumbo, cádmio, cromo, mercúrio, entre outros. Além disso, minimiza a formação de óxidos nitrosos, que surgem apenas sob temperaturas mais altas.

Na etapa secundária a mistura de gases e partículas formada na câmara primária é queimada a uma temperatura mais alta, em intervalo de tempo suficiente para que possa haver a combustão completa. O tempo de permanência para resíduos sólidos é de 30 minutos para o primeiro estágio e de 2 a 3 segundos para a combustão da fumaça no segundo estágio. Nesse caso, a atmosfera é altamente oxidante (excesso de oxigênio) e a temperatura de projeto varia

normalmente entre 750°C a 1250°C. Os diversos gases gerados na câmara anterior são oxidados a CO₂ e H₂O. Nessa temperatura, a probabilidade de existência de moléculas com grande número de átomos, como dioxinas e furanos, compostos altamente nocivos aos seres humanos, é praticamente zero (HENRIQUES, 2004).

Os gases da segunda etapa antes de serem liberados para a atmosfera passam por um sistema de tratamento de poluição, que consiste na remoção de ácido no gás, poeira e partículas finas por meio de precipitador eletrostático ou filtros. Em alguns casos requerem o uso de carvão ativo, para redução da emissão de mercúrio e dioxinas, mas isso depende de regulamentações de emissões (HENRIQUES, 2004).

As cinzas ou escórias geradas na incineração de resíduos podem ser destinadas para aterros ou adicionadas na construção civil, para fabricação de tijolos, capeamento de estradas e outros.

A Figura 7 mostra o esquema representativo de dupla camada de combustão.

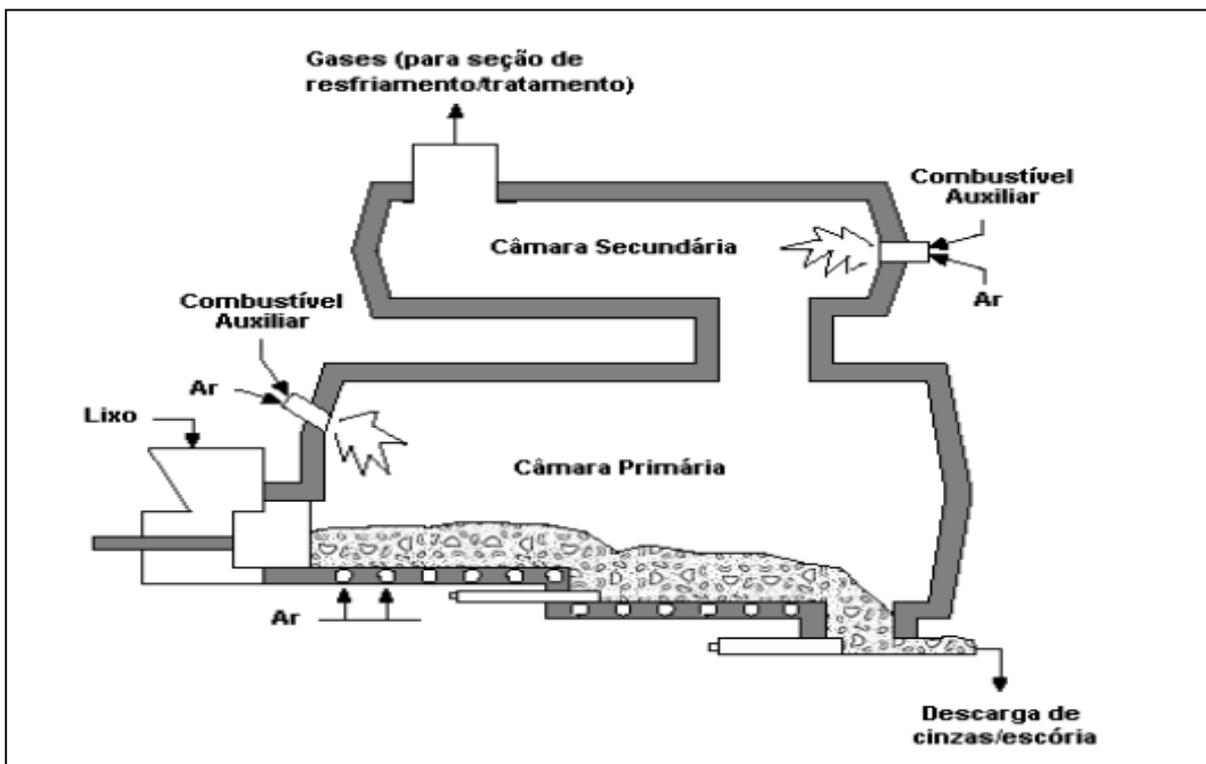


Figura 7. Esquema representativo de dupla camada de combustão.

Fonte: ARANDA (2001).

2.9.2 Sistemas de incineradores

De acordo com Dempsey e Oppelt (1987), o sistema de incineração de resíduos perigosos pode ser dividido em quatro subsistemas, nos quais o mesmo sistema pode se

aplicar para os RSU, tendo a seguinte configuração:

- a) preparação e alimentação do resíduo;
- b) câmara(s) de combustão;
- c) controle dos poluentes atmosféricos; e
- d) manuseio das cinzas/resíduos.

É importante ressaltar que a seleção da combinação e os arranjos apropriados para cada usina irão depender das propriedades físicas e químicas dos resíduos a serem incinerados. A Figura 8 mostra o esquema de uma usina termelétrica.

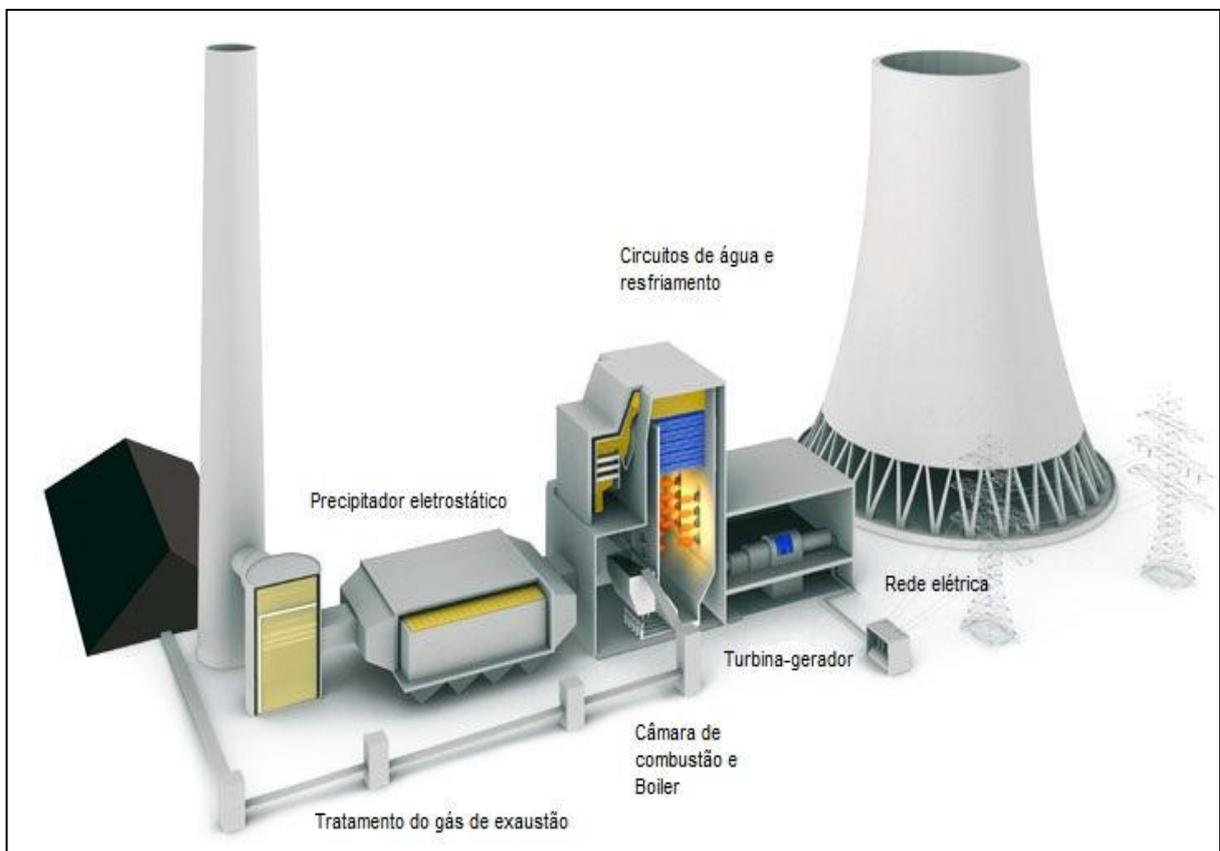


Figura 8. Usina termelétrica.

Fonte: Steag (2013)

2.9.3 Tipos de incineração de RSU

Conforme Gripp (1998) há dois tipos de incinerações que podem ser aplicados aos RSU, sendo definidos em função de tratamento prévio ou não, como:

- a) incinerador de queima direta (*Mass Burn- MB*) – nesse sistema não existe preparação prévia dos resíduos e são encaminhados diretamente para o poço que alimenta a câmara de combustão;
- b) incinerador tipo Combustível Derivado do Resíduo - CDR (*Refused Derived Fuel- RDF*) – os resíduos a serem incinerados passam por uma preparação prévia. No caso da preparação prévia, esta pode ser a retirada dos materiais de maior porte, ou trituração e transformação dos resíduos em cubículos, grãos e briquetes.

O tipo de tecnologia de incineração a ser adotada depende de alguns fatores que influenciam em sua escolha, como a quantidade de resíduos a ser incinerado, o poder calorífico do material combustível e demais parâmetros de combustão (SAFFER, 2011).

Os projetos mais comuns de incineração são os de injeção líquida, às vezes combinados com incineração de gases e vapor, fornos rotativos, câmara fixa e leitos fluidizados, conforme mostra a Tabela 13 (RIGATO, 2008).

Tabela 13. Aplicabilidade dos principais tipos de incineradores para resíduos sólidos

Resíduos	Injeção líquida	Forno rotativo	Câmara fixa	Leitos fluidizados
Granulares, homogêneo		x	x	x
Irregular, bruto (pallets, etc.)		x	x	x
Baixo ponto de fusão (alcatrões, etc.)	x	x	x	x
Compostos orgânicos com constituintes de cinzas fundíveis		x	x	x
Material não preparado, volumoso, material a granel		x	x	x

Fonte: RIGATO(2008)

2.9.4 Tratamento dos gases nos incineradores

O tratamento para os gases gerados na incineração envolve processos físicos e químicos, havendo uma grande variedade de opções de conformação e equipamentos.

Os gases saem em uma temperatura de 1000°C e 1200°C da câmara secundária, havendo necessidade de resfriamento. Nesse processo de resfriamento gera-se vapor d'água,

que pode ser utilizado na conversão em energia elétrica, sistema de aquecimento ou mesmo sistema de refrigeração (OLIVEIRA, 2004)

Em seguida, para neutralizar os gases é aplicada injeção de hidróxido de cálcio, altamente eficiente na neutralização e captura de SO_x e HCl. Após o resfriamento e a neutralização, é necessário remover o material particulado (fuligem, sais e hidróxido de cálcio), então os gases passam por um sistema de filtros (filtros-manga) que retira o material particulado. Em alguns casos, também é possível utilizar sistemas como precipitadores eletrostáticos, lavadores venturi, ciclones e outros (OLIVEIRA, 2004).

É necessário que os gases passem por um leito adsorvente, a base de carvão ativado (leito fixo ou fluidizado), para retenção de óxidos nitrosos, organoclorados e metais voláteis.

A perda de calor ao longo do próprio tratamento de purificação de gases faz com que a temperatura na saída da chaminé seja inferior a 120°C .

2.9.5 Geração de energia elétrica através da incineração de RSU

Segundo a IEA (1998), estima-se que no ano de 2025 a América do Norte, Europa e Oceania serão responsáveis por cerca de 29, 31 e 14 Mtep de energia primária, gerada da incineração de RSU.

Na região da União Europeia existem 420 usinas em operação com capacidade de 58,5 milhões de toneladas de resíduos por ano, gerando em torno de 23 milhões $\text{MWh}\cdot\text{ano}^{-1}$. No caso do Japão, possui 249 usinas com capacidade de 40 milhões de toneladas de lixo, gerando 11 milhões $\text{MWh}\cdot\text{ano}^{-1}$ de eletricidade anualmente. Nos EUA são gerados 17 milhões $\text{MWh}\cdot\text{ano}^{-1}$ através de 98 usinas instaladas, processando 29,4 milhões de toneladas de resíduos.

Taiwan é um exemplo de país em desenvolvimento que adota a incineração para o tratamento de resíduos sólidos. Atualmente possui 24 usinas de incineração de resíduo sólido, com aproveitamento energético. O projeto de tratamento instalado tem a capacidade de processar 24 mil toneladas por dia de resíduos sólidos, produzindo 622,5MW de energia. No ano de 2008, Taiwan gerou 2.967 GWh a partir dos resíduos incinerados (TSAI; KUO, 2010).

No Brasil, ainda, não existe nenhuma usina incineradora de resíduos sólidos geradora de energia para suprir as necessidades da população. Mas, em 2001 a empresa Usina Verde foi criada, localizada numa área de 5000 m^2 , em área da Fundação BIORIO, no *campus* da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro, e, em 2005,

conseguiu Licença de Operação para operar em um regime contínuo, tratando 30 Gg.dia⁻¹RSU e gerando 440 kWh diariamente, energia consumida pela própria usina.

2.9.6 Situação atual da incineração no Brasil

No Brasil, os primeiros incineradores instalados foram em Manaus em 1896, onde processava 60 Gg.dia⁻¹de resíduos domésticos, tendo sido desativado somente em 1958 por problemas de manutenção. Em 1913, na cidade de São Paulo, foi instalado um incinerador com capacidade para 40 ton.dia⁻¹ de RSU. Seu funcionamento foi de 27 anos (HENRIQUES, 2004; MENEZES et al. 2000).

A incineração no Brasil é mais utilizada para resíduos hospitalares, e a maioria dos incineradores instalados no país é de pequeno porte, com capacidades inferiores a 100 kg.h⁻¹. Uma grande parte desses incineradores encontra-se desativada devido à forma precária, em geral com emissões bastante elevadas, e principalmente pela má operação e inadequação na forma de preservação. Esses problemas acontecem pela inadequação de mão de obra contratada pelas instituições para tratar de resíduos sólidos, haja vista a falta de investimento em treinamento e reposição de peças do maquinário (RIGATO, 2008).

Segundo Amaral (2000), a incineração no Brasil ganhou o conceito poluidor ao meio ambiente e prejudicial à saúde, devido ao uso indevido de equipamentos, obsoletos ou por causa de má operação. Essa imagem teve influência negativa na tomada de decisão para o tratamento de resíduos sólidos, excluindo qualquer nível ou estágio de avaliação na utilização de incineração.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Local do Estudo

A avaliação do potencial técnico de obtenção energética de RSU foi realizada para as microrregiões de Cascavel, Foz do Iguaçu e Toledo, sendo os municípios considerados núcleos urbanos de grande importância e que norteiam a economia local da MROP.

A MROP é constituída por 50 municípios e abrange uma área territorial de aproximadamente 22.851.000 km², o que corresponde a 11,5% do território do estado do Paraná, sendo considerada a maior mesorregião. Atualmente, possui uma população de 1.219.589 habitantes (IBGE, 2010).

3.1.1 Caracterização da área de estudo

Em relação ao número de habitantes das microrregiões de Cascavel e Foz do Iguaçu, estas possuem mais de 400 mil habitantes, e Toledo está abaixo desse índice. Em termos de área territorial, a microrregião de Foz do Iguaçu possui uma área menor, constituída de 11 municípios, e Toledo tem uma maior área num total de 21 municípios. A Tabela 14 mostra os dados de população e área territorial dos municípios em questão.

Tabela 14. População e área territorial das microrregiões e da MROP

Microrregiões	Habitante	Área territorial (Km ²)
Cascavel	432.982	8.516.000
Toledo	377.780	8.755.000
Foz do Iguaçu	408.827	5.580.000
MROP	1.219.589	22.851.000

Fonte: IBGE (2010)

A Figura 9 mostra a localização do Estado do Paraná e da MROP, e a Figura 10 define a divisão territorial de cada microrregião.

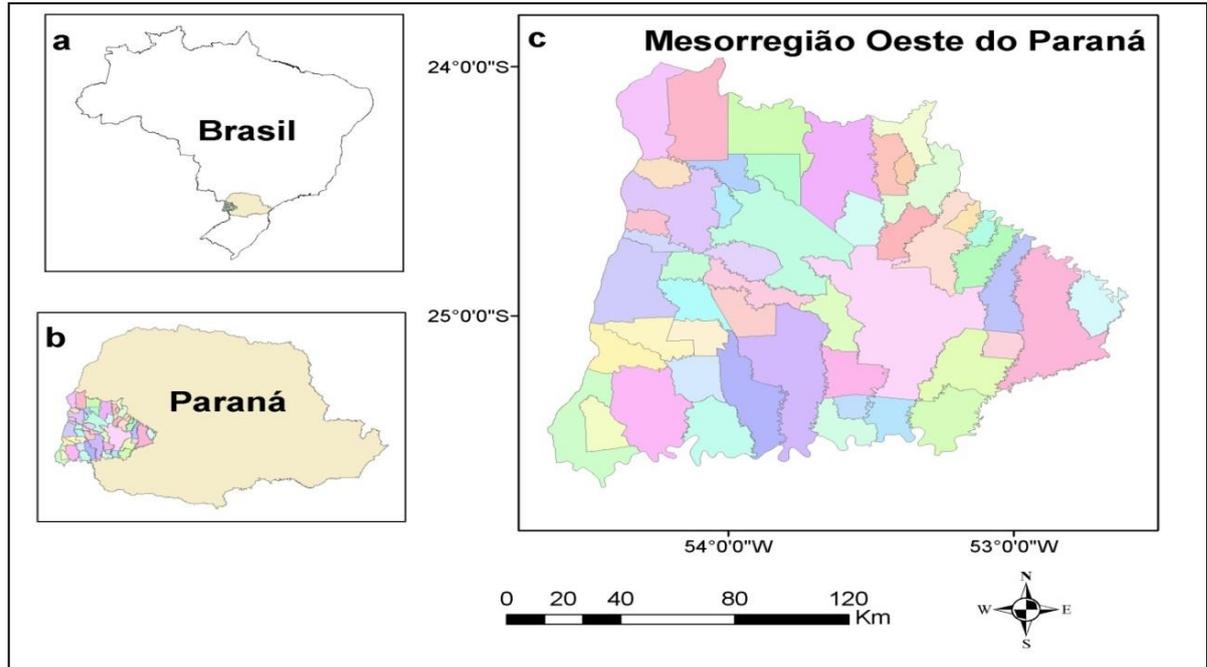


Figura 9. Localização do estado do Paraná (Fig. a), localização da mesorregião Oeste no estado do Paraná (Fig. b), mesorregião Oeste (Fig. c).

Fonte: adaptado IBGE (2013)

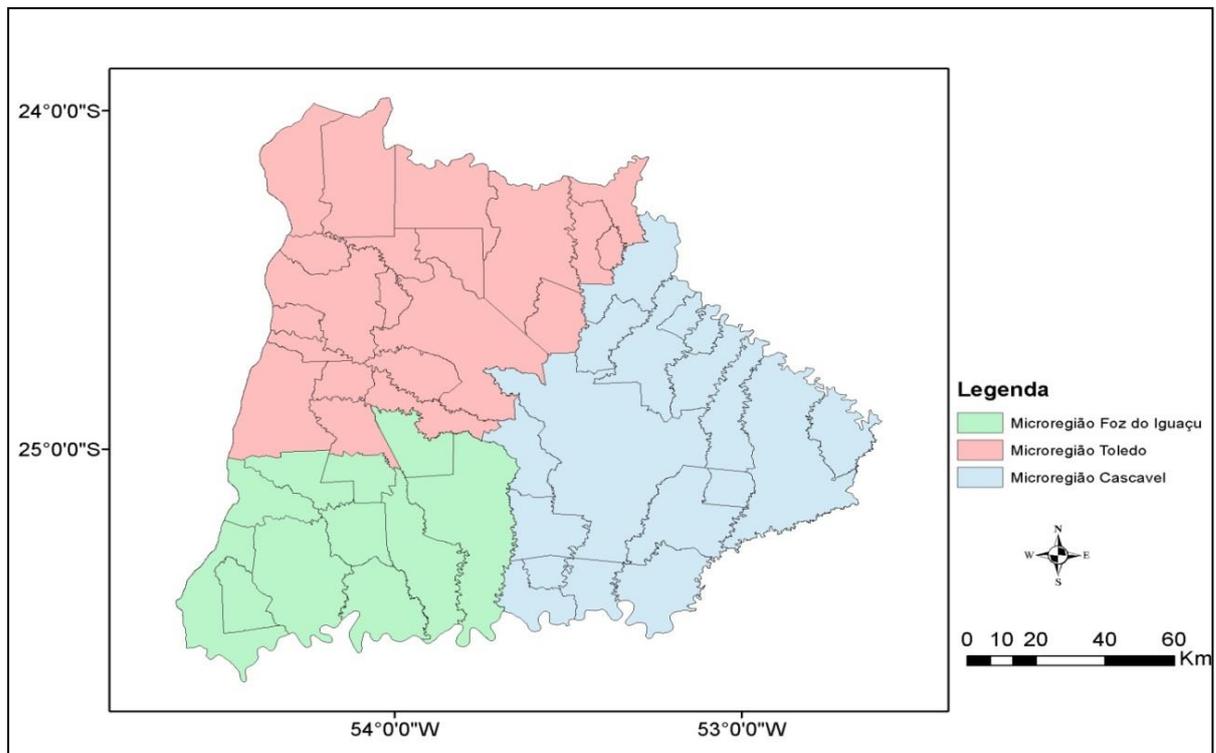


Figura 10. Divisão territorial das microrregiões da MROP.

Fonte: adaptado IBGE (2013)

3.2 Potencial de Produção de RSU

Para estimar o potencial de geração de RSU foi necessário obter a geração *per capita* de resíduos por habitante em $\text{kg.hab}^{-1}\text{.dia}^{-1}$. Para tanto, foi realizada uma média de habitantes dos 50 municípios pertencentes à MROP, obtendo-se o seguinte indicativo: 24.392 habitantes por município. Assim, estimou-se a quantidade de produção de RSU por $\text{kg.hab}^{-1}\text{.dia}^{-1}$.

Com a média de 24.392 habitantes seria adotando o valor segundo a IBAM (2001) de $0,50 \text{ kg.hab}^{-1}\text{.dia}^{-1}$, porém, este valor fica abaixo dos dados atuais de geração de RSU segundo ABRELPE (2012), o qual informa um índice de $0,86 \text{ kg.hab}^{-1}\text{.dia}^{-1}$. Devido a esse fator, adotou-se o valor de $0,8 \text{ kg.hab}^{-1}\text{.dia}^{-1}$ para a MROP.

Tabela 15. Valor médio de RSU gerado por habitante/dia na MROP

Referências	Número de habitantes	RSU ($\text{kg.hab}^{-1}\text{.dia}^{-1}$)
ABRELPE (2012)	Média da região sul – estado do Paraná	0,86
IBAM (2001)	Até 30 Mil	0,50

Fonte: ABRELPE (2012); IBAM (2001)

No Quadro 6 é apresentada a taxa geométrica de crescimento da MROP, um dos fatores que implicam na variação da produção de RSU disposto anualmente. Nesse caso, foi adotado o período de 2000 a 2010, obtendo-se a taxa de 0,69%, segundo dados do IBGE (OBSERVATÓRIO DAS METRÓPOLES, 2010). Portanto, o número de habitantes foi estimado conforme a taxa geométrica de crescimento até o último ano de recebimento de RSU no aterro, em 2030.

Quadro 6. Taxa de geométrica de crescimento da MROP

Taxa de geométrica de crescimento da MROP		
Período	1999- 2000	2000-2010
Taxa de geométrica de crescimento % (ao ano)	1,28	0,69

Fonte: OBSERVATÓRIO DAS METRÓPOLES (2010).

3.3 Potencial Técnico de Geração de Energia Elétrica com RSU

3.3.1 Definições dos cenários avaliados

O potencial técnico de produção de eletricidade utilizando-se os RSU foi avaliado para dois cenários, conforme definidos no Quadro 7.

Quadro 7. Cenários avaliados para a estimativa do potencial técnico de geração de energia elétrica utilizando os RSU gerados na MROP.

Cenário	Tecnologia	Definição
1	Aterro Sanitário	Produção de eletricidade utilizando o gás metano
2	Incineração	Produção de eletricidade gerada pela incineração.

Para ambos os cenários 01 e 02 os RSU passam por um processo de triagem, visando à separação dos resíduos reciclados. Segundo o Plano Nacional de Resíduos Sólido realizado pelo MMA (2012) a estimativa da composição gravimétrica dos resíduos sólidos recicláveis no Brasil, no ano de 2008, foi de 31,9%, portanto, adotou-se um valor de 30% de matérias recicláveis para os cenários. Após separação dos resíduos recicláveis, os resíduos rejeitados, no caso a quantia de 70%, composto de resíduos orgânicos, não recicláveis e outros, serão destinados para o aterro sanitário ou para incineração. A Figura 11 define os esquemas dos cenários 01 e 02.

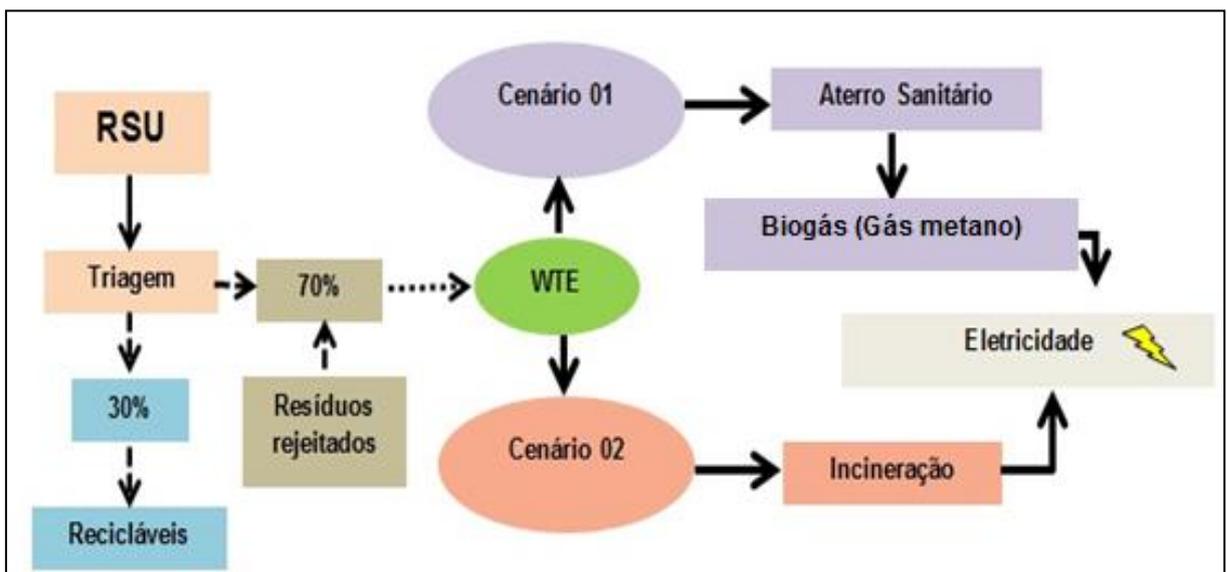


Figura 11. Esquema dos processos dos Cenários 01 e 02.

3.3.2 Cenário 01 - Produção de eletricidade com biogás de aterro sanitário

Para estimar as emissões de CH₄ provenientes de aterros sanitários, utilizou-se a metodologia sugerida pelos Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa (IPCC), dos anos de 1996 e 2006, sendo:

- Módulo 6 – Lixo, do Guia para Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa, Volume 2: Livro de Trabalho de 1996, e
- Diretrizes de 2006 do IPCC para Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa, Volume 5: Resíduos, Capítulo 2: Geração de Resíduos, Composição e Gerenciamento de Dados, e o Capítulo 3: Disposição de Resíduos Sólidos.

3.3.2.1 Estimativa de geração de metano em aterro sanitário

A vazão de metano é calculada pela equação 1.1 (IPCC 1996).

$$Q_T = F \cdot R_x \cdot K \cdot L_0 \cdot e^{-K \cdot (T-X)} \quad (\text{eq.1.1})$$

Onde:

Q_T = Metano gerado no ano atual (m³.ano⁻¹);

F = Fração de metano no biogás (%);

R_x = Quantidade de resíduo depositado no ano x (Gg.ano⁻¹);

k = Constante de decaimento (1/ano);

L₀ = Potencial de geração de biogás (m³ CH₄. kg⁻¹ RSU);

T = Ano atual;

X = Ano de deposição do resíduo.

O DOC (carbono orgânico degradável) foi calculado por meio da equação 1.2 (IPCC, 2006).

$$\text{DOC} = \sum_i (\text{DOC}_i \cdot W_i) \quad (\text{eq.1.2})$$

Onde:

DOC = Fração de carbono orgânico degradável no RSU (kg C. kg⁻¹RSU);

DOC_i= Fração de carbono orgânico degradável no tipo de resíduos;

Wi= Fração de resíduos do tipo i por categoria de resíduos (%).

Por falta de dados da composição gravimétrica dos RSU da MROP, adotaram-se os dados fornecidos pelo IPCC (2006) para a América do Sul, onde se inclui o Brasil. A Tabela 16 mostra os componentes, porcentagem da massa de carbono orgânico degradável para cada resíduo e a composição gravimétrica.

Tabela 16. Teor de carbono orgânico degradável para cada componente do resíduo

Componente	Porcentagem DOC (em massa)	Composição gravimétrica (%)
A) Papel e papelão	40	17,1
B) Restos de alimentos	15	46,9
C) Resíduos de parques e jardins	17	-
D) Tecidos	40	2,6
E) Madeiras	30	4,7

Fonte: IPCC (2006)

O DOC_f (fração de DOC dissolvida ou a fração de DOC que pode ser decomposto de forma anaeróbia) leva em consideração vários fatores, tais como a temperatura, o pH, a umidade, a composição dos resíduos, dentre outros (PENTEADO et al., 2011). Nesse estudo o DOC_f foi calculado pela equação 1.3, fornecida pelo IPCC (1996).

$$DOC_F = 0,014T + 0,28 \quad (\text{eq.1.3})$$

Onde:

T= Temperatura (°C) na zona anaeróbia dos resíduos, estimada em 35°C

$$DOC_F = 0,77$$

O potencial de geração de metano a partir do RSU, L_0 foi obtido por meio da equação 1.4 (IPCC 1996). Para aterro gerenciado o fator de correção do metano (MCF) adotado foi 1,0 conforme mostra a Tabela 17.

$$L_0 = MCF \cdot DOC \cdot DOC_F \cdot F \cdot \frac{12}{16} \quad (\text{eq. 1.4})$$

Onde:

L_0 = Potencial de geração de metano do resíduo ($m^3 CH_4.kg^{-1}.RSU$);

MCF = Fator de correção do metano % (1 = aterro bem gerenciado);

DOC = Fração de carbono degradável ($kg C.kg^{-1}.RSU$);

DOC_F = Fração de DOC dissolvida ($kg C.kg^{-1}.RSU$);

F = Fração de metano no biogás;

16/12: Conversão de carbono (C) para metano (CH_4).

Tabela 17. Fator de correção de metano segundo os tipos de aterros

Classificação de aterros e fatores de correção de metano	
Tipos de aterros	Valores de correção de metano
Gerenciamento – anaeróbico	1,0
Gerenciamento – semi-aeróbico	0,5
Não gerenciado – profundidade (> 5 m de resíduos) e ou camada freática elevada	0,8
Não gerenciado – pouco profundo (< 5 m de resíduos)	0,4
Aterro não categorizado (sem controle)	0,6

Fonte: IPCC (2006)

Para o cálculo da constante de decaimento (K) adotou-se a equação 1.5, utilizando os dados fornecidos na Tabela 18 (IPCC 1996; 2006).

$$k = \frac{\ln(2)}{t_{1/2}} \quad (\text{eq. 1.5})$$

Onde:

k = Constante de decaimento (1/ano)

$t_{1/2}$ = tempo médio para 50% da decomposição (ano)

Tabela 18. Valores de índice de geração de metano (k) e de vida média ($t_{1/2}$) por tipo de resíduos, segundo Zona Climática

Tipo de resíduo	Constante decaimento (k)		Meia vida ($t_{1/2}$)	
	Tropical (TMA* > 20)		Tropical (TMA > 20)	
	Úmido e seco (MAP** ≥ 1000 mm)		Úmido e seco (MAP ≥ 1000 mm)	
	Padrão	Classificação	Padrão	Classificação
Resto de comida	0,4	0,17 - 0,7 ¹⁰	2	1 ¹⁰ - 4
Papel/Têxtil	0,07	0,06 - 0,085	10	8-12
Madeira	0,035	0,03 - 0,05	20	14-23
Plásticos	Não aplicado	Não aplicado	Não aplicado	Não aplicado
Metais	Não aplicado	Não aplicado	Não aplicado	Não aplicado
Vidros	Não aplicado	Não aplicado	Não aplicado	Não aplicado

Fonte: IPCC (2006)

Nota: *Temperatura Média Anual; **Precipitação Média Anual;

Para determinação da potência utilizou-se a equação 1.6.

$$P_x = \frac{Q_x \cdot \eta \cdot PCI}{T \cdot 1000} \quad (\text{eq. 1.6})$$

Onde:

P_x = Potência disponível a cada ano (MW);

Q_x = Vazão de metano captado ($\text{m}^3 \text{CH}_4 \cdot \text{h}^{-1}$);

PCI = Poder calorífico do metano ($9,9 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-3} \text{CH}_4$);

T = Disponibilidade da planta ($8.000 \text{ h} \cdot \text{ano}^{-1}$);

η = Eficiência do grupo gerador

A energia disponível foi calculada na equação 1.7, sendo multiplicada a potência gerada pelo tempo de disponibilidade da planta ao ano.

$$E = P_x \cdot T \quad (\text{eq. 1.7})$$

Onde:

E = Energia disponível ($\text{MWh} \cdot \text{ano}^{-1}$);

P_x = Potência disponível (MW);

T= Disponibilidade da planta (8.000 h. ano⁻¹).

3.3.2.2 Índice de recuperação de biogás (IRB)

Apenas uma parte do biogás produzido nos aterros sanitários é recuperada. Segundo Pecora (2006) o processo de recuperação do biogás em aterros sanitários é incompleto, pois permite um aproveitamento de aproximadamente 40% do total de biogás produzido. Abreu (2009) trabalhou em seus estudos com cenários de recuperação de biogás considerando valores de 50% como baixo, 70% médio e 90% alto.

Conforme as citações de Pecora (2006) e Abreu (2009), neste trabalho adotaram-se dois índices de recuperação de biogás para avaliar o potencial da MROP, sendo: Índice de Recuperação de Biogás com 50% (IRB 50%), estimado em uma baixa recuperação; e o Índice de Recuperação de Biogás com 70% (IRB 70%), considerada uma recuperação mais otimista.

3.3.2.3 Módulos adotados para as tecnologias de conversão de energia

Ao invés de aplicar a eficiência das tecnologias de conversão de energia elétrica, segundo referências da Tabela 12, o trabalho propôs adotar algumas tecnologias consolidadas no mercado para o levantamento do potencial de geração de eletricidade com gás metano de aterro, utilizando grupo gerador e microturbina.

Essas tecnologias foram divididas em quatro Módulos, conforme definida na Tabela 19, sendo apresentados os Módulos com as tecnologias empregadas, as respectivas eficiências de conversão para eletricidade, fabricantes e modelo.

Tabela 19. Tecnologia adota para conversão de energia elétrica com biogás

Módulo	Tecnologia	Potência (kW)	Rendimento com biogás (%)	Referência	Modelo
1	Grupo gerador	815	31	Caterpillar	G3516
2	Grupo gerador	1062	35,8	Caterpillar	G3516
3	Grupo gerador	1600	38,9	Caterpillar	G3520C
4	Microturbina	200	33	Capstone	C200HP
		600	33	Capstone	C600LP
		800	33	Capstone	C800HP
		1000	33	Capstone	C1000HP

Fonte: CATERPILLAR (s.d); CAPSTONE (s.d)

3.3.2.4 Vida útil do aterro sanitário

A Resolução Conjunta nº 01/2006 – SEMA/IAP/SUDERHSA, cita no Art. 4, que todos os aterros sanitários deverão ser projetados para uma vida útil de no mínimo 10 (dez) anos no estado do Paraná.

Segundo a PNUD (2010), em um estudo sobre o Potencial de Geração de Energia a partir de Resíduos de Saneamento (lixo, esgoto), visando incrementar o uso de biogás como fontes alternativas de energia renovável, ficou definido que para viabilizar um projeto de recuperação de biogás para produção de energia em aterro sanitário deve-se ter no mínimo um período de dez a quinze anos.

Portanto, o estudo estimou uma vida útil para o recebimento dos RSU no aterro sanitário, um período de 20 anos para a MROP.

3.3.3 Cenário 02 - Produção de energia elétrica por incineração de RSU

O potencial de energia elétrica por meio da incineração dos RSU foi obtido com base em referências de produção de eletricidade por kWh.Gg⁻¹ de resíduos incinerados, conforme dados apresentados na Tabela 20.

Tabela 20. Taxa de produção de eletricidade por incineração segundo referências

Fontes	Produção de eletricidade (kWh.Gg ⁻¹ RSU)
Puna e Baptista (2008)	587
Tsai e Kuo (2010)	622
Wang et al. (2009)	230
EPE (2008)	450-700
Kadir et al. (2013)	639
Brogaardet; Riber; Chistensen (2013)	500 – 700
Moraes Junior (2012)	348 – 426

Conforme os dados da Tabela 20, aplicou-se para a Taxa 01 o menor valor de produção de eletricidade, e no caso da Taxa 02 fez-se uma média dos valores de produção de eletricidade. Desse modo, o potencial de energia elétrica gerada pela incineração dos RSU no Cenário 02 foi definido conforme a Tabela 21.

Tabela 21. Potencial de produção de eletricidade adotado por gigagrama de RSU incinerado

na MROP.

TAXA	Produção de eletricidade (kWh.Gg ⁻¹ RSU)	Produção adotada (kWh. Gg ¹ RSU)
01	230	230
02	230 – 700	465

Com a produtividade de energia calculou-se o potencial por meio da equação 2.1, para as duas taxas adotadas:

$$E = \frac{R_x \cdot P_i}{1000} \quad (\text{eq.2.1})$$

Onde:

E= Energia produzida (MWh. ano⁻¹);

R_x= Quantidade de lixo a ser incinerado (Gg. ano⁻¹);

P_i= Taxa de produção de eletricidade na incineração (kWh. Gg⁻¹ RSU).

A potência de geração de energia elétrica por incineração foi obtida pela equação 2.2.

$$P_{inc} = \frac{E}{T} \quad (\text{eq. 2.2})$$

Onde:

P_{inc}= Potência disponível por incineração (MW);

E= Energia disponível (MWh. ano⁻¹);

T= Disponibilidade da planta (8.000 h.ano⁻¹)

3.4 Média de Produção de Energia Elétrica em Função da Capacidade de Operação

No caso dos aterros sanitários a capacidade de geração de biogás não é constante ao longo dos anos, pois, dificilmente encontram-se no mercado equipamentos capazes de operar em uma faixa tão ampla de potência. Algumas vezes a solução é aplicar o uso de módulos de geração que são instalados ou desinstalados de acordo com a variação na produção de biogás (LEME, 2010). Devido a esse fato, foi realizada uma média do potencial de energia elétrica gerada ao longo dos anos no aterro sanitário para as microrregiões e toda MROP.

A média da geração de energia elétrica também foi aplicada para incineração dos RSU. Adotou-se a fórmula da aritmética simples, conforme equação 3.1.

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \quad (\text{eq. 3.1})$$

Onde:

\bar{x} = quociente (média do potencial de geração de energia elétrica) MW ou MWh.ano⁻¹

x_1 = variável (as potencial de geração de energia elétrica) MW ou MWh.ano⁻¹

n = número de variáveis (anos do aterro ou do incinerador) = 34 anos

Foi realizada a média de ambos os cenários 01 e 02 para poder confrontar os potenciais gerados quando aplicado no suprimento de energia elétrica no setor rural e residencial das microrregiões e toda MROP.

3.5 O Potencial de Substituição de Energia Elétrica Gerado pelos RSU no Setor Rural e Residencial nas Microrregiões e toda MROP

Os estudos realizados no Cenário 01, utilizando o gás metano de aterro sanitário, e no Cenário 02, aplicando a incineração, obtiveram a estimativa do potencial de energia elétrica gerado pelo RSU das microrregiões de Cascavel, Foz do Iguaçu e Toledo e toda MROP. Os resultados revelam que essa energia renovável pode suprir uma demanda energética, a qual foi aplicada no setor rural e residencial de cada microrregião e toda MROP.

O consumo de energia elétrica na MROP, no setor rural e residencial, foi de 1.306.487 MWh.ano⁻¹, no ano de 2012, segundo dados fornecidos por Sucek (2012), conforme apresentado na Tabela 22.

Tabela 22. Consumo de energia elétrica nos setores Rural e Residencial da MROP

Setor	Cascavel (MWh.ano ⁻¹)	Foz do Iguaçu (MWh.ano ⁻¹)	Toledo (MWh.ano ⁻¹)	MROP (MWh.ano ⁻¹)
Rural	129.050	90.922	262.065	482.037
Residencial	260.450	326.508	237.484	824.450
Total	389.500	417.430	499.549	1.306.487

Fonte: Adaptado SUCEK (2012)

Foram selecionados os potenciais de geração de energia elétrica dos cenários conforme mostra a Tabela 23, para o suprimento de energia no setor residencial e rural.

Tabela 23. Demanda de geração de energia elétrica aplicada no suprimento do setor rural e residencial das microrregiões e de toda MROP

Microrregião	Cenário estudado
Cascavel	Cenário (1) Mód. 1 (IRB 50%)
	Cenário (1) Mód. 3 (IRB 50%)
	Cenário (1) Mód. 1 (IRB 70%)
	Cenário (1) Mód. 3 (IRB 70%)
	Cenário (2) (TAXA 01)
	Cenário (2) (TAXA 02)
Foz do Iguaçu	Cenário (1) Mód. 1 (IRB 50%)
	Cenário (1) Mód. 3 (IRB 50%)
	Cenário (1) Mód. 1 (IRB 70%)
	Cenário (1) Mód. 3 (IRB 70%)
	Cenário (2) (TAXA 01)
	Cenário (2) (TAXA 02)
Toledo	Cenário (1) Mód. 1 (IRB 50%)
	Cenário (1) Mód. 3 (IRB 50%)
	Cenário (1) Mód. 1 (IRB 70%)
	Cenário (1) Mód. 3 (IRB 70%)
	Cenário (2) (TAXA 01)
	Cenário (2) (TAXA 02)
MROP	Cenário (1) Mód. 1 (IRB 50%)
	Cenário (1) Mód. 3 (IRB 50%)
	Cenário (1) Mód. 1 (IRB 70%)
	Cenário (1) Mód. 3 (IRB 70%)
	Cenário (2) (TAXA 01)
	Cenário (2) (TAXA 02)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Cenário 01 - Avaliação de Produção de Eletricidade com Metano de Aterro Sanitário

4.1.1 Levantamento da produção de RSU e gás metano nos aterros sanitários da MROP

O Cenário 01 estudou a produção de metano em aterros sanitários para o aproveitamento do potencial de geração de eletricidade das microrregião de Cascavel, Foz do Iguaçu e Toledo, pertencentes a MROP. Nesse cenário empregaram-se as tecnologias para conversão de energia utilizando grupo gerador e microturbina.

Os aterros sanitários foram projetados para 20 anos de operação (2010 a 2030). Esse período corresponde à etapa de recebimento de RSU. Após o encerramento de operação do aterro, estimou-se até o ano de 2044 para o aproveitamento do potencial energético, assim, finalizando as atividades nos aterros.

O levantamento de geração de RSU e o potencial de produção de gás metano por meio de aterros sanitários das microrregiões de Cascavel, Foz do Iguaçu e Toledo e toda a MROP são mostrados na Tabela 24, 25 e 26 e 27.

A tendência de produção de gás metano por meio dos aterros sanitários pode ser observada no Gráfico 1, referente às microrregiões de Cascavel, Foz do Iguaçu e Toledo, e no Gráfico 2 é referendado todo potencial produzido pela MROP.

Os resultados obtidos nos Gráficos 1 e 2 mostram que o nível de produção de metano aumenta a cada ano, pois cada tonelada de RSU depositada gera um novo potencial, portanto o último ano de recebimento é dado como ponto máximo da curva. E o período de decaimento, pela constante K, em função da disponibilidade de nutrientes, pH, temperatura e umidade, refere-se à degradação da matéria orgânica no tempo. Ensinas (2003), Figueiredo (2011), Penteado et al. (2012), Zamorano et al. (2005) também obtiveram o mesmo relato no comportamento da produção do metano em seus estudo em aterro sanitário.

Tabela 24. Levantamento de geração de RSU e o potencial de produção de gás metano por meio de aterro sanitário da microrregião de Cascavel

Período (ano)	Habitante	RSU depositado (Gg.ano⁻¹)	Produção de metano (m³ CH₄.ano⁻¹)
2010	432.978	88.501	1.922.507
2011	435.965	89.111	3.541.070
2012	438.973	89.726	4.905.932
2013	442.001	90.345	6.059.042
2014	445.050	90.968	7.035.430
2015	448.120	91.596	7.864.350
2016	451.212	92.228	8.570.230
2017	454.325	92.864	9.173.465
2018	457.459	93.505	9.691.083
2019	460.615	94.150	10.137.310
2020	463.793	94.799	10.524.022
2021	466.993	95.453	10.861.136
2022	470.215	96.112	11.156.934
2023	473.459	96.775	11.418.331
2024	479.725	98.056	11.664.420
2025	483.035	98.732	11.884.602
2026	486.367	99.413	12.083.250
2027	493.101	100.790	12.279.022
2028	496.503	101.485	12.457.598
2029	499.928	102.185	12.621.917
2030*	503.377	102.890	12.774.438
2031	-	-	10.666.702
2032	-	-	8.906.734
2033	-	-	7.437.155
2034	-	-	6.210.051
2035	-	-	5.185.415
2036	-	-	4.329.840
2037	-	-	3.615.432
2038	-	-	3.018.899
2039	-	-	2.520.792
2040	-	-	2.104.870
2041	-	-	1.757.574
2042	-	-	1.467.581
2043	-	-	1.225.435
2044	-	-	1.023.243

Fonte: Elaboração autora

Nota: * encerramento de recebimento de RSU no aterro.

Tabela 25. Levantamento de geração de RSU e o potencial de produção de gás metano por meio de aterro sanitário da microrregião de Foz do Iguaçu

Período (ano)	Habitante	Produção de RSU (Gg.ano⁻¹)	Produção de metano (m³ CH₄.ano⁻¹)
2010	408.827	83.564	1.820.322
2011	411.647	84.141	3.352.853
2012	414.487	84.721	4.645.168
2013	417.346	85.306	5.736.985
2014	420.225	85.894	6.661.475
2015	423.124	86.487	7.446.336
2016	426.043	87.083	8.114.694
2017	428.982	87.684	8.685.862
2018	431.941	88.289	9.175.964
2019	434.921	88.898	9.598.470
2020	437.921	89.511	9.964.621
2021	440.942	90.129	10.283.810
2022	443.984	90.750	10.563.879
2023	447.047	91.376	10.811.375
2024	453.236	92.641	11.045.592
2025	456.363	93.281	11.255.087
2026	459.511	93.924	11.444.033
2027	462.681	94.572	11.615.919
2028	465.873	95.224	11.773.656
2029	469.087	95.881	11.919.677
2030*	472.323	96.543	12.056.014
2031	-	-	10.066.815
2032	-	-	8.405.827
2033	-	-	7.018.896
2034	-	-	5.860.803
2035	-	-	4.893.792
2036	-	-	4.086.334
2037	-	-	3.412.103
2038	-	-	2.849.119
2039	-	-	2.379.024
2040	-	-	1.986.494
2041	-	-	1.658.730
2042	-	-	1.385.045
2043	-	-	1.156.518
2044	-	-	965.696

Fonte: Elaboração autora

Nota: *encerramento de recebimento de RSU no aterro.

Tabela 26. Levantamento de geração de RSU e o potencial de produção de gás metano por meio de aterro sanitário da microrregião de Toledo

Período (ano)	Habitante	RSU depositado (Gg.ano⁻¹)	Produção de metano (m³ CH₄.ano⁻¹)
2010	377.780	77.218	1.677.417
2011	380.386	77.751	3.089.637
2012	383.010	78.287	4.280.497
2013	385.652	78.827	5.286.601
2014	388.312	79.371	6.138.512
2015	390.991	79.919	6.861.756
2016	393.688	80.470	7.477.643
2017	396.404	81.025	8.003.970
2018	399.139	81.584	8.455.598
2019	401.893	82.147	8.844.939
2020	404.666	82.714	9.182.352
2021	407.458	83.284	9.476.490
2022	410.269	83.859	9.734.577
2023	413.099	84.437	9.962.647
2024	415.949	85.020	10.165.741
2025	418.819	85.607	10.348.069
2026	421.708	86.197	10.513.140
2027	424.617	86.792	10.663.892
2028	427.546	87.390	10.802.776
2029	430.496	87.993	10.931.843
2030*	433.466	88.600	11.052.802
2031	-	-	9.229.130
2032	-	-	7.706.356
2033	-	-	6.434.835
2034	-	-	5.373.111
2035	-	-	4.486.567
2036	-	-	3.746.299
2037	-	-	3.128.173
2038	-	-	2.612.036
2039	-	-	2.181.060
2040	-	-	1.821.193
2041	-	-	1.520.702
2042	-	-	1.269.792
2043	-	-	1.060.281
2044	-	-	885.338

Fonte: Elaboração autora

Nota: *encerramento de recebimento de RSU no aterro.

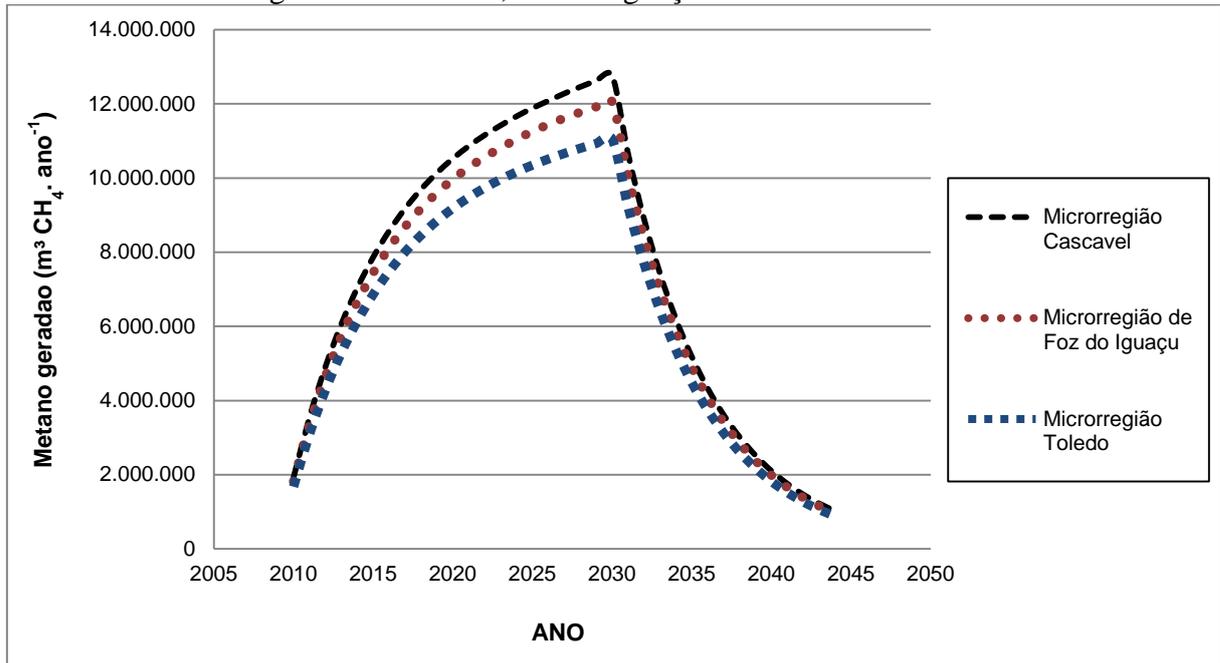
Tabela 27. Levantamento de geração de RSU e o potencial de produção de gás metano por meio de aterro sanitário da MROP

Período (ano)	Habitante	RSU depositado (Gg.ano⁻¹)	Produção de metano (m³ CH₄.ano⁻¹)
2010	1.219.585	249.283	5.415.196
2011	1.228.000	251.003	9.974.268
2012	1.236.473	252.735	13.818.731
2013	1.245.004	254.479	17.066.751
2014	1.253.594	256.235	19.817.001
2015	1.262.243	258.002	22.151.872
2016	1.270.952	259.783	24.140.168
2017	1.279.721	261.575	25.839.338
2018	1.288.551	263.380	27.297.359
2019	1.297.442	265.197	28.554.288
2020	1.306.394	267.027	29.643.578
2021	1.315.408	268.869	30.593.163
2022	1.324.484	270.725	31.426.369
2023	1.333.622	272.592	32.162.673
2024	1.342.823	274.473	32.818.344
2025	1.352.088	276.367	33.406.970
2026	1.361.417	278.274	33.939.898
2027	1.370.810	280.194	34.426.601
2028	1.380.268	282.127	34.874.995
2029	1.389.791	284.073	35.291.690
2030*	1.399.380	286.033	35.682.208
2031			29.794.772
2032			24.878.742
2033			20.773.839
2034			17.346.230
2035			14.484.165
2036			12.094.330
2037			10.098.809
2038			8.432.542
2039			7.041.203
2040			5.879.430
2041			4.909.345
2042			4.099.321
2043			3.422.947
2044			2.858.173

Fonte: Elaboração autora

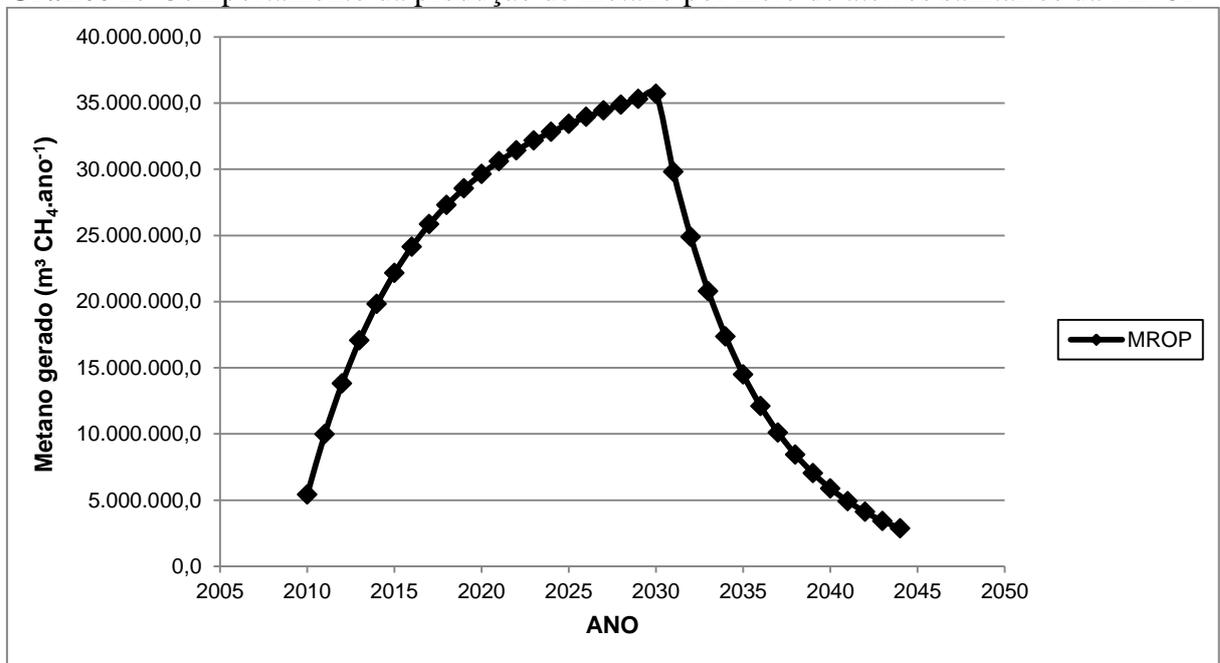
Nota: * encerramento de recebimento de RSU no aterro.

Gráfico 1. Comportamento da produção de gás metano por meio de aterros sanitários das microrregiões de Cascavel, Foz do Iguaçu e Toledo



Fonte: Elaboração autora

Gráfico 2. Comportamento da produção de metano por meio de aterros sanitários da MROP



Fonte: Elaboração autora

Conforme mostra o Gráfico 1, no ano de 2010 a microrregião de Cascavel gerou $1.922.507 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 \cdot \text{ano}^{-1}$, tendo seu maior nível de produção no ano de 2030, $12.774.438 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 \cdot \text{ano}^{-1}$, o mesmo comportamento ocorreu em outras microrregiões. No caso de Foz do Iguaçu, o potencial de produção chega a $12.056.014 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 \cdot \text{ano}^{-1}$, e em Toledo a $11.052.802 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 \cdot \text{ano}^{-1}$.

Ao analisar o potencial de toda MROP a produção máxima de gás metano foi de $35.628.208 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 \cdot \text{ano}^{-1}$, como mostra o Gráfico 2.

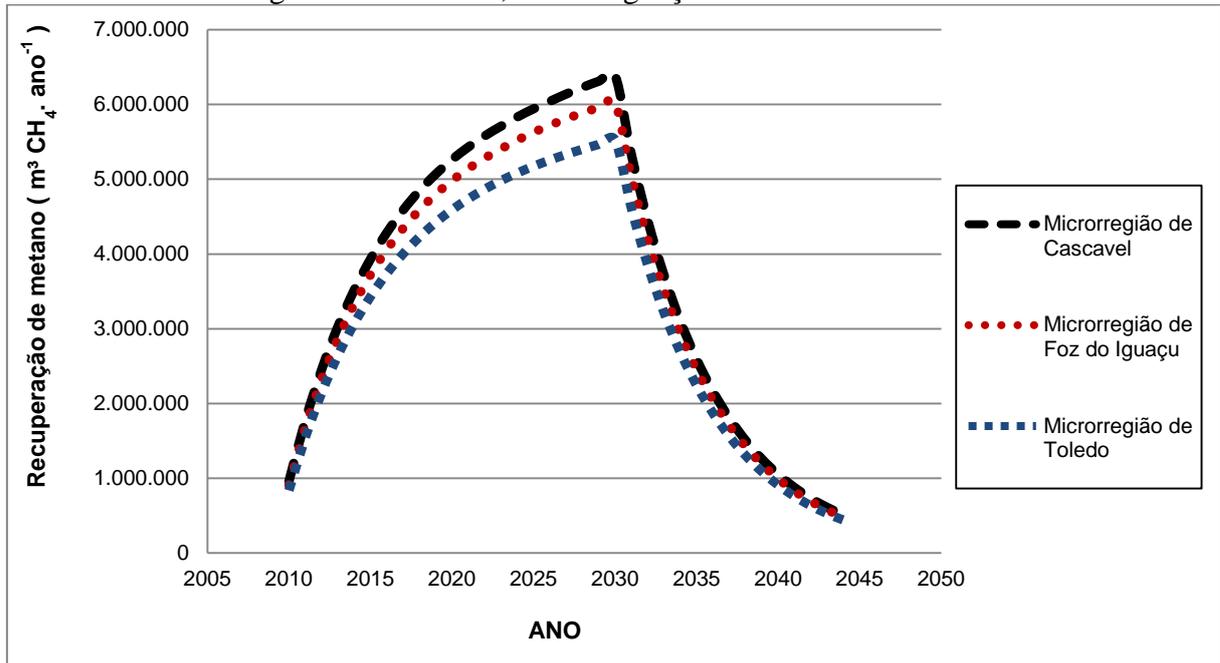
Os Gráficos 1 e 2 foram calculados segundo a metodologia do Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa (IPCC, 1996, 2006), o que seria uma real produção de gás metano em aterro. Porém, não é possível coletar toda a produção desse gás para o aproveitamento energético. Esse fato acontece devido às condições construtivas e de operação dos aterros. Portanto, é necessário fazer uma correção da quantidade de biogás que escapa para a atmosfera, pois, não é coletado pelo sistema de drenagem. Nesse caso, alguns estudos utilizaram uma taxa de recuperação de biogás em aterros sanitário, como Pecora (2006) e Abreu (2009).

Para tanto, calcularam-se os dois índices de recuperação de biogás (IRB) para o aproveitamento do gás metano para a produção de energia. O IRB 50% foi estimado em uma baixa recuperação, como mostram os resultados nos Gráficos 3 e 4. E o IRB 70%, que revelam uma recuperação otimista, tem os resultados apresentados nos Gráficos 5 e 6.

Com os índices de recuperação IRB 50% e IRB 70% a produção de gás de metano foi reduzida, conseqüentemente um potencial de aproveitamento energético menor, porém com uma estimativa aproximada da realidade.

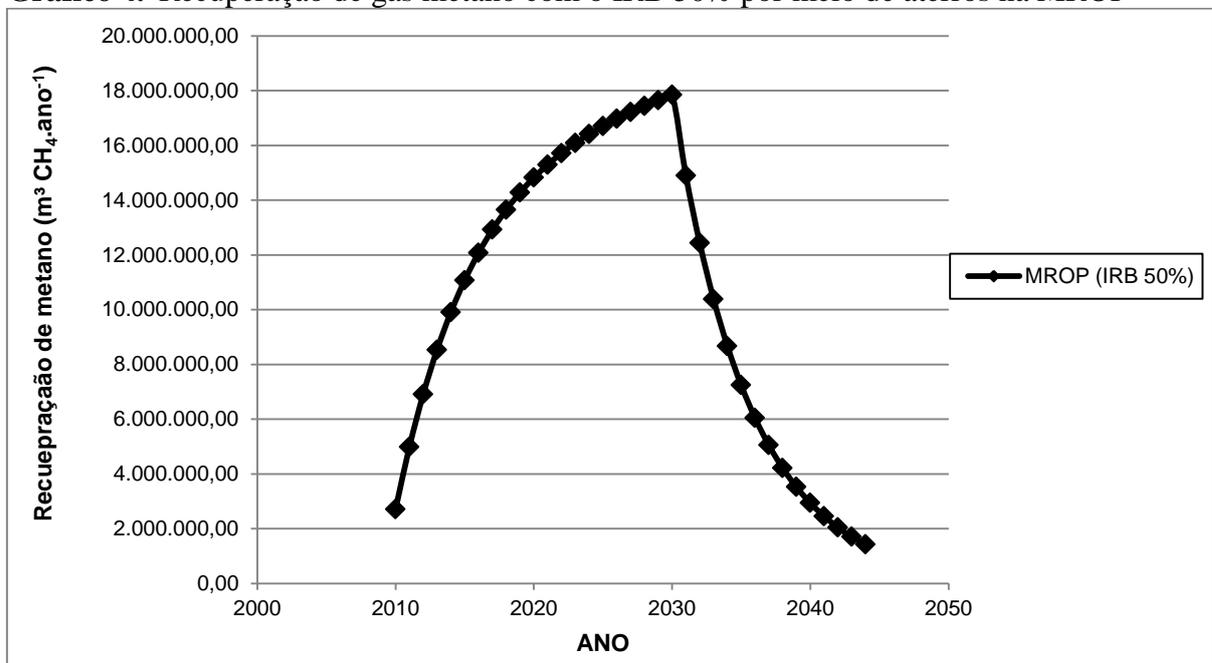
Para um IRB 50% estimou-se uma produção de gás metano para a microrregião de Cascavel de $6.387.219 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 \cdot \text{ano}^{-1}$. No caso da microrregião de Foz do Iguaçu o valor foi de $6.028.007 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 \cdot \text{ano}^{-1}$. E a microrregião de Toledo $5.526.041 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 \cdot \text{ano}^{-1}$, conforme mostra o Gráfico 3. Esses dados apresentados são dos níveis máximos das curvas de produção de gás metano, que ocorreram no ano de 2030, o último ano de recebimento e fechamento do aterro.

Gráfico 3. Recuperação de gás metano com o IRB 50%, por meio de aterros sanitários nas microrregiões de Cascavel, Foz do Iguaçu e Toledo



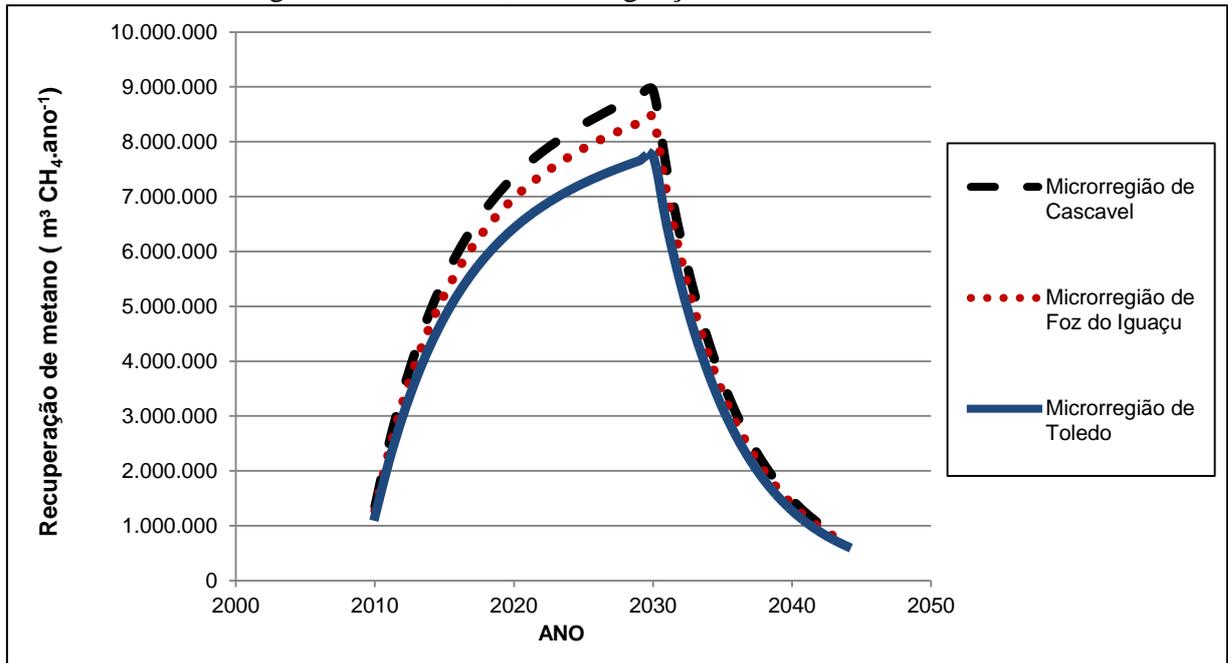
Fonte: Elaboração autora

Gráfico 4. Recuperação de gás metano com o IRB 50% por meio de aterros na MROP



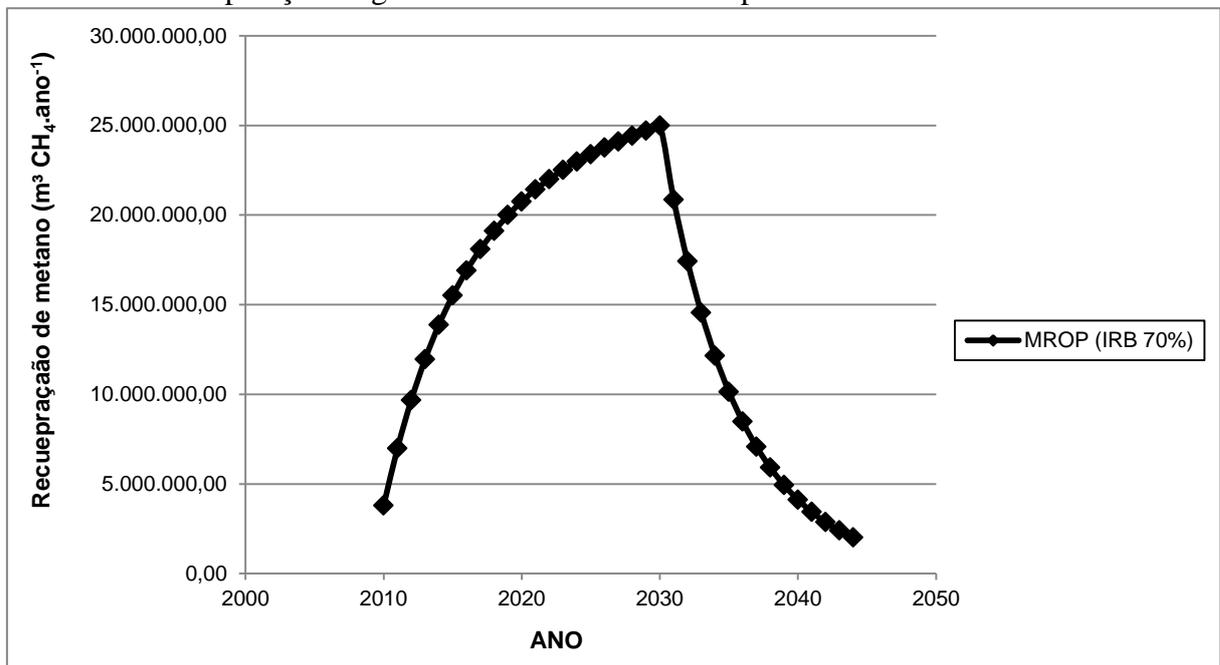
Fonte: Elaboração autora

Gráfico 5. Recuperação de gás metano com o IRB 70% por meio de aterros nas microrregiões de Cascavel, Foz do Iguaçu e Toledo



Fonte: Elaboração autora

Gráfico 6. Recuperação de gás metano com o IRB 70% por meio de aterros na MROP



Fonte: Elaboração autora

No caso do IRB 70% houve um aumento na recuperação de gás metano nos aterros quando comparado IRB 50%. A microrregião de Cascavel atingiu seu nível mais alto, uma produção de 8.942.106 m³ CH₄. ano⁻¹, enquanto Foz do Iguaçu foi de 8.439.210 m³ CH₄. ano⁻¹, e Toledo produziu 7.736.916 m³ CH₄. ano⁻¹, conforme mostra o Gráfico 5.

Ao analisar o Gráfico 2 o potencial de produção é de $37.912.346 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 \cdot \text{ano}^{-1}$ na MROP. Como é impossível fazer uma coleta completa do gás metano produzido nos aterros sanitários, pode-se estimar um potencial energético com uma baixa recuperação de IRB 50%, o que diminui a produção para $17.841.104 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 \cdot \text{ano}^{-1}$, como mostra o Gráfico 4; ou, aplicando uma recuperando mais otimista, pode-se gerar $24.977.546 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 \cdot \text{ano}^{-1}$, com IRB 70%, definido no Gráfico 6.

Mas o IRB pode ser melhorado por meio de algumas aplicações técnicas adotadas nos aterros. Segundo os estudos realizados em aterros sanitários na Alemanha pelos pesquisadores Oonk & Boom (1995), em sistemas ativos de aproveitamento do biogás, é possível atingirem 50 a 75% de eficiência, utilizando-se cobertura de terra. Mas esse índice pode aumentar para 100% de eficiência quando camadas de solo argiloso ou mantas de PEAD (Polietileno de alta densidade) forem utilizadas como cobertura. As mesmas melhorias citadas para a coleta de biogás foram aplicadas por Ensinas (2003) em seus estudos, no aterro sanitário Delta em Campinas, São Paulo.

Para avaliar o potencial das microrregiões e toda a MROP adotou-se o IRB 50% e o IRB 70% para um estimativo real de produção de energia elétrica.

4.1.2 Potencial de energia elétrica por meio de aterro sanitários das microrregiões da MROP

O potencial de geração de energia elétrica das microrregiões de Cascavel, Foz do Iguaçu e Toledo e todo potencial da MROP foram avaliados por diferentes tecnologias de conversão de energia, como por grupo gerador, representados pelo Módulo 1 (31% eficiência), Módulo 2 (35,8% eficiência), Módulo 3 (38,9% eficiência), e o Modulo 4 (33% eficiência), adotando microturbinas. Para cada módulo calculou-se a produção de eletricidade em função do IRB 50% e o IRB 70%.

O comportamento das curvas de potências disponíveis é simétrica e proporcional à geração de gás metano nos aterros sanitários, calculados nos módulos 1, 2, 3 e 4 para as microrregiões e toda a MROP, estão apresentados nos Gráficos 7, 8, 9 e 10.

Ao analisar os gráficos 7, 8, 9 e 10, para os IRB 50% e IRB 70%, o comportamento da curva do Módulo 3, empregando a tecnologia de grupo gerador, resultou em melhor potência quando comparado a outros módulos, devido à sua eficiência de 38,9 % de conversão em energia elétrica. O Módulo 2, com a eficiência de 35,8%, obteve o segundo maior desempenho para geração de energia elétrica. E, por último, com menor eficiência

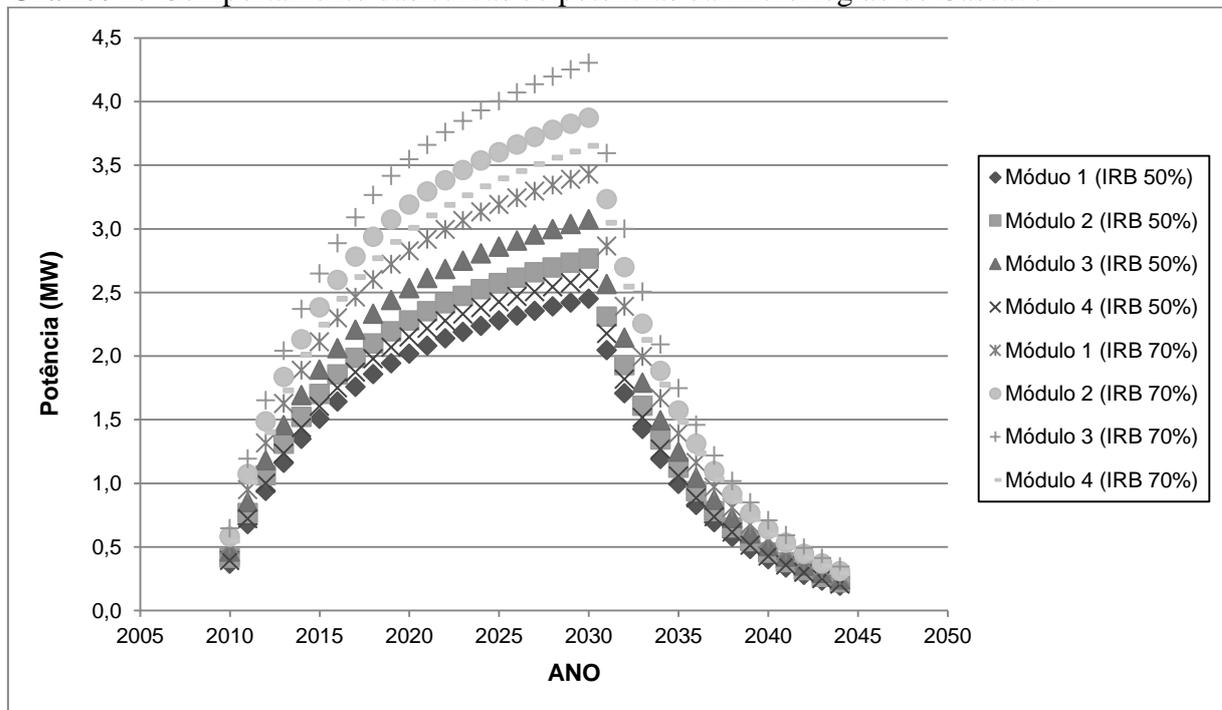
(31%) ficou o Módulo 1. No caso da microturbina a gás, representado pelo Módulo 4, a conversão para energia elétrica é de 33% de eficiência, ficando em terceira opção de melhor desempenho em geração de energia elétrica.

É possível gerar uma potência máxima de eletricidade com o IRB 70% de 4,3 MW no Módulo 3, ou de 3,1 MW com IRB 50%, para a microrregião de Cascavel, conforme mostra o Gráfico 7. Mas, o potencial pode diminuir para 2,5 MW no Módulo 1 (IRB 50%), e utilizando as microturbinas a gás no Módulo 4 geram-se 3,7 MW (IRB 70%).

O potencial da microrregião de Foz do Iguaçu tem a capacidade de gerar 4,1 MW com o Módulo 3, isto com o IRB 70%, ou 2,9 MW para o IRB 50%. O potencial pode diminuir para 2,3 MW (IRB 50%) ou 3,2 MW (IRB 70%) no Módulo 1, conforme mostra o Gráfico 8. Na microrregião de Toledo a geração de energia elétrica foi a menor da MROP, sendo que o IRB 70% pode gerar 3,7 MW (Módulo 3), ou 2,7 MW com IRB 50%, segundo dados apresentados no Gráfico 9. A menor potencial pode chegar a 2,1 MW (Módulo 1) com IRB 50%, até 3,0 MW com o IRB 70%.

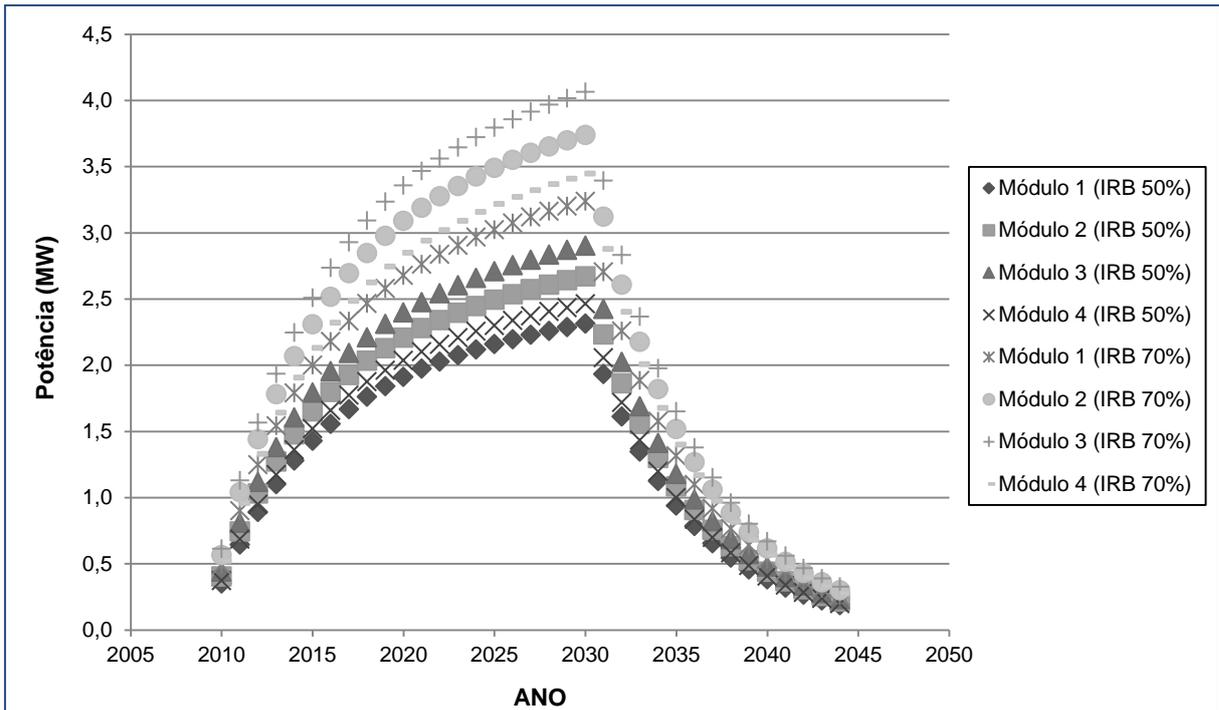
O potencial da MROP com IRB 70% pode gerar 12,0 MW, ou, 8,6 MW com IRB 50% no Módulo 3. Esse resultado diminui com o Módulo 1 para 6,8 MW no IRB 50%, ou, 9,6 MW para o IRB 70% , conforme mostra o Gráfico 10.

Gráfico 7. Comportamento das curvas de potências da microrregião de Cascavel



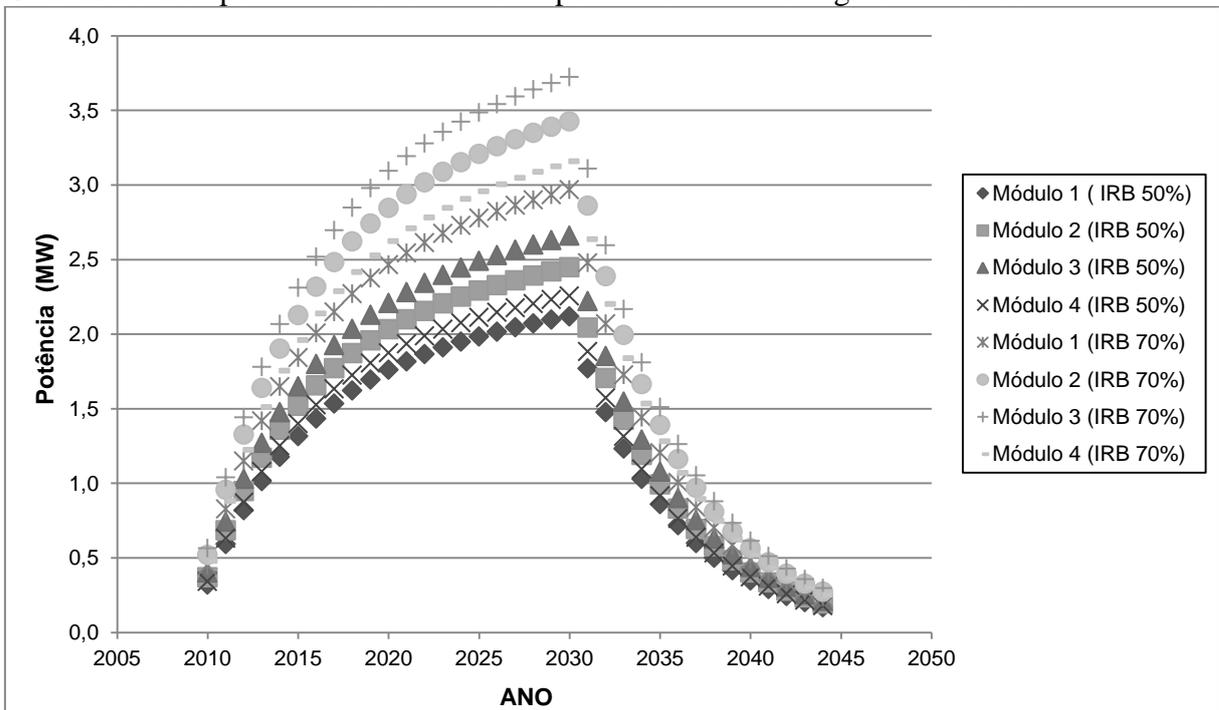
Fonte: Elaboração autora

Gráfico 8. Comportamento das curvas de potências da microrregião de Foz do Iguaçu



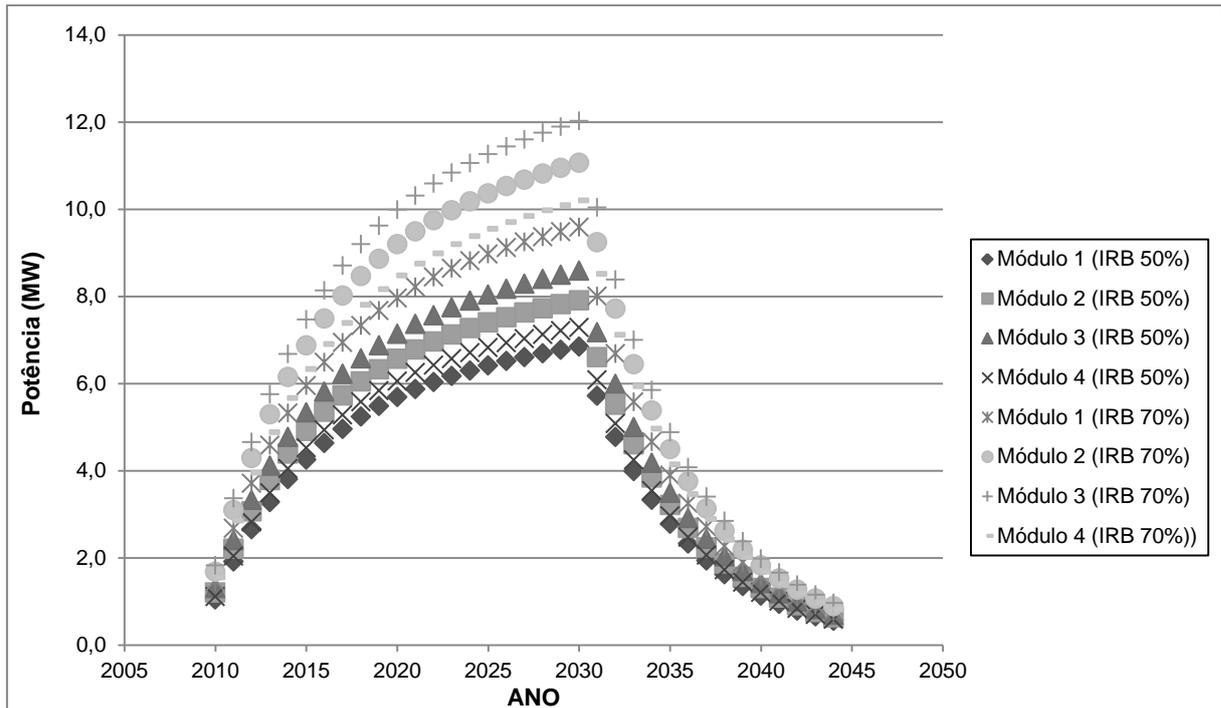
Fonte: Elaboração autora

Gráfico 9. Comportamento das curvas de potências da microrregião de Toledo



Fonte: Elaboração autora

Gráfico 10. Comportamento das curvas de potências da MROP



Fonte: Elaboração autora

Em função dos pontos máximos de geração de potência definidos nos Gráficos 7, 8, 9 e 10, sabe-se que a geração de gás metano não é constante ao longo dos anos, e torna-se impossível operar em uma faixa tão ampla de potência.

Nesse caso, calculou-se a média de aproveitamento de potência disponível no determinado tempo de 34 anos (2010 a 2044 anos) dos aterros sanitários, como são apresentados os dados nos Gráficos 11, 12, 13 e 14.

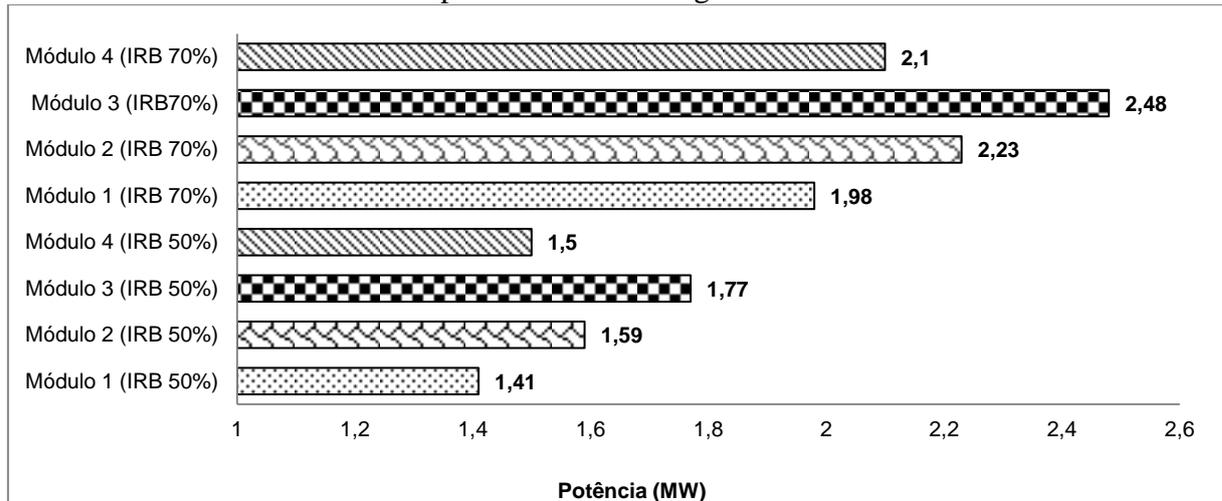
A potência média gerada pela microrregião de Cascavel, conforme Gráfico 11, e como já visto, no que tange ao Módulo 3, apresentou melhor desempenho de geração de energia elétrica, resultando numa potência média de 2,48 MW com um IRB 70% , e 1,77 MW utilizando IRB 50% . Os menores potenciais gerados foram de 1,20 MW (IRB 50%) e 1,41 MW (IRB 70%) no Módulo 1.

Na microrregião de Foz do Iguaçu obtiveram-se as seguintes potências médias de aproveitamento com IRB 70%: no Módulo 1, de 1,87 MW; e no Módulo 3, de 2,35 MW Quando utilizado IRB 50%: o Módulo 1 produziu 1,33 MW; e o Módulo 3 produziu 1,67 MW – como mostra o Gráfico 12.

O menor potencial de geração de energia elétrica da MROP foi à microrregião de Toledo, conforme mostra o Gráfico 13. O IRB 70% produziu 2,20 MW no Módulo 3, e com o Módulo 1 a geração foi de 1,70 MW. Já no caso do IRB 50% o Módulo 1 gerou 1,30 MW, e o Módulo 3 gerou 1,50 MW.

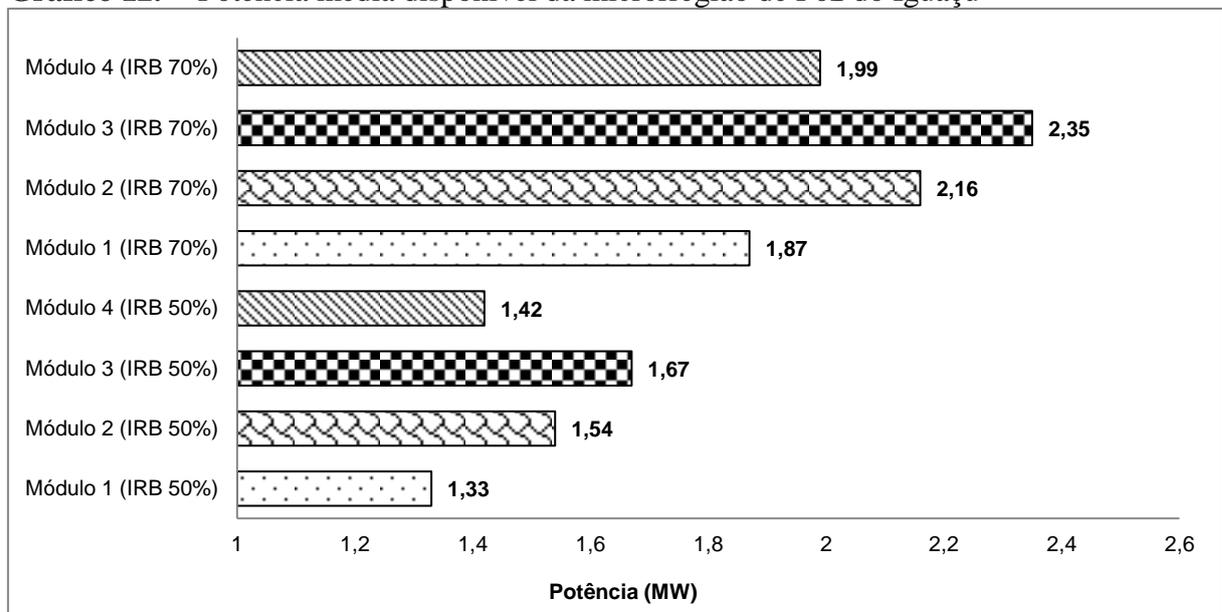
A MROP, utilizando o gás metano oriundo de aterros sanitários para geração de energia elétrica, tem seu potencial de produção afetada pelo IRB. Conforme mostra o Gráfico 14, o IRB 70% com o Módulo 1 tem a capacidade de produzir 5,60 MW, e no Módulo 3 pode gerar até 7,0 MW. Com o IRB 50% a produção de energia elétrica diminui consideravelmente para 4,0 MW no Módulo 1, e no caso do Módulo 3 para 5,0 MW.

Gráfico 11. Potência média disponível da microrregião de Cascavel



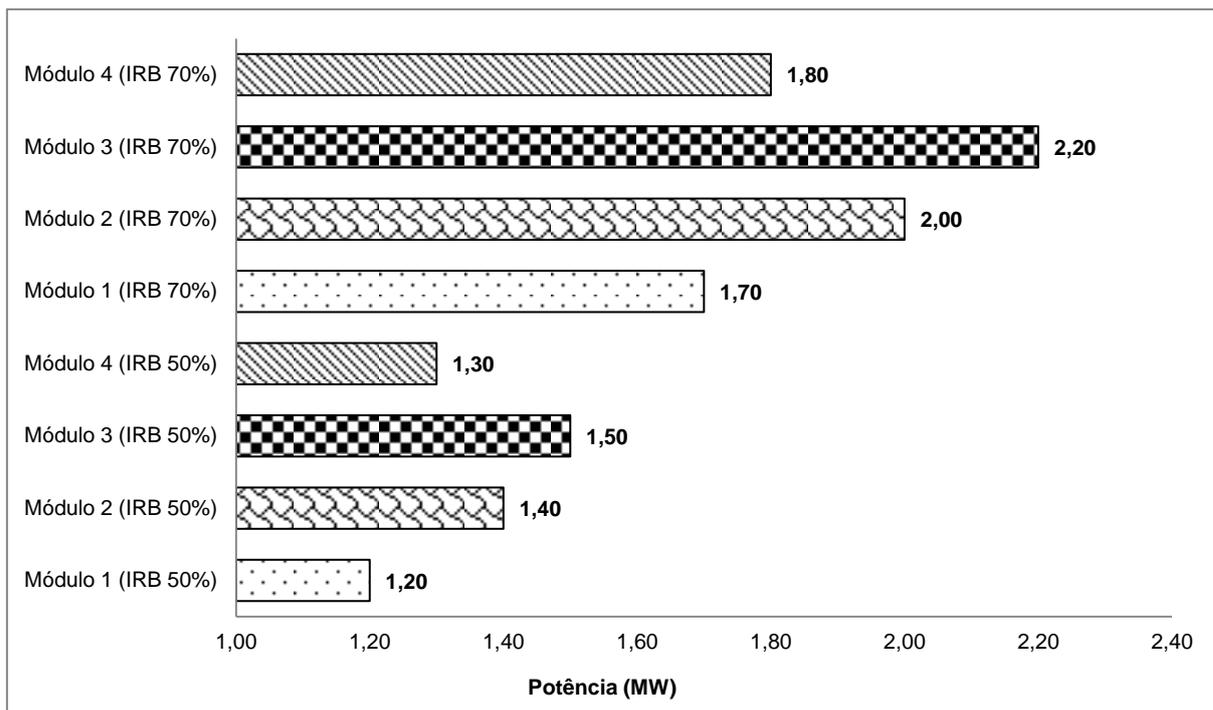
Fonte: Elaboração autora

Gráfico 12. Potência média disponível da microrregião de Foz do Iguaçu



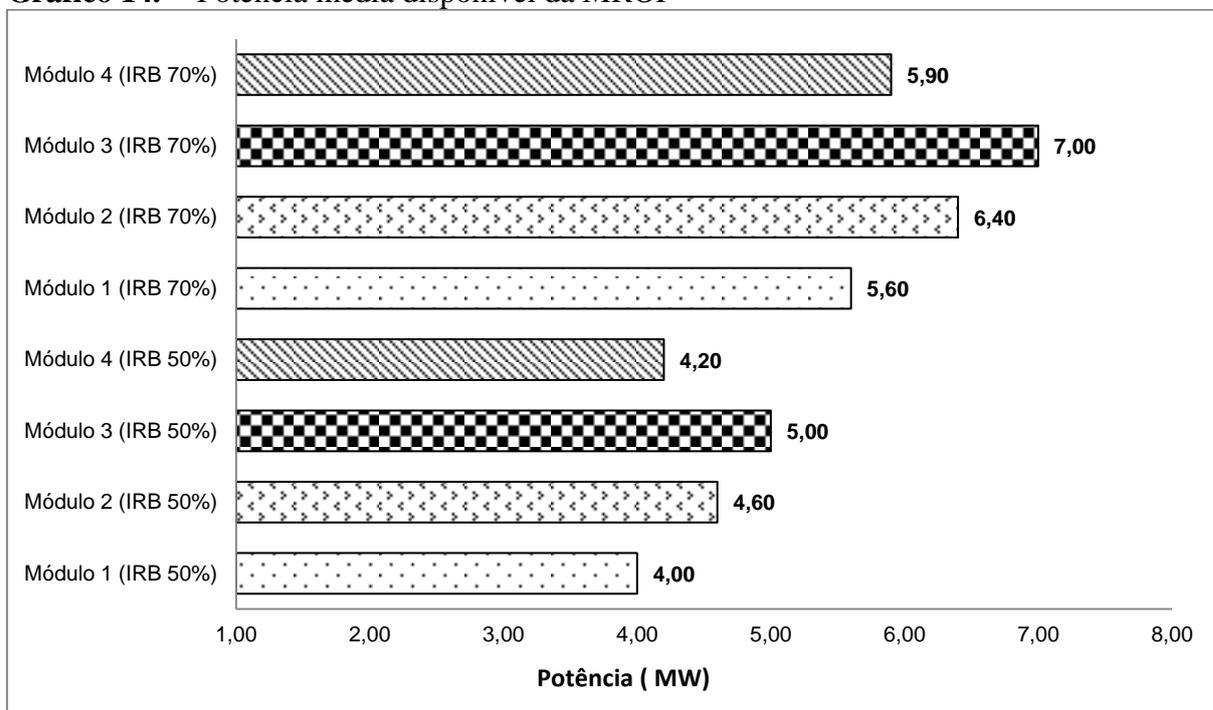
Fonte: Elaboração autora.

Gráfico 13. Potência média disponível da microrregião de Toledo



Fonte: Elaboração autora

Gráfico 14. Potência média disponível da MROP



Fonte: Elaboração autora

Com base na estimativa do potencial de produção de energia elétrica produzida utilizando o gás metano de aterro na MROP, conforme mostra a Tabela 27, observa-se que a energia gerada depende da tecnologia de conversão aplicada. Conforme os módulos adotados

neste estudo, essas tecnologias foram aplicadas trabalhando com 100% de sua carga, tratando-se tanto do motor a gás como da microturbina a gás. A Tabela 28 apresenta a potência e a energia disponível para cada microrregião e toda MROP, calculado sob o IRB 50% e IRB 70%.

Em termo de custo e benefício o grupo gerador para a conversão energética do biogás possui maior eficiência, além de ter o custo mais baixo. No caso, as microturbinas em comparação ao grupo gerador destacam-se pelas baixas emissões atmosféricas, baixos níveis de ruído e vibração, flexibilidade de combustível, dimensões reduzidas e simplicidade de instalação, podendo ser instalada em locais cobertos ou ao ar livre. Porém, algumas barreiras ainda impedem sua larga utilização: tecnologia importada; alto custo de operação e manutenção; e menor eficiência – quando comparada a outras tecnologias existentes (CARESANA et al., 2011; FIGUEIREDO, 2011; PECORA, 2006).

Tabela 28. A potência e energia disponível gerada nas microrregiões e MROP, conforme IRB de 50% e IRB 70%

Microrregião	Módulo	IRB 50%		IRB 70%	
		MW	(MWh.ano ⁻¹)	MW	(MWh.ano ⁻¹)
Cascavel	1	1,41	11.280	1,98	15.840
	2	1,59	12.720	2,23	17.840
	3	1,77	14.160	2,48	19.840
	4	1,50	12.000	2,10	16.800
Foz do Iguaçu	1	1,33	10.640	1,87	14.960
	2	1,54	12.320	2,16	17.280
	3	1,66	13.280	2,35	18.800
	4	1,41	11.280	1,99	15.920
Toledo	1	1,20	9.600	1,70	13.600
	2	1,40	11.200	2,00	16.000
	3	1,50	12.000	2,20	17.600
	4	1,30	10.400	1,80	14.400
MROP	1	4,00	32.000	5,61	44.880
	2	4,62	36.960	6,42	51.360
	3	5,03	40.240	7,03	56.240
	4	4,24	33.920	5,90	47.200

Fonte: Elaboração autora

4.2 Cenário 02 - Avaliação de Produção de Eletricidade com Incineração

4.2.1 Levantamento de produção de eletricidade gerada pela incineração de RSU

No cenário 02 foi avaliada a produção de eletricidade gerada por tonelada de RSU incinerado. Para a determinação do potencial de geração de eletricidade por incineração utilizaram-se duas taxas de produção de energia, sendo: Taxa 01, baixa produção, de 230 kWh. Gg⁻¹ RSU; Taxa 02, elevada produção, de 465 kWh. Gg⁻¹ RSU.

Para fins de estimativa foi realizada uma projeção entre 2010 a 2044. Essa projeção do ano de 2010 para o ano de 2044 foi adotada para acompanhar a projeção do Cenário 01, que avaliou a estimativa de geração de energia elétrica utilizando o gás metano de aterro sanitário. Desse modo, foi possível avaliar o potencial de ambos cenários nesse determinado período.

É importante esta projeção entre o período de 2010 a 2044, por causa do aumento da produção de lixo, que é afetado pela taxa de crescimento populacional. Esse fator é relevante para a produção de RSU que, conseqüentemente, afeta o potencial de geração de energia elétrica. A produção de geração de energia elétrica pela incineração de RSU das microrregiões de Cascavel, Foz de Iguaçu e Toledo e toda MROP é apresentada nas Tabelas 29, 30, 31 e 32.

Tabela 29. Produção de geração de energia elétrica pela incineração de RSU na microrregião de Cascavel

Ano	Habitante	Gg.ano ⁻¹ RSU	TAXA 01		TAXA 02	
			MWh .ano ⁻¹	MW	MWh .ano ⁻¹	MW
2010	432.978	88.501	20.355	2,5	41.153	5,1
2011	435.965	89.111	20.496	2,6	41.437	5,2
2012	438.973	89.726	20.637	2,6	41.723	5,2
2013	442.001	90.345	20.779	2,6	42.010	5,3
2014	445.050	90.968	20.923	2,6	42.300	5,3
2015	448.120	91.596	21.067	2,6	42.592	5,3
2016	451.212	92.228	21.212	2,7	42.886	5,4
2017	454.325	92.864	21.359	2,7	43.182	5,4
2018	457.459	93.505	21.506	2,7	43.480	5,4
2019	460.615	94.150	21.654	2,7	43.780	5,5
2020	463.793	94.799	21.804	2,7	44.082	5,5
2021	466.993	95.453	21.954	2,7	44.386	5,5
2022	470.215	96.112	22.106	2,8	44.692	5,6

Continua...

...continuação

2023	473.459	96.775	22.258	2,8	45.000	5,6
2024	476.722	97.442	22.412	2,8	45.311	5,7
2025	480.011	98.114	22.566	2,8	45.623	5,7
2026	483.323	98.791	22.722	2,8	45.938	5,7
2027	486.657	99.473	22.879	2,9	46.255	5,8
2028	490.014	100.159	23.037	2,9	46.574	5,8
2029	493.395	100.850	23.195	2,9	46.895	5,9
2030	496.799	101.546	23.356	2,9	47.219	5,9
2031	500.226	102.246	23.517	2,9	47.544	5,9
2032	503.677	102.952	23.679	3,0	47.872	6,0
2033	507.152	103.662	23.842	3,0	48.203	6,0
2034	510.651	104.377	24.007	3,0	48.535	6,1
2035	514.174	105.097	24.172	3,0	48.870	6,1
2036	517.721	105.822	24.339	3,0	49.207	6,2
2037	521.293	106.552	24.507	3,1	49.547	6,2
2038	524.889	107.287	24.676	3,1	49.889	6,2
2039	528.510	108.027	24.846	3,1	50.233	6,3
2040	532.156	108.773	25.018	3,1	50.579	6,3
2041	535.827	109.523	25.190	3,1	50.928	6,4
2042	539.524	110.279	25.364	3,2	51.280	6,4
2043	543.246	111.039	25.539	3,2	51.633	6,5
2044	546.994	111.806	25.715	3,2	51.990	6,5

Fonte: elaboração autora

Tabela 30. Produção de geração de energia elétrica pela incineração de RSU na microrregião de Foz do Iguaçu

Ano	Habitante	Gg.ano ⁻¹ RSU	TAXA 01		TAXA 02	
			MWh .ano ⁻¹	MW	MWh .ano ⁻¹	MW
2010	408.827	83.564	19.220	2,4	38.857	4,9
2011	411.647	84.141	19.352	2,4	39.125	4,9
2012	414.487	84.721	19.486	2,4	39.395	4,9
2013	417.346	85.306	19.620	2,5	39.667	5,0
2014	420.225	85.894	19.756	2,5	39.940	5,0
2015	423.124	86.487	19.892	2,5	40.216	5,0
2016	426.043	87.083	20.029	2,5	40.493	5,1
2017	428.982	87.684	20.167	2,5	40.773	5,1
2018	431.941	88.289	20.306	2,5	41.054	5,1
2019	434.921	88.898	20.447	2,6	41.337	5,2
2020	437.921	89.511	20.588	2,6	41.622	5,2
2021	440.942	90.129	20.730	2,6	41.909	5,2
2022	443.984	90.750	20.873	2,6	42.198	5,3
2023	447.047	91.376	21.017	2,6	42.490	5,3

Continua...

... continuação

2024	450.131	92.007	21.162	2,6	42.783	5,3
2025	453.236	92.641	21.308	2,7	43.078	5,4
2026	456.363	93.281	21.455	2,7	43.375	5,4
2027	459.511	93.924	21.603	2,7	43.674	5,5
2028	462.681	94.572	21.752	2,7	43.976	5,5
2029	465.873	95.224	21.902	2,7	44.279	5,5
2030	469.087	95.881	22.053	2,8	44.584	5,6
2031	472.323	96.543	22.205	2,8	44.892	5,6
2032	475.582	97.209	22.358	2,8	45.202	5,7
2033	478.863	97.880	22.512	2,8	45.514	5,7
2034	482.167	98.555	22.668	2,8	45.828	5,7
2035	485.493	99.235	22.824	2,9	46.144	5,8
2036	488.842	99.919	22.981	2,9	46.462	5,8
2037	492.215	100.609	23.140	2,9	46.783	5,8
2038	495.611	101.303	23.300	2,9	47.105	5,9
2039	499.030	102.002	23.460	2,9	47.430	5,9
2040	502.473	102.705	23.622	3,0	47.758	6,0
2041	505.940	103.414	23.785	3,0	48.087	6,0
2042	509.430	104.127	23.949	3,0	48.419	6,1
2043	512.945	104.846	24.115	3,0	48.753	6,1
2044	516.484	105.569	24.281	3,0	49.089	6,1

Fonte: elaboração autora

Tabela 31. Produção de geração de energia elétrica pela incineração de RSU na microrregião de Toledo

Ano	Habitantes	Gg.ano ⁻¹ RSU	TAXA 01		TAXA 02	
			MWh .ano ⁻¹	MW	MWh .ano ⁻¹	MW
2010	377.780	77.218	17.760	2,2	35.906	4,5
2011	380.386	77.751	17.883	2,2	36.154	4,5
2012	383.010	78.287	18.006	2,3	36.404	4,6
2013	385.652	78.827	18.130	2,3	36.655	4,6
2014	388.312	79.371	18.255	2,3	36.908	4,6
2015	390.991	79.919	18.381	2,3	37.162	4,6
2016	393.688	80.470	18.508	2,3	37.418	4,7
2017	396.404	81.025	18.636	2,3	37.677	4,7
2018	399.139	81.584	18.764	2,3	37.937	4,7
2019	401.893	82.147	18.894	2,4	38.198	4,8
2020	404.666	82.714	19.024	2,4	38.462	4,8
2021	407.458	83.284	19.155	2,4	38.727	4,8
2022	410.269	83.859	19.288	2,4	38.994	4,9
2023	413.099	84.437	19.421	2,4	39.263	4,9
2024	415.949	85.020	19.555	2,4	39.534	4,9

Continua...

...continuação

2025	418.819	85.607	19.690	2,5	39.807	5,0
2026	421.708	86.197	19.825	2,5	40.082	5,0
2027	424.617	86.792	19.962	2,5	40.358	5,0
2028	427.546	87.390	20.100	2,5	40.637	5,1
2029	430.496	87.993	20.238	2,5	40.917	5,1
2030	433.466	88.600	20.378	2,5	41.199	5,1
2031	436.456	89.212	20.519	2,6	41.483	5,2
2032	439.467	89.827	20.660	2,6	41.770	5,2
2033	442.499	90.447	20.803	2,6	42.058	5,3
2034	445.552	91.071	20.946	2,6	42.348	5,3
2035	448.626	91.699	21.091	2,6	42.640	5,3
2036	451.721	92.332	21.236	2,7	42.934	5,4
2037	454.378	92.875	21.361	2,7	43.187	5,4
2038	457.975	93.610	21.530	2,7	43.529	5,4
2039	461.135	94.256	21.679	2,7	43.829	5,5
2040	464.533	94.951	21.839	2,7	44.152	5,5
2041	467.738	95.606	21.989	2,7	44.457	5,6
2042	470.965	96.265	22.141	2,8	44.763	5,6
2043	474.214	96.929	22.294	2,8	45.072	5,6
2044	477.486	97.598	22.448	2,8	45.383	5,7

Fonte: elaboração autora

Tabela 32. Produção de geração de energia elétrica pela incineração de RSU na MROP

Ano	População	Gg.ano ⁻¹ RSU	TAXA 01		TAXA 02	
			MWh .ano ⁻¹	MW	MWh .ano ⁻¹	MW
2010	1.219.585,00	249.283	57.335	7,2	115.916	14,5
2011	1.228.000,00	251.003	57.730	7,2	116.716	14,6
2012	1.236.473,00	252.735	58.129	7,3	117.521	14,7
2013	1.245.004,00	254.479	58.530	7,3	118.332	14,8
2014	1.253.594,00	256.235	58.933	7,4	119.149	14,9
2015	1.262.243,00	258.002	59.340	7,4	119.971	15,0
2016	1.270.952,00	259.783	59.750	7,5	120.798	15,1
2017	1.279.721,00	261.575	60.162	7,5	121.632	15,2
2018	1.288.551,00	263.380	60.577	7,6	122.471	15,3
2019	1.297.442,00	265.197	60.995	7,6	123.316	15,4
2020	1.306.394,00	267.027	61.416	7,7	124.167	15,5
2021	1.315.408,00	268.869	61.839	7,7	125.024	15,6
2022	1.324.484,00	270.725	62.266	7,8	125.886	15,7
2023	1.333.622,00	272.592	62.696	7,8	126.755	15,8
2024	1.342.823,00	274.473	63.128	7,9	127.629	16,0
2025	1.352.088,00	276.367	63.564	7,9	128.510	16,1

Continua...

...continuação

2026	1.361.417,00	278.274	64.002	8,0	129.397	16,2
2027	1.370.810,00	280.194	64.444	8,1	130.290	16,3
2028	1.380.268,00	282.127	64.889	8,1	131.188	16,4
2029	1.389.791,00	284.073	65.336	8,2	132.094	16,5
2030	1.399.380,00	286.033	65.787	8,2	133.005	16,6
2031	1.409.035,00	288.007	66.241	8,3	133.923	16,7
2032	1.418.757,00	289.994	66.698	8,3	134.847	16,9
2033	1.428.546,00	291.995	67.158	8,4	135.777	17,0
2034	1.438.402,00	294.009	67.622	8,5	136.714	17,1
2035	1.448.326,00	296.038	68.088	8,5	137.657	17,2
2036	1.458.319,00	298.080	68.558	8,6	138.607	17,3
2037	1.468.381,00	300.137	69.031	8,6	139.563	17,4
2038	1.478.512,00	302.208	69.507	8,7	140.526	17,6
2039	1.488.713,00	304.293	69.987	8,7	141.496	17,7
2040	1.498.985,00	306.393	70.470	8,8	142.472	17,8
2041	1.509.327,00	308.506	70.956	8,9	143.455	17,9
2042	1.519.741,00	310.635	71.446	8,9	144.445	18,1
2043	1.530.227,00	312.778	71.939	9,0	145.441	18,2
2044	1.540.785,00	314.936	72.435	9,1	146.445	18,3

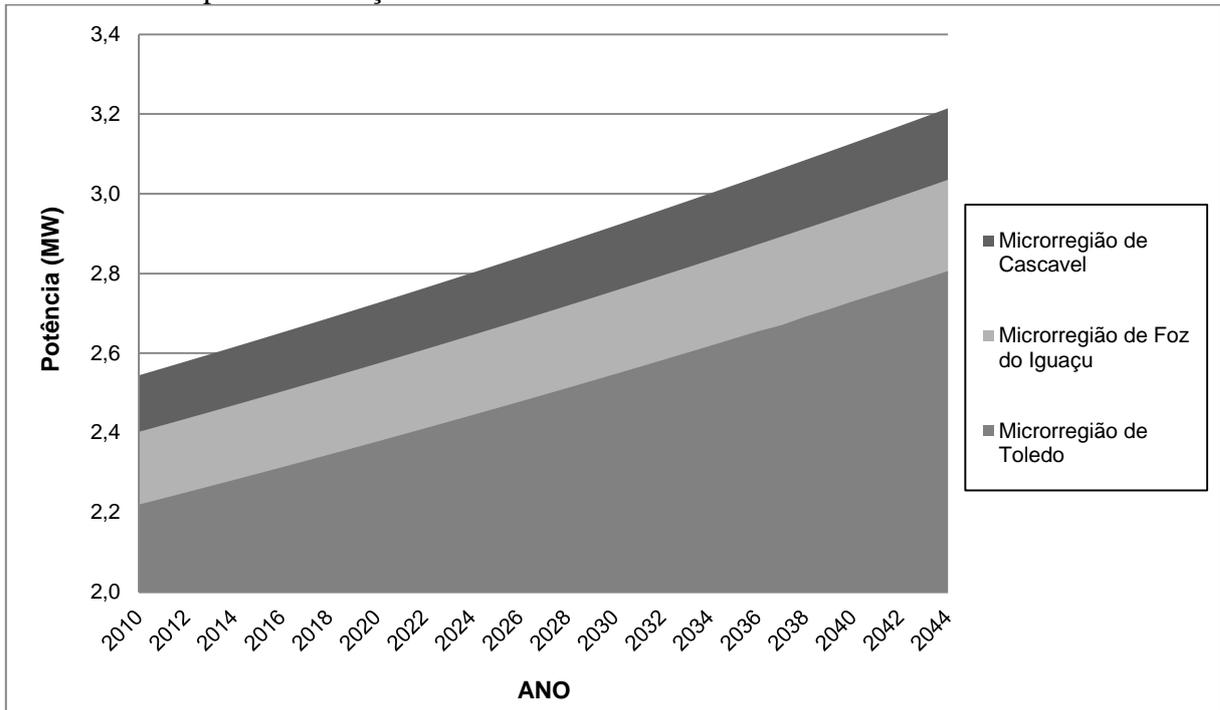
Fonte: elaboração autora

Nesse cenário, a microrregião de Cascavel apresentou um potencial de geração de eletricidade de 2,5 MW no ano de 2010, e atingiu uma potência de 3,2 MW no ano de 2044, para a Taxa 01, conforme mostra o Gráfico 15. No caso da produção mais elevada, observa-se que na Taxa 02 a geração de eletricidade é de 5,1 MW no ano de 2010 e passa para 6,5 MW no ano de 2044, como mostra o Gráfico 16.

A microrregião de Foz do Iguaçu com a Taxa 01 produziu uma potência de 2,4 MW no ano de 2010 e atingiu 3,0 MW no ano de 2044, como mostra o Gráfico 15. Ainda para essa microrregião, na Taxa 02 o potencial aumentou de 4,9 MW para 6,1 MW, de 2010 a 2044 respectivamente, conforme dados apresentados no Gráfico 16.

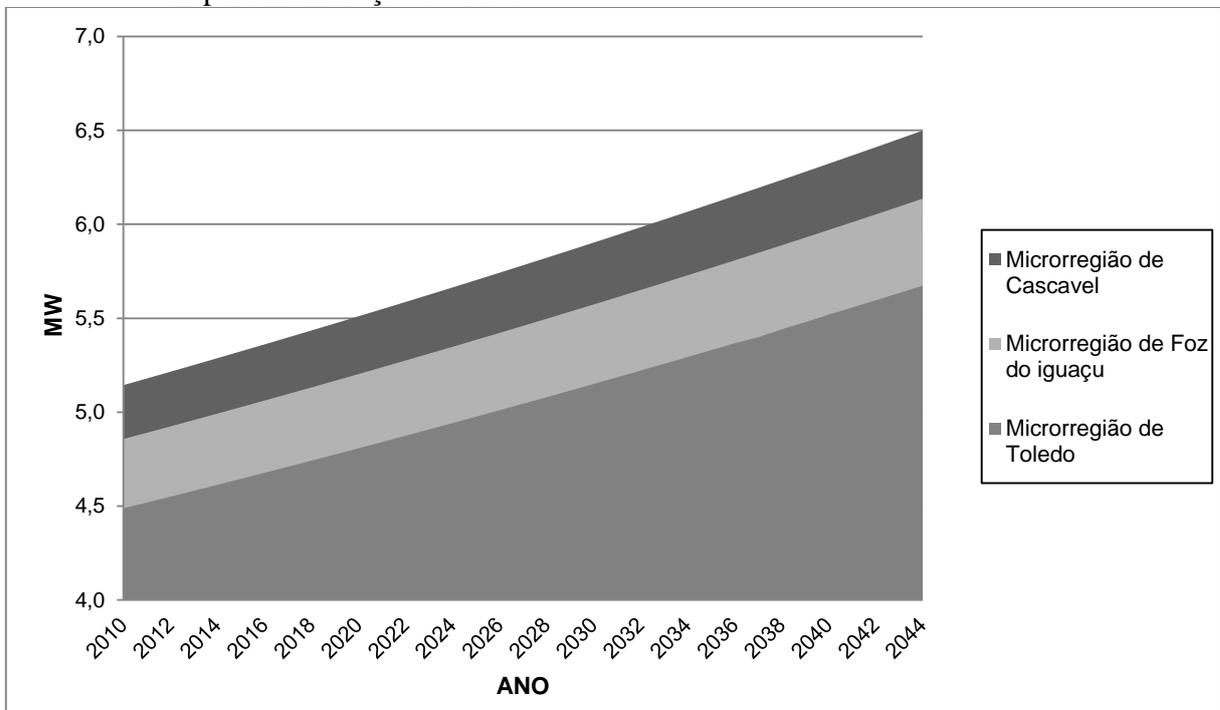
O menor potencial de geração de eletricidade nesse cenário foi a microrregião de Toledo, que iniciou o ano de 2010 com 2,2 MW e atingiu 2,8 MW ano de 2044, com a Taxa 01, conforme dados apresentados no Gráfico 15. No caso da Taxa 02, o potencial iniciou com 4,5 MW no ano de 2010 e atingiu 5,8 MW, conforme mostra o Gráfico 16.

Gráfico 15. Potencial de geração de energia elétrica das microrregiões utilizando a Taxa 01 para incineração do RSU



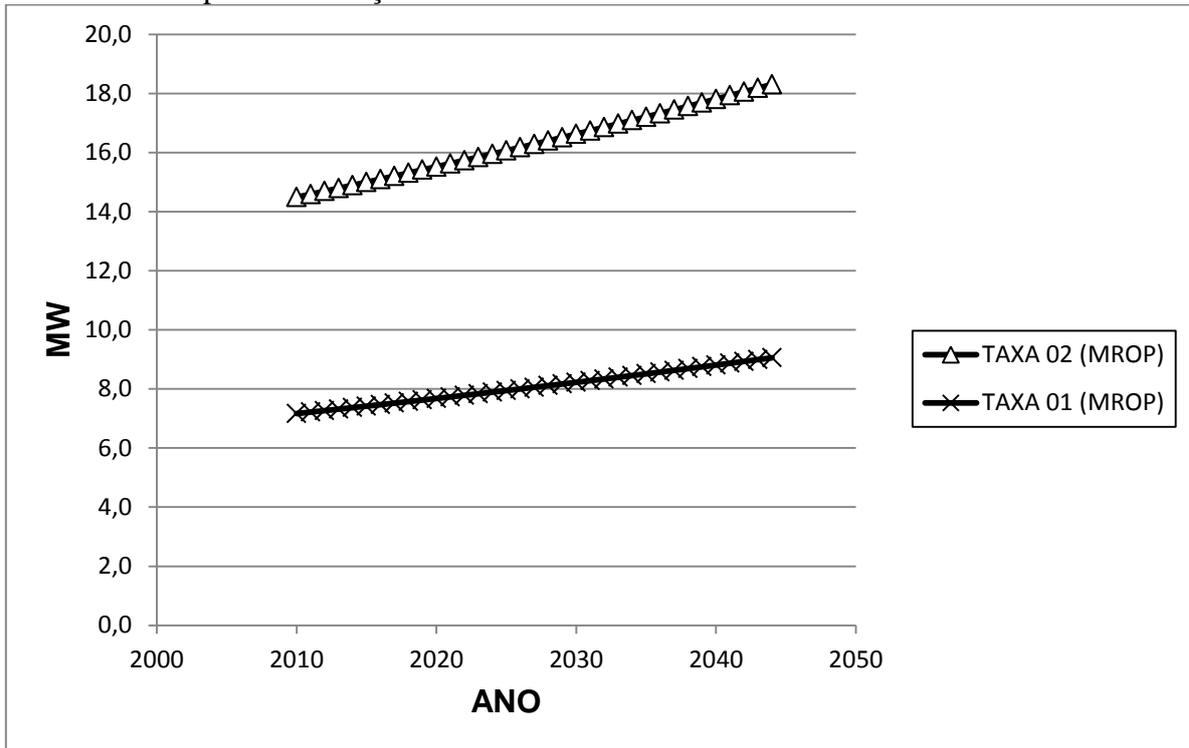
Fonte: Elaboração autora

Gráfico 16. Potencial de geração de energia elétrica das microrregiões utilizando a Taxa 02 para incineração do RSU



Fonte: Elaboração autora

Gráfico 17. Potencial de geração de energia elétrica da MROP utilizando Taxa 01 e Taxa 02 para incineração do RSU



Fonte: Elaboração autora

O Gráfico 17 apresenta o potencial de geração de energia elétrica da MROP, quando aplicado a Taxa 01, sendo correspondente a uma produção disponível de 9,1 MW no ano de 2044. Vale observar que a maior produção de eletricidade foi 18,3 MW para Taxa 02 ano de 2044.

Foi realizada a média do potencial da geração de energia elétrica, em função da Taxa 01 e Taxa 02 pela incineração de RSU ao longo dos 34 anos, para as microrregiões e toda MROP. Os dados são apresentados na Tabela 33.

Tabela 33. Média do potencial de geração de energia elétrica em função da Taxa 01 e Taxa 02 de incineração de RSU nas Microrregiões e toda MROP

Microrregião	TAXA 01		TAXA 02	
	Potência (MW)	Energia (MWh.ano ⁻¹)	Potência (MW)	Energia (MWh.ano ⁻¹)
Cascavel	2,9	22.934	5,8	46.366
Foz do Iguaçu	2,7	24.281	5,5	43.780
Toledo	2,5	21.655	5,1	40.457
MROP	8,1	64.600	16,3	130.604

É importante ressaltar que o potencial energético de incineração pode variar por influência de alguns fatores. Segundo Henrique (2004), conforme dados de estudo, esses fatores podem ser a variação regional da quantidade de resíduos; alteração regional da composição dos resíduos; futuras modificações na regulamentação e prática da disposição final de resíduos (minimização de geração de resíduos, reuso e reciclagem) – o que vai alterar a composição futura e a destinação final dos resíduos.

4.3 Suprimentos da Demanda de Energia Elétrica no Setor Rural e Residencial da MROP, Aplicando a Estimativa do Potencial Energético de RSU Produzido na Mesorregião

Nesse caso, utilizou-se a estimativa do potencial de energia elétrica gerada pelos RSU com a projeção de 2010 para 2044, e aplicou-se essa estimativa para suprir a demanda energética do consumo no setor rural e residencial da MROP no último levantamento de 2012. Os dados são apresentados na Tabela 22.

Para o Cenário 01, aplicou-se a média da geração de energia elétrica com base no IRB 50% e IRB 70%, do Módulo 1, que obteve a menor produção de geração de energia elétrica em função da eficiência de 31%, e do Módulo 3, com a produção mais elevada de energia elétrica em função da eficiência de 38,9%.

No caso do Cenário 02, utilizou-se a média da produção de eletricidade em função das Taxas 01 e 02 gerada na incineração de RSU.

O Quadro 8 mostra os dados utilizados para o levantamento da quantidade de energia suprida no setor rural e residencial pelo RSU nas microrregiões e na MROP.

Quadro 8. Cenários avaliados para suprimento da demanda de geração de energia elétrica no setor rural e residencial na MROP

Microrregião	Cenário estudado	Identificação	Energia (MWh.ano ⁻¹)
Cascavel	Cenário (1) Mód. 1 (IRB 50%)	Cenário 01 (A)	11.280
	Cenário (1) Mód. 3 (IRB 50%)	Cenário 01 (B)	14.160
	Cenário (1) Mód. 1 (IRB 70%)	Cenário 01 (C)	15.840
	Cenário (1) Mód. 3 (IRB 70%)	Cenário 01 (D)	19.840
	Cenário (2) (TAXA 01)	Cenário 02 (A)	25.715
	Cenário (2) (TAXA 02)	Cenário 02 (B)	51.990

Continua...

...continuação

Foz do Iguaçu	Cenário (1) Mód. 1 (IRB 50%)	Cenário 01 (A)	10.640
	Cenário (1) Mód. 3 (IRB 50%)	Cenário 01 (B)	13.280
	Cenário (1) Mód. 1 (IRB 70%)	Cenário 01 (C)	14.960
	Cenário (1) Mód. 3 (IRB 70%)	Cenário 01 (D)	18.800
	Cenário (2) (TAXA 01)	Cenário 02 (A)	24.448
	Cenário (2) (TAXA 02)	Cenário 02 (B)	49.090
Toledo			
Toledo	Cenário (1) Mód. 1 (IRB 50%)	Cenário 01 (A)	9.600
	Cenário (1) Mód. 3 (IRB 50%)	Cenário 01 (B)	12.000
	Cenário (1) Mód. 1 (IRB 70%)	Cenário 01 (C)	13.600
	Cenário (1) Mód. 3 (IRB 70%)	Cenário 01 (D)	17.600
	Cenário (2) (TAXA 01)	Cenário 02 (A)	22.448
	Cenário (2) (TAXA 02)	Cenário 02 (B)	45.383
MROP			
MROP	Cenário (1) Mód. 1 (IRB 50%)	Cenário 01 (A)	32.000
	Cenário (1) Mód. 3 (IRB 50%)	Cenário 01 (B)	40.240
	Cenário (1) Mód. 1 (IRB 70%)	Cenário 01 (C)	44.880
	Cenário (1) Mód. 3 (IRB 70%)	Cenário 01 (D)	56.240
	Cenário (2) (TAXA 01)	Cenário 02 (A)	64.600
	Cenário (2) (TAXA 02)	Cenário 02 (B)	130.604

Ao analisar o aproveitamento energético de RSU nas microrregiões de Cascavel e de Foz do Iguaçu, o setor rural mostrou-se com maior capacidade de ter sua demanda energética suprida. As Figuras 16 e 17 mostram os resultados obtidos. Para ambas as microrregiões a energia suprida pela incineração tem seu maior potencial para substituição da demanda de eletricidade convencional.

A microrregião de Cascavel supriria no setor rural com Módulo 1, com IRB 50% de 8,7%, com IRB 70% de 12,27%. No caso do Módulo 3, 10,9% (IRB 50%) e 15,4% (IRB 70%). Mas, utilizando a incineração para geração de eletricidade, esse número se elevaria suprimindo uma demanda de 19,9% com a Taxa 01, e 40,3% com a Taxa 02, como mostra a Figura 16.

Para microrregião de Foz do Iguaçu, a energia gerada pela incineração pode suprir uma demanda de energia elétrica no setor rural de 26,9% com a Taxa 01, e podendo suprir ainda a metade com a Taxa 02 de 54%, conforme mostra a Figura 17.

O setor rural da microrregião de Toledo apresenta o maior consumo de eletricidade da MROP. Nesse caso, a demanda de energia elétrica suprida foi maior para o setor residencial. Como mostra a Figura 18, quanto à incineração os resultados foram melhores no setor residencial, com a Taxa 01 de 9,54% e Taxa 02 de 19%.

A avaliação entre os cenários analisados na MROP para demanda de energia suprida nos setores rural e residencial, conforme mostra a Figura 19, revela que a incineração supriu maior demanda energética convencional no setor rural. Esse resultado é devido ao menor consumo no referido setor.

Entre os cenários estudados para a avaliação do potencial energético da MROP, a incineração de resíduos se mostrou como a escolha mais adequada, do ponto de vista da eficiência na conversão energética, e uma das principais vantagens do processo de incineração é a redução do volume e peso dos resíduos (reduz o volume de massa de 70%, podendo chegar até 90%), o que não exige uma longa permanência em aterro sanitário.

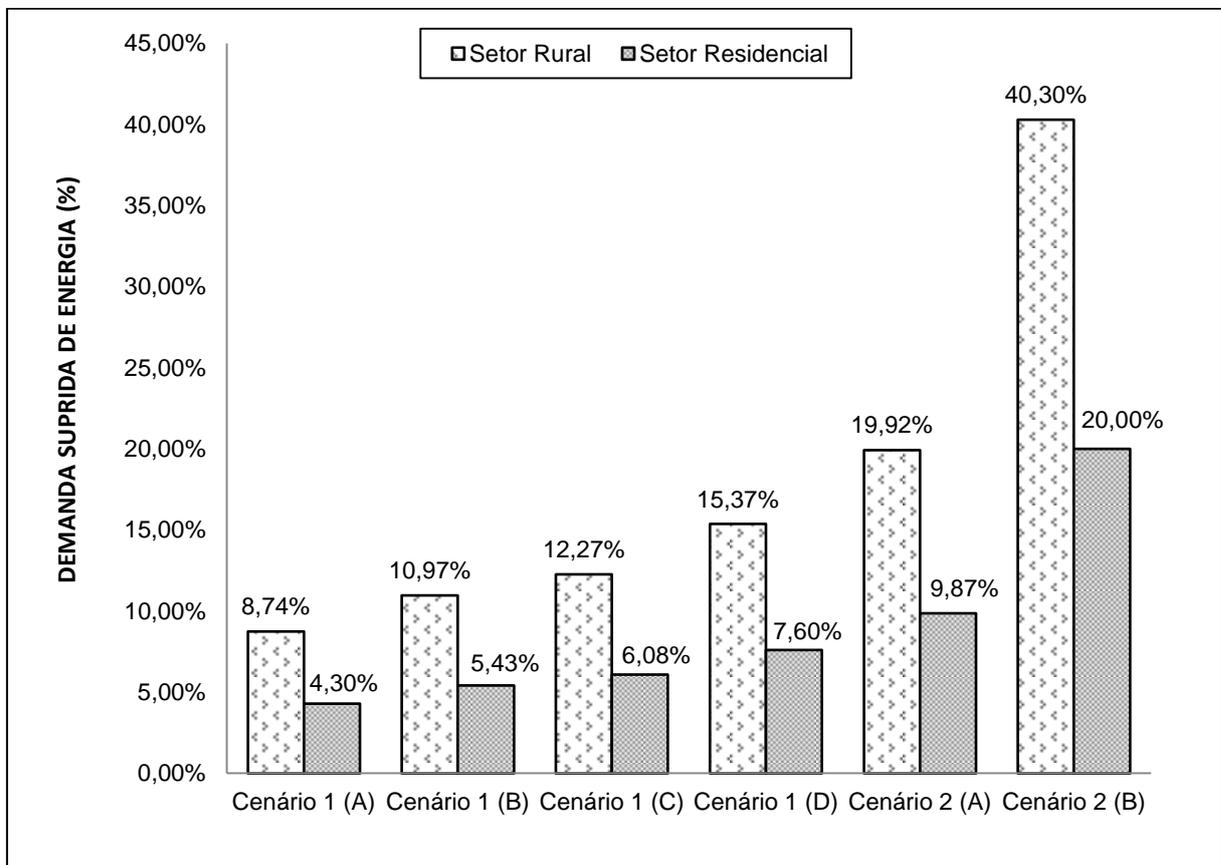


Figura 12. Demanda suprida de energia elétrica no setor rural e residencial na microrregião de Cascavel.

Fonte: Elaboração autora.

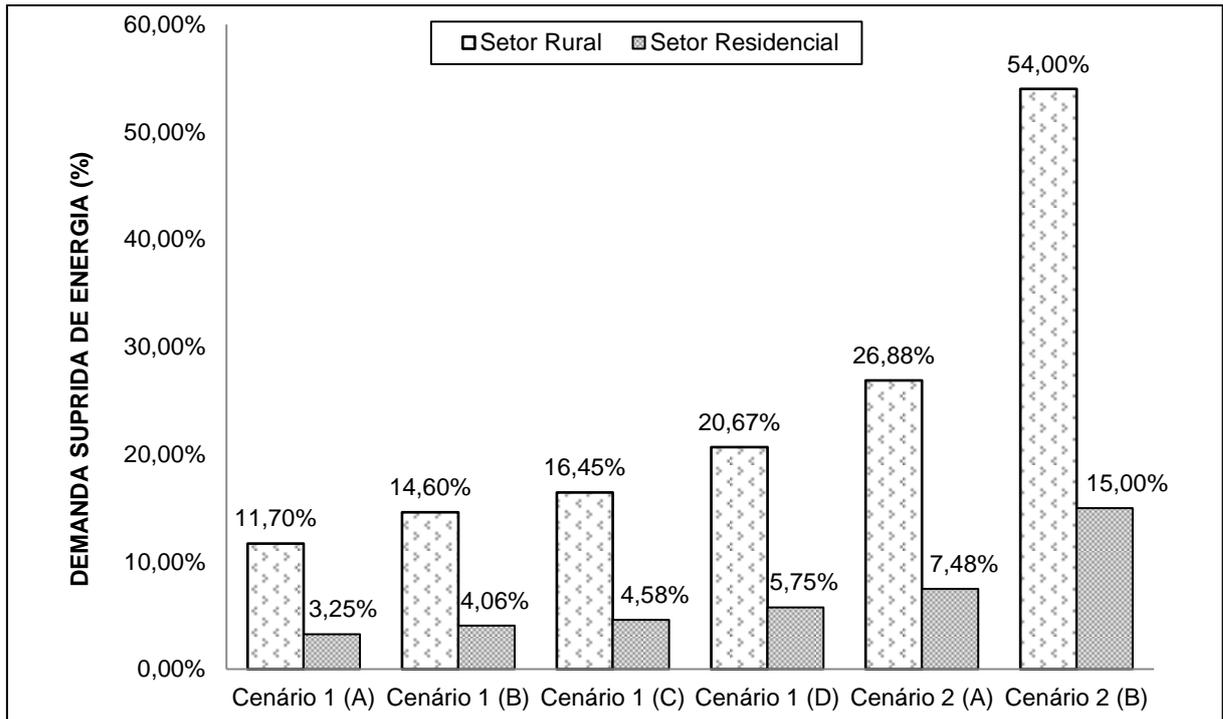


Figura 13. Demanda suprida de energia elétrica no setor rural e residencial na microrregião de Foz do Iguaçu.

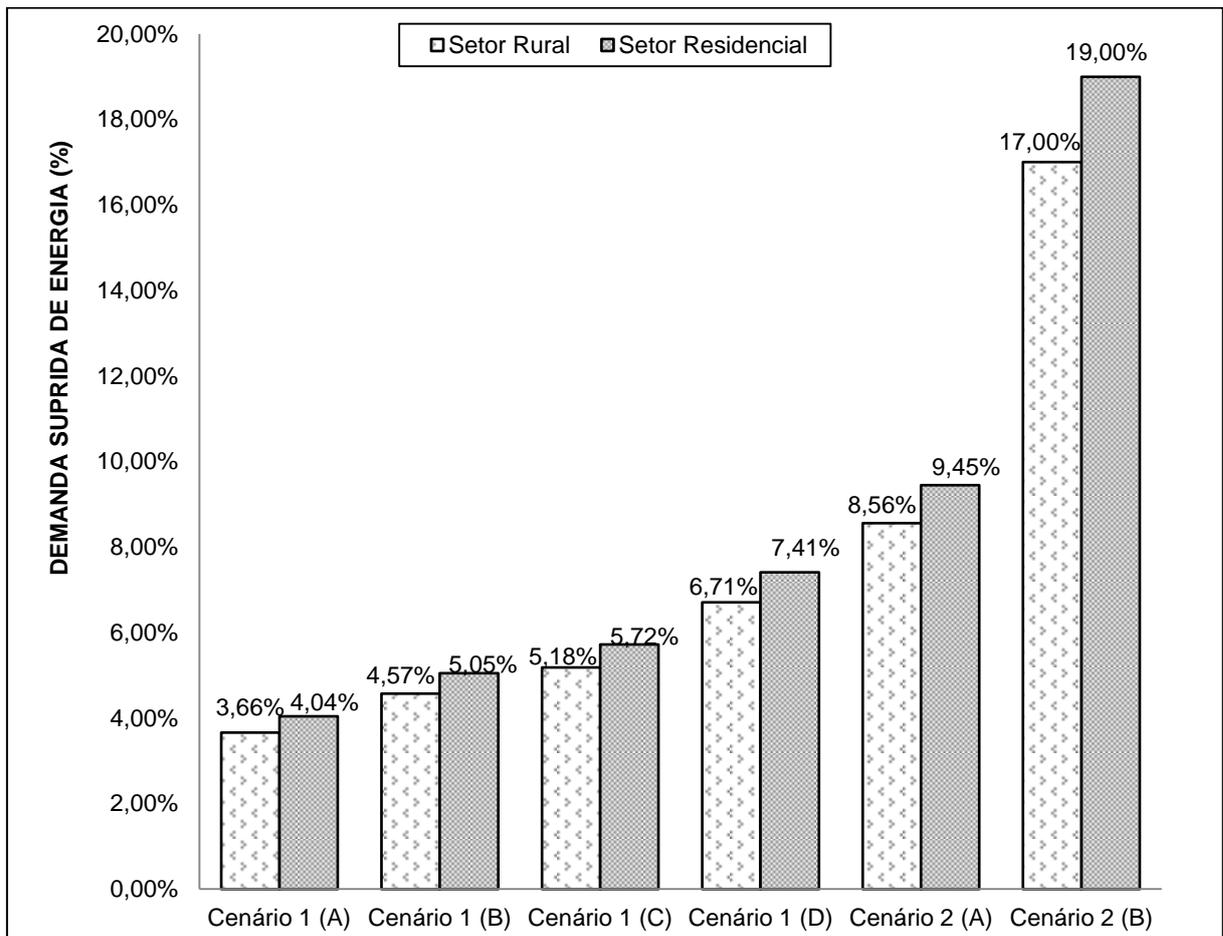


Figura 14. Demanda suprida de energia elétrica no setor rural e residencial na microrregião de Toledo.

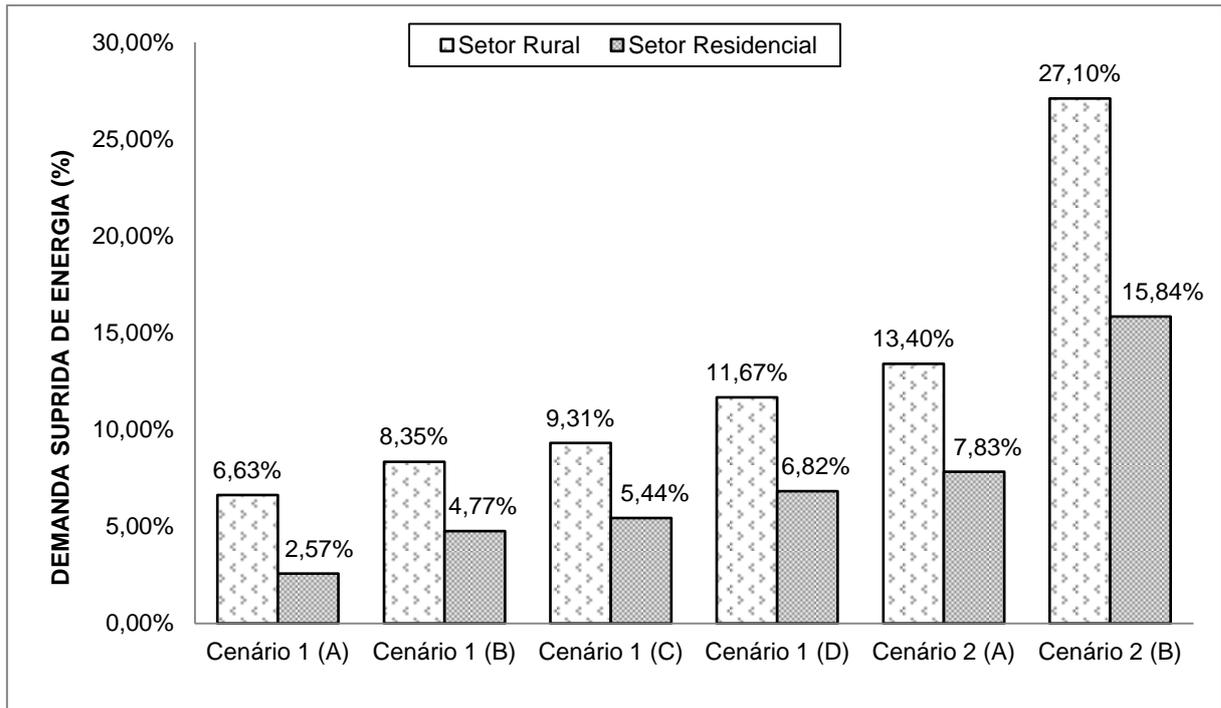


Figura 15. Demanda suprida de energia elétrica no setor rural e residencial na MROP.

Fonte: Elaboração autora

Apesar das vantagens de geração de energia e eficiência na disposição final de RSU, o custo da incineração em países em desenvolvimento é mais elevado do que em países desenvolvidos. Esse fator deve-se ao fato de que nos países desenvolvidos há dificuldade e maior custo para a obtenção de um terreno grande o suficiente para implantação de um aterro. Ademais, há taxas de portão cobradas por cada tonelada aterrada, sendo este mais um fato que faz aumentar muito o custo da tonelada a ser aterrada. Por isso a incineração desfruta de um custo mais reduzido para a implantação e para operação dessas plantas.

Segundo Zhang et al. (2012), a China é um exemplo atual de atividade de incineração, devido ao aumento na geração dos resíduos sólidos, e à falta de espaço físico para novos aterros sanitários. A estimativa é de 2,5% em 2003 (3,7 milhões de toneladas) para 14,7% em 2010 (23,2 milhões de toneladas) de resíduos sólidos incinerados.

Porém, o fato de ser um país em desenvolvimento não veda a possibilidade de obter tecnologias de tratamento de incineração dos resíduos sólidos, como é o caso de Taiwan, onde o projeto de tratamento instalado no país tem a capacidade de processar 24 mil toneladas por dia de resíduos sólidos, produzindo 622,5MW de energia. Somente no ano de 2008, Taiwan gerou 2.967 GWh a partir dos resíduos incinerados (TSAI; KUO, 2010).

Mas, o uso do gás metano de aterro se apresenta como uma tecnologia ambientalmente atrativa. Segundo Henriques (2004), apesar da elevada ineficiência da planta (40%) e do seu custo, a utilização do gás metano tem efeitos mais positivos, visto que a

conversão em energia possibilita a recuperação do capital e incrementa a viabilidade econômica da planta.

Pecora (2006) relata que no caso do Brasil as tecnologias disponíveis de recuperação energética do biogás ainda apresentam custos elevados, principalmente pelo custo dos equipamentos, pois a maioria é importada. Isso ocorre não por desconhecimento tecnológico, mas porque a escala de produção atual não permite a viabilidade econômica dos fabricantes no país. Mais recentemente começaram a aparecer fabricantes nacionais, mas ainda o foco são sistemas de pequeno porte, destinados principalmente à zona rural.

5 CONCLUSÃO

Por meio deste estudo foi possível avaliar o potencial de aproveitamento de geração de energia elétrica de RSU na MROP e suas microrregiões, Cascavel, Foz do Iguaçu e Toledo, aplicando dois cenários com tecnologias diferentes de destinação final de RSU com recuperação energética.

Dentre os cenários estudados, o Cenário 02 que empregou a incineração dos RSU se mostrou a escolha mais adequada perante as taxas aplicadas de 230 kWh.Gg⁻¹ RSU (Taxa 01) e 430 kWh.Gg⁻¹ RSU (Taxa 02), isso do ponto de vista da eficiência na conversão energética. No caso do Cenário 01, entre os módulos estudados, o Módulo 3, adotando o grupo gerador com a eficiência de 38,9%, resultou no melhor potencial de geração de eletricidade. Portanto, considera-se que o Cenário 02 se destacou perante a análise realizada.

A avaliação do potencial de geração de energia elétrica com a incineração dos RSU no Cenário 02, na microrregião de Cascavel, produziu com a Taxa 01 25.715 MWh.ano⁻¹, e com a Taxa 02 foi aumentado esse potencial para 51.990 MWh.ano⁻¹. Ao aplicar essa produção de energia elétrica na microrregião, constatou-se que no setor rural pode ser suprida em 19,9% (Taxa 01) e 40,3% (Taxa 02), e no setor residencial em 9,87% (Taxa 01) e 20% (Taxa 02). No caso do Cenário 01, no que diz respeito ao aproveitando do gás metano oriundo de aterro sanitário (Módulo 3), constatou-se que o IRB 50% produziu 14.160 MWh.ano⁻¹, podendo suprir uma demanda de 10,90% no setor rural e 5,43% no setor residencial. Já a análise do IRB 70% mostrou uma geração de 19.840 MWh.ano⁻¹, a qual pode suprir 15,4% no setor rural e no setor residencial 7,60%.

A microrregião de Foz do Iguaçu, produziu no Cenário 02 um potencial de 24.448 MWh.ano⁻¹ (Taxa 01), aumentando para 49.090 MWh.ano⁻¹ (Taxa 02). Essa produção de energia elétrica gerada na incineração dos RSU pode suprir uma demanda no setor rural de 26,7% (Taxa 01) e 54,0% (Taxa 02), e no setor residencial de 7,48% (Taxa 01) e 15,0% (Taxa 02). No Cenário 01, a produção de energia elétrica com aproveitamento de gás metano com o IRB 50% produziu 14.960 MWh.ano⁻¹ (Módulo 3), esta produção de eletricidade supri na referida microrregião no setor rural uma demanda de 14,60% e no setor residencial de 4,06%. O IRB 70% gerou 18.840 MWh.ano⁻¹ e pode suprir uma demanda de energia elétrica no setor rural de 20,67% e no setor residencial de 5,75%.

A microrregião de Toledo obteve menores valores de geração de energia elétrica quando comprado as microrregiões. O Cenário 02 produziu um potencial de eletricidade com

a incineração dos RSU de 22.448 MWh.ano⁻¹ (Taxa 01) elevado para 45.383 MWh.ano⁻¹ (Taxa 02). Essa produção de energia elétrica do Cenário 02 pode suprir no setor rural uma demanda de 8,56% (Taxa 01) a 17,0% (Taxa 02), e no setor residencial de 9,45 % (Taxa 01) a 19,0% % (Taxa 02). O aproveitamento do gás metano de aterro sanitário no Cenário 01 com o IRB 50% gerou 12.000 MWh.ano⁻¹ (Módulo 3), essa produção pode suprir no setor rural uma demanda de 4,57% e no setor residencial 5,05%. O IRB 70% produziu 17.600 MWh.ano⁻¹ (Módulo 3), e pode suprir no setor rural uma demanda de 6,17% e no setor residencial 7,41%.

No que tange ao potencial da geração de eletricidade dos RSU da MROP no Cenário 02, pelos resultados obtidos, averiguou-se que a incineração apresentou com a Taxa 01 a menor produção, de 8,1 MW, equivalente a 64.600 MW.h.ano⁻¹. Esse potencial supriria uma demanda de energia elétrica de 13,4% no setor rural e de 7,83% no setor residencial, considerando toda MROP. Com a Taxa 02 a potência produzida foi a mais elevada, de 16,3 MW, equivalente a 130.604 MW.h.ano⁻¹. Esse valor poderia inteirar uma demanda energética total na MROP de 27,10% no setor rural e de 15,84% no setor residencial.

No Cenário 01, no Módulo 3, ao utilizar o gás metano oriundo de aterro sanitário para geração de energia elétrica na MROP, com um IRB 50% pode ser gerado um potencial de 5,03 MW, equivalente a 40.240 MWh.ano⁻¹. Nesse caso, a produção pode suprir uma demanda energética de 9,31% no setor rural e 5,44% no setor residencial. Com o IRB 70%, adotando a mesma tecnologia, foi gerado uma potência de 7,03 MW com uma energia disponível de 56.240 MWh.ano⁻¹. Esse potencial pode suprir uma demanda energética de 11,67% no setor rural e 6,82% no setor residencial.

Assim, considera-se que o aproveitamento energético de RSU pode ser considerado uma alternativa promissora para uma estratégia regional ou local e, portanto, não deve ser desconsiderado. Principalmente, quando implantado a gestão integrada de resíduos sólidos nos município, o que pode possibilitar o aproveitamento energético da biomassa de RSU.

REFERÊNCIAS

- ABLP. Associação Brasileira de Resíduos Sólidos e Limpeza Pública. **Guia de orientação para adequação dos Municípios à Política Nacional Resíduos Sólidos**. São Paulo. 2011. 138p. Disponível: <http://www.cidadessustentaveis.org.br/sites/default/files/arquivos/guia_pnrs_pwc.pdf>. Acesso: 02 mar., 2013.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8419**: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR-10004**. Resíduos Sólidos: Coletânea de Normas. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. São Paulo. 2012. 116 p. Disponível: <<http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2012.pdf>>. Acesso em: 15 mai., 2013.
- ABREU, W. S. de. **Estudo de viabilidade técnica financeira da geração de energia elétrica a partir do aterro sanitário da cidade de Taubaté**. Dissertação (Mestre em Gestão e Desenvolvimento Regional do Departamento de Economia, Contabilidade e Administração). 2007. 93 p. Universidade de Taubaté. São Paulo. 2007. Disponível: <http://www.ppga.com.br/mestrado/2007/abreu-weliton_santos_de.pdf>. Acesso em: 08 mar., 2013.
- ABREU, F. V. **Análise de Viabilidade Técnica e Econômica da Geração de Energia Através do Biogás de Lixo em Aterros Sanitários**. Dissertação. (Mestre Área de concentração: Fenômenos de Transporte). 2009. 127 p. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Disponível: <<http://www.ppgem.eng.uerj.br/trabalhosconclusao/2009/DISSERTACAOPPG-EM-FabioVianadeAbreu.pdf>>. Acesso em: 05 jun., 2013.
- AMARAL, R. **Estagio atual da incineração no Brasil**. ABLP, VII Seminário Nacional de Resíduos Sólidos e Limpeza Pública, 2000. Curitiba. Disponível: <<http://www.resol.com.br/textos/Estado%20Atual%20da%20Incinerao%20no%20Brasil.htm>>. Acesso: 05 jun., 2013.
- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil). **Atlas de energia elétrica do Brasil**. Brasília. 2002. 153 p. Disponível: <http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/livro_atlas.pdf>. Acesso em: 05 jun., 2013.
- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil). **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3. ed. Brasília. 2008. 236 p. Disponível: <http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_capa_sumario.pdf>. Acesso em: 06 jun., 2013.
- ARANDA, D. A. G. **A incineração controla de resíduos sólidos- status mundial**. Rio de

Janeiro. 2001

BIDONE, R. F. A.; POVINELLI, J. **Conceitos Básicos de Resíduos Sólidos**. São Carlos. 1999. 120 p

BOATENG, C.; LEE, K.T.; MENSAH, M. **The prospects of electricity generation from municipal solid waste (MSW) in Ghana: A better waste management option**. Fuel Processing Technology 110: 94-102, 2013.

BOVE R.; LUNGHI, P. **Electric power generation from landfill gas using and innovative technologies**. Energy Conversion and Management. 47. 2006. 11 e 12:1391-1401p.

BRASMETANO. **Conjunto moto gerador para biogás de aterro e créditos de carbono: landbox**. São Paulo, 2009. Disponível em: <www.brasmetanosustentabilidade.com>. Acesso em: 27 abr., 2013.

BRASIL. **Lei Federal nº 11.107/05, de 06 de abril de 2005**. Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/Decreto/D7404.htm>. Acesso em: 03 mai., 2012.

BRASIL. **Lei 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. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm>. Acesso em: 12 mar., 2012.

Brasil. **Decreto nº 7.404/10**. Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Disponível: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/Decreto/D7404.htm>. Acesso em: 11 mar., 2013.

BRITO FILHO, L. F. **Estudo de gases em aterros de resíduos sólidos urbanos**. 2005. 218p. Dissertação (Mestre em Ciências). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2005

BROGAARD, L.K.; RIBER, C.; CHRISTENSEN, T.H. **Quantifying capital goods for waste incineration**. Waste Management. Article in Press. 2013.

CARESANA F. et.al. **Energy production from landfill biogas: An intalian case**. Biomass & Bioenergy. V 35. N 10. 2011. 4331- 4339.

CAPSTONE. Disponível em: <http://www.capstoneturbine.com/_docs/Product%20Catalog_ENGLISH_LR.pdf>. Acesso em 05 out., 2013.

CATERPILLAR. Disponível em: <<http://brasil.cat.com/cda/layout?m=333535&x=12&f=448245>>. Acesso em 05 out., 2013.

CHERNICHARO, C.A.L. Princípio do tratamento biológico de águas residuais. Volume 5: **Reatores anaeróbios**. Belo Horizonte: DESA-UFMG, 1997. 245 p.

CHRISTENSEN T. H. et al. **Biogeochemistry of landfill leachate plumes**. Applied Geochemistry, v 16. n .7. 2001. 659 – 718p.

COSTA JUNIOR, N. **Análise do projeto de uso do biogás no aterro bandeirantes utilizando células a combustível e queimadores registradores de biogás eco eficientes**. 2012. 96 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade de Taubaté. São Paulo. 2012. Disponível em: <http://www.costajr.pro.br/docs/Unitau/Dissertacao_-versaofinal_defesa%20-%20Nilton_4.pdf>. Acesso em: 17 mai., 2013.

COUTO et. al. **Vias de valorização energética da biomassa**. Renabio. Biomassa & Energia, V. 1, n 1. 2004. 71- 92p.

CORTEZ, L. A. B; GÓMEZ, E. O; LORA, E. E. S. **Biomassa para energia**. São Paulo. 2008. 736 p.

CRUZ, Maria do Carmo M. T. **Consórcios Intermunicipais: uma alternativa de integração regional ascendente**. São Paulo: Polis; Programa Gestão Pública e Cidadania/EAESP/FGV. 2001. 96p.

CUSSIOL, N. A. M.; ROCHA, G. H. T.; LANGE, L. C. **Gravimetric characterization of potentiallyinfectious material in urban solid waste in southern Belo Horizonte, Minas Gerais State**. Brazil. Caderno de Saúde Pública, Rio de Janeiro, V. 22, n. 6. 2006.

DEMPSEY, C. R.; OPPELT, E. T. **Incineração de resíduos perigosos: uma revisão crítica atual**. Traduzido por Milton Norio Sogobe. São Paulo: CETESB/EET, 1987. 80p.

DUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. **Biogas from Waste and Renewable Resources**. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2008. 443p.

EL-FADEL, M.; FINDIKAKIS, A. N.; LECKIE, J. O. **Environmental impacts of solid waste landfilling**. Journal of Environmental Management, ASCE, 50. 1997.1-25 p.

ENSINAS, A. V. **Estudo da geração de biogás no aterro sanitário delta em Campinas – SP**. 2003. [s/n]. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica). Pós-Graduação na Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas. São Paulo. 2003. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=vtls000315429>>. Acesso em: 2 jun., 2013.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Nacional de Energia 2030**. Rio de Janeiro. 2007. 408p. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/publicacoes/pne_2030/PlanoNacionalDeEnergia2030.pdf>. Acesso em: 02 mar., 2012

EPE. Empresa de Pesquisa Energética Balanço Energético Nacional. **Empresa de Pesquisa Energética**. Rio de Janeiro. 2012. 51p. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Resultados_Pre_BEN_2012.pdf>. Acesso em: 02 mar., 2012.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. Nota Técnica DEN 06/08. **Avaliação Preliminar do Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos de Campo Grande, MS**. Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/S%C3%A9rie%20Estudos%20de%20Energia/20081208_1.pdf>. Acesso em: 03 mar., 2013.

ESMAP. Energy Sector Management Assistance Programme. The World Bank. **Handbook for the Preparation of Landfill Gas to Energy Projects in Latin America and the Caribbean**. Ontário, 2004. Disponível em: <https://www.esmap.org/sites/esmap.org/files/Handbook_Preparation_LandfillGas_to_EnergyProjects_LAC_Resized.pdf>. Acesso em: 05 jun., 2012.

FARIAS, A.; JUCÁ, J. F. T. **Propriedades físicas dos resíduos sólidos do aterro de Muribeca**. In: XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, Porto Alegre. 2000.

FARRET, F. A. **Aproveitamento de pequenas fontes de energia elétrica**. Santa Maria: Editora da UFSM. 1999. 245p.

FIGUEIREDO, N. J. V. **Utilização de biogás de aterro sanitário para geração de energia elétrica**. 2011. 147 p. Dissertação (Mestre em Ciências). Universidade de São Paulo. São Paulo. 2011. Disponível em <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/86/86131/tde-11082011-092549/pt-br.php>>. Acesso em: 05 out., 2013.

GOMES. J.; SUZUKI. J. A. N. Consórcios intermunicipais para a destinação de RSU em aterros regionais: estudo prospectivo para os municípios no Estado do Paraná. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**. v.14 n.2 .2009. 155-158p.

GOMES; F. C. S. P. **Biometanização Seca de Resíduos Sólidos Urbanos**. Estado da Arte e Análise Crítica das Principais Tecnologias. 2010. 215p. Dissertação (Mestre em Sustentabilidade Socioeconômica e Ambiental – Área de Concentração: Ambientometria). Núcleo de Pesquisas em Recursos Hídricos – Pró-Água. Programa de Pós-Graduação em Sustentabilidade Socioeconômica e Ambiental. Universidade Federal de Ouro Preto. Minas Gerais. 2010. Disponível em: <<http://www.sustentabilidade.ufop.br/arquivos/dis/2010/Felipe%20Gomes.pdf>>. Acesso em: 14 abr., 2013.

GRIPP, W. G. **Aspectos técnicos e ambientais da incineração de resíduos sólidos urbanos: considerações sobre a proposta para São Paulo**. 1998. 208 p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. 1998.

GUWY, A. J. **Equipment used for testing anaerobic biodegradability and activity, Reviews.** In: Environmental Science and Bio/Technology, v.3. n.2. 2004. 131–139p.

HALL, D. O.; HOUSE, J. I.; SCRASE, I. Overview of Biomass Energy. In. ROSILLO-CALLE, F., BAJAY, S. V. e ROTHMAN, H. **Industrial Uses of Biomass Energy: the example of Brazil.** Londres – New York: Taylor & Francis, 2000 (capítulo 1).

HAUSER, D. P.; LEMME, C. F.; Modelo de Financiamento para Projetos de Incineração de Resíduo Sólido Municipal no Âmbito do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo. **Revista de Gestão Social e Ambiental.** 2007.

HENRIQUES, R. M. **Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos: Uma Abordagem Tecnológica.** 2004. 189 p. Dissertação (Mestre em Planejamento Energético). Coordenação dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia. Universidade do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2004.

IBAM. Instituto Brasileiro de Administração Municipal. **Manual Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos.** Rio de Janeiro. 2001. 204 p.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Demográfico 2010.** Estados. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/index.php>>. Acesso em: 15 jan., 2013.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Geociências.** Disponível em: <http://downloads.ibge.gov.br/downloads_geociencias.htm>. Acesso em: 4 abr., 2013.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Pesquisa. **Cidades.** Disponível em: <<http://www.cidades.ibge.gov.br/xtras/uf.php?lang=&coduf=41&search=parana>>._Acesso em: 4 jan., 2013.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Pesquisa. **Mapas.** Disponível em: <<http://mapas.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 4 abr., 2013.

IEA. International Energy Agency. **World Energy Outlook 2012.** Chapter 7: Renewable Energy Outlook Paris: OECD/IEA, 2012. 211-240 p. Disponível em: <http://www.worldenergyoutlook.org/media/weowebiste/2012/WEO2012_Renewables.pdf>. Acesso em: 02 jun., 2012.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Guia para inventários nacionais de gases de efeito estufa.** Módulo 6: Lixo. Volume 2. 1996.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (2006). **Chapter 2 –Waste generation, composition and management data.** Publicado: IGES, Japan. Disponível em: <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>>. Acesso em: 28 maio, 2013.

IPCC. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (2006). **Chapter 3 – Solid Waste.** Publicado: IGES, Japan. Disponível em: <

nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>. Acesso em: 28 maio, 2013.

IPT. Instituto de Pesquisa Tecnológica do Estado de São Paulo/Compromisso Empresarial para Reciclagem Lixo Municipal. **Manual de Gerenciamento Integrado**. 2 ed. São Paulo. 2000. 370 p.

JARDIM, N. S. et al. **Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento integrado**. São Paulo: IPT: CEMPRE, 1994.

JUCÁ, J. F. T. et al. **Diagnóstico de Resíduos Sólidos no Estado de Pernambuco**. In: XXVIII Congresso Interamericano AIDIS. 2002.1-11p.

KADIR S.; YIN, C-Y, SULAIMAN, M.R; CHEN, X., EL-HARBAWI, M. **Incineration of municipal waste in Malaysia: Salient issues, policies and waste-to-energy initiatives**. Renewable and Sustainable Energy Reviews 24: 2013,181-186.

KLASS, D. L. **Biomass for Renewable Energy, Fuels and Chemicals**. Estados Unidos. Academic Press. 1998. Disponível em: <<http://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=udDHC3Ss7DAC&oi=fnd&pg=PP2&dq=Biomass+for+Renewable+Energy,+Fuels+and+Chemicals&ots=Q0fc7icAnw&sig=plyjly6xdGRmwariver1OxOTWBk#v=onepage&q=Biomass%20for%20Renewable%20Energy%2C%20Fuels%20and%20Chemicals&f=false>>. Acesso em: 02 mar., 2013.

KREITH, F. **Handbook of Solid Waste Management**. McGraw-Hill, 1994.

LIMA, L. M. Q. **Lixo: tratamento e biorremediação**. 3. ed. HEMUS. 2004. 265 p.

LINO, F. A. de M. **Consumo de energia no transporte da coleta seletiva de resíduo sólido domiciliar no município de Campinas (SP)**. 2009. 154p. Dissertação (Mestre em Planejamento de Sistemas Energéticos. Universidade Estadual de Campinas. Campinas/SP. 2009. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=000775841>>. Acesso em: 17 maio, 2013.

LORA, E. E. S.; NOGUEIRA, L. A. H. **Dendroenergia. Fundamentos e Aplicações**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência. 2003. 200p.

MACIEL, F. J. **Estudo da Geração, Percolação e Emissão de Gases no Aterro de Resíduos Sólidos da Muribeca /PE**. 2003. 173 p. Dissertação (Mestre em Ciências em Engenharia Civil). Universidade Federal de Pernambuco. Recife. 2003. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/userfiles/file/mudancasclimaticas/biogas/file/docs/artigos_dissemtacoes/maciel.pdf>. Acesso em: 08 maio, 2013.

MENEZES, R. A. A.; **Seminário nacional de resíduos sólidos em limpeza pública**. Curitiba. 2000. Disponível em: <<http://www.luftech.com.br/arquivos/art07.htm>>. Acesso em: 15 jun., 2013.

MESQUITA JUNIOR, J. M. **Gestão integrada de resíduos sólidos. Mecanismo de desenvolvimento limpo aplicado a resíduos sólidos.** Instituto Brasileiro de Administração Municipal. III Série. Rio de Janeiro. 2007. 40 p. Disponível em: <<http://livroaberto.ibict.br/bitstream/1/796/1/Gest%C3%A3o%20Integrada%20de%20Res%C3%ADduos%20S%C3%B3lidos%3B%20mecanismo%20de%20desenvolvimento%20limpo%20aplicado%20a%20res%C3%ADduos%20s%C3%B3lidos.pdf>>. Acesso em: 10 abr., 2013.

MMA. MINISTÉRIO DE MEIO AMBIENTE. **Estudo do potencial de geração de energia renovável proveniente dos “aterros sanitários” nas regiões metropolitanas e grandes cidades do Brasil.** Brasília. 2005.

MMA. MINISTÉRIO DE MEIO AMBIENTE. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos.** Agosto. 2012. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/253/_publicacao/253_publicacao02022012041757.pdf>. Acesso em: 10 out., 2013.

MMA. Ministério do Meio Ambiente. **Planos de gestão de resíduos sólidos: manual de orientação.** Brasília, 2012b. 257p.

MORAES JUNIOR, L. T. R. **Recuperação energética de resíduos no médio vale do rio Itajaí Açu com foco na conversão em energia elétrica.** 2012. 106 p. Dissertação (Mestre em Engenharia Elétrica). Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Tecnológicas. Universidade Regional de Blumenau. Blumenau. 2012.

OBSERVATÓRIO das Metrôpoles. O Estado do Paraná no Censo 2010. Disponível em: <http://observatoriodasmetrôpoles.net/download/PR_Censo2011.pdf>. Acesso em: 17 maio, 2012.

OLIVEIRA, L. B. **Potencial de aproveitamento energético de lixo e de biodiesel de insumos residuais no Brasil.** 2004. 237 p. Tese (Doutor em Ciências em Planejamento Energético). Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade do Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.ppe.ufrj.br/pppe/production/tesis/lboliveira.pdf>>. Acesso em: 5 maio, 2013.

OLIVEIRA, et al. Estudo da produção *per capita* de resíduos sólidos domiciliares da cidade de Campina Grande/PB. **Revista Saúde e Ambiente.** v. 5, n. 2, dez. 2004. 37-44 p.

OLIVEIRA, S. **Gestão dos resíduos sólidos urbanos na microrregião homogênea Serra de Botucatu/SP.** 1997. 127 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura). Faculdade de Ciências Agrônômicas. Universidade Estadual Paulista. 1997.

PARANÁ (estado). **Resolução conjunta nº 01/2006 – SEMA/IAP/SUDERHSA.** Disponível em: <http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/Legislacao_ambiental/Legislacao_estadual/RESOLUCOES/RESOLUCAO_SEMA_SUDERSHA_01_2006.pdf>. Acesso em: 01 out., 2013.

PECORA, V. **Implantação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residencial da USP – Estudo de Caso.** 2006. 152p. Dissertação (Mestre em Energia). Programa Inter unidades de Pós-Graduação em Energia (PIPGE) do Instituto de Eletrotécnica e Energia (IEE) da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

PENTEADO R.; CAVALLI, M., MAGNANO, E., CHIAMPO, F. **Application of the IPCC model to a Brazilian landfill: First results.** Energy Policy. 2012. V 42: 551-556.

PEREIRA NETO, J. T. **Gerenciamento do lixo urbano: aspectos técnicos e operacionais.** Viçosa. 2007. 129 p.

PHILIPPI Júnior. **Agenda 21 e resíduos sólidos.** In: RESID`99 – Seminário sobre resíduos sólidos, São Paulo. Anais. São Paulo: Associação Brasileira de Engenharia. 1999. 15-26p.

PINTO, M. S. de. **A coleta e disposição no Brasil.** Fundação Getúlio Vargas. Rio de Janeiro. 1979. 228 p.

POLZIN, D. A. O. F. M. **Gestão dos resíduos sólidos urbanos: análises comparativas entre Portugal e Brasil.** 2004. 78p. Dissertação (Mestre em Ciências Ambientais). Rio de Janeiro/RJ. Universidade Federal Fluminense. 2004.

PNUD. Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento. **Estudo sobre o Potencial de Geração de Energia a partir de Resíduos de Saneamento (lixo, esgoto), visando incrementar o uso de biogás como fonte alternativa de energia renovável.** São Paulo. 2010. Disponível em:
<http://www.mma.gov.br/estruturas/164/_publicacao/164_publicacao10012011033201.pdf>. Acesso em: 02 maio, 2013.

PUNA, J. F. B.; BAPTISTA, B. S. **A gestão integrada de resíduos sólidos urbanos - perspectiva ambiental econômico energética.** Quim. Nova, Vol. 31, Nº 3. Lisboa/Portugal. 2008. 645-654p

REICHERT, G. A. **Aplicação da digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos: uma revisão.** In: 23º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, Anais..., Campo Grande: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental - ABES, 2005.

RIGATO, P. C. **Estudo da composição da alimentação de um incinerador rotativo de resíduos visando aumento da capacidade operacional.** 2008. 63 p, Dissertação (Mestre em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos). Pós-Graduação Escola de Engenharia Mauá do Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia. São Caetano do Sul, 2008. Disponível em: <
[www.maua.br/arquivos/dissertacao/h/e0759dfe22b9abcdcf014f2e7e5df7aa#sthash.1uO0OlwH.dpuf/estudo-da-composicao-da-alimentacao-de-um-incinerador-rotativo-de-residuos%20\(1\).pdf](http://www.maua.br/arquivos/dissertacao/h/e0759dfe22b9abcdcf014f2e7e5df7aa#sthash.1uO0OlwH.dpuf/estudo-da-composicao-da-alimentacao-de-um-incinerador-rotativo-de-residuos%20(1).pdf)>. Acesso em: 09 maio, 2013.

SAFFER M.; DUARTE G. A. A. **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.** 26º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. 2011.

SMA. Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo. **Total costs of ownership: Comparison Incineration Plant-Landfill - Technical Co-Operation Project Bavaria-São Paulo.** Relatório Final. Governo do Estado de São Paulo, São Paulo, 2006

SANTOS G. G. D. **Análise e perspectivas de alternativas de destinação dos resíduos sólidos urbanos: o caso da incineração e da disposição em aterros.** Dissertação. (Mestre em Planejamento Energético). 2011. 193 p. Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

SILVA, W. R. **Biogás: potencialidade dos aterros sanitários do estado do Paraná.** 2010. 109 p. Dissertação (Mestre em Tecnologia. Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento e Instituto de Engenharia do Paraná. Curitiba. 2010.

SINGH, et al. **An overview for exploring the possibilities of energy generation from municipal solid waste (MSW in Indian scenario).** Renewable and Sustainable Energy Reviews.v.15.n.9. 2011. 4797- 4808p.

SMIL, V. **Energy Resources and Uses: A Global Primer for the Twenty-First Century.** Current History, V.101, n. 653, 2002. 126-132 p.

STEAG. Disponível em: <http://www.steag.com/fileadmin/vkw/kwe/vpp_menu_01.jpg> Acesso em: 16 jun., 2013.

SUCEK, Bruno M. **Dados de consumo – Oeste.** Mensagem recebida por <bruno.maus.cope.br> em 25 set. 2013.

TCHOBANOGLOUS, G. et.al. **Integrated solid waste management: Engineering principles and management issues.** Irwin MacGraw-Hill, 1993.978 p.

TCHOBANOGLOUS, G.; THEISEN, H, S. **Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues,** McGraw-Hill, Inc. International Ed., 1996.

TOLMASQUIM, M. T. **Fontes Renováveis de Energia no Brasil.** Rio de Janeiro, Interciência. 2003

TSAI W-T; KUO, K-C. **An analysis of power generation from municipal solid waste (MSW) incineration plants in Taiwan.** Energy 35: 2010, 4824-4830p.

UNFCCC. **United Nations Framework Convention on Climate Change.** Disponível em: <www.unfccc.int>. Acesso em: 5 maio, 2013.

UNSTAT. United Nations Statistic Division Environment Statistic. **Waste 2007**. Disponível em: <<http://unstats.un.org/unsd/environment/municipalwaste.htm>>. Acesso em: 07 abr., 2012.

VIEIRA, S. J. et al. **A escolha de áreas utilizando geoprocessamento para o sistema de tratamento e disposição final de resíduos sólidos**. In: COBRAC 2000 - Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário, UFSC, Florianópolis. Brasil. 2000 Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/80586/152100.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 09 maio, 2013.

ZACHOW, C. R. **Biogás**. Departamento de Tecnologia. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. 2000.12 p.

Zamorano M. **Study of the energy potential of the biogas produced by an urban waste landfill in Southern Spain**. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 11: 5. 2005. 909-922.

ZHANG, D. Q.; TAN, S. K.; GERSBERG, R. M. **Municipal solid waste management in China: Status, problems and challenges**. Journal of Environmental Mangement 91: 2010. 1623-1633p.

ZANETTE, A. L. **Potencial de Aproveitamento Energético do Biogás no Brasil**. 2009. p 97. Dissertação (Mestre em Ciências em Planejamento Energético). Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2009. Disponível em: <http://www.ppe.ufrj.br/ppe/production/tesis/zanette_luiz.pdf>. Acesso em: 21 maio, 2012.

WANG, L; HU, G.; GONG, X.; BAO, L. **Emission reductions potential for energy from municipal solid waste incineration in Chongqing**. Renewable Energy 34:2009.2074-2079p.

WANGET, et al. **Emission reductions potential for energy from municipal solid waste incineration in Chongqing**. Renewable Energy 34. China. 2009. 2074-2079p.

WILIAMS, R. B. Project 1.1 – **Technology Assessment for Biomass Power Generation – UC Davis - Task 1.1.1 Draft Final Report**. UCDAVIS, Davis, 2004. Disponível em: <<http://biomass.ucdavis.edu/files/reports/2004-cbc-technology-assessment-smud-regren-program.pdf>>. Acesso em: 10 jun., 2013.

WILLUMSEN, H. C. **Energy recovery from landfill gas in Denmark and Worldwide**. LG Consultant. 2001.

WILLUMSEN, H. C.; BACH, L. **Landfill gas utilization overview, Proceedings of The Third International Landfill Symposium**. Itália, Vol.1, 1991.329-348p.

World Energy Council. **Survey of Energy Resources**. London. Inglaterra. 2010. 618 p. Disponível em: <http://www.worldenergy.org/documents/ser_2010_report_1.pdf>. Acesso em: 03 mar., 2013.